

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

На правах рукописи



Денисевич Александр Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
ПРОКАТНОГО СТАНА ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ДУГОВОЙ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ**

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 - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С	19
АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ.....	19
1.1 Анализ способов повышения надежности работы ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения	23
1.1.1 Система управления АВ с предупреждением по напряжению обратной последовательности	24
1.1.2 Система управления АВ с предупреждением по напряжениям обратной и нулевой последовательностей	25
1.1.3 Система управления АВ с использованием метода кинетического буферирования	26
1.1.4 Система управления АВ с переводом работы АВ в диодной режим работы при возникновении провалов напряжения.....	28
1.2 Выводы по главе 1.....	32
ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ И ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СТАНА «1750» ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ. ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВНУТРИЗАВОДСКУЮ СЕТЬ 34,5 кВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА ЗАО «ММК METALURJI»	35
2.1 Анализ причин возникновения и распределения провалов напряжения во внутризаводской сети завода «ММК Metalurji»	36
2.2 Результаты экспериментальных исследований режимов работы стана горячей прокатки «1750» металлургического завода «ММК Metalurji»	42
2.2.1 Характеристика силового оборудования стана горячей прокатки «1750».....	44
2.2.2 Анализ экспериментальных исследований режимов работы главных электроприводов СГП «1750»	47
2.3 Результаты экспериментальных исследований режимов работы электросталеплавильного цеха металлургического завода «ММК Metalurji»	50
2.3.1 Характеристика силового оборудования электросталеплавильного комплекса.....	50

2.3.2 Анализ экспериментальных исследований режимов работы электросталеплавильного комплекса ЗАО «ММК Metalurji».....	53
2.4 Выводы по главе 2.....	62
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДУГОВАЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ-СТК- ПЧ-АВ».....	64
3.1 Разработка имитационной модели главных электроприводов стана горячей прокатки «1750».....	65
3.1.1 Расчет параметров и разработка имитационной модели питающей сети.....	65
3.1.2 Разработка имитационной модели согласующих трансформаторов....	68
3.1.3 Разработка имитационной модели силовой схемы трехуровневого активного выпрямителя.....	73
3.1.4 Разработка математической модели системы управления АВ	75
3.2 Разработка имитационной модели дуговой сталеплавильной печи ДСП-250	82
3.3 Разработка имитационной модели СТК 330 МВАр.....	85
3.4 Разработка имитационной модели с учетом случайного характера изменения электрической дуги.....	87
3.5 Проверка адекватности разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ».....	88
3.6 Выводы по главе 3	92
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПЧ-АВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ПРОКАТНОГО И ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО КОМПЛЕКСОВ	94
4.1 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения	95
4.2 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу	97
4.3 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при включении СТК и фильтрокомпенсирующих цепей.....	100

4.4	Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при параллельной работе прокатного стана с электросталеплавильным комплексом.....	102
4.5	Выводы по главе 4	105
ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УСТОЙЧИВУЮ РАБОТУ ПЧ-АВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ, ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ.....		
6.1	Разработка усовершенствованной системы управления АВ, обеспечивающей устойчивую работу при параллельной работе с ДСП	107
5.1.1	Разработка усовершенствованного контура регулирования токов, потребляемых АВ	113
5.1.2	Разработка СУ АВ с дополнительным контуром регулирования реактивного тока	119
5.2	Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления ПЧ-АВ.....	126
5.2.1	Оценка эффективности разработанной СУ АВ при включении печного трансформатора.....	127
5.2.2	Оценка эффективности разработанной СУ АВ при включении ФКЦ СТК.....	128
5.2.3	Оценка эффективности разработанной СУ АВ при несимметричных провалах напряжения	129
5.3	Выводы по главе 5	135
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		141
ПРИЛОЖЕНИЕ А		157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....		163
ПРИЛОЖЕНИЕ В		167

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Технический прогресс в области автоматизированного электропривода характеризуется непрерывным совершенствованием его элементной базы, а также развитием преобразовательной техники. Современные главные электроприводы прокатных станков выполняются на базе высоковольтных синхронных электродвигателей и высоковольтных преобразователей частоты с активными выпрямителями (АВ) и автономными инверторами напряжения (АИН).

Преобразователи частоты с активными выпрямителями и автономными инверторами напряжения относятся к третьему этапу развития преобразовательной техники [1]. Этот этап можно отметить, как изменения за счет применения активных выпрямителей. Активные выпрямители выполнены по идентичной схеме автономного инвертора напряжения. С автономным инвертором напряжения последовательно соединены фильтр и активный выпрямитель. Транзисторы (тиристоры) выпрямителя и инвертора характеризуются тем, что они имеют полную управляемость, а также двухстороннюю проводимость. Управление ключами автономного инвертора напряжения и активного выпрямителя происходит методом широтно-импульсной модуляции. Так, выпрямленное напряжение на входе АИН преобразуется на выходе в переменное напряжение регулируемой амплитуды и частоты. Это позволяет иметь требуемую форму тока двигателя, а также регулировать равномерность его вращения на различных скоростях. Автономный инвертор напряжения имеет весьма важную особенность – это возможность производить обмен энергии между звеном постоянного тока и электродвигателем переменного тока. Данная возможность присутствует также и в том случае, когда АИН включен в схему как активный выпрямитель. Таким образом, преобразователь частоты с промежуточным звеном постоянного тока позволяет обмениваться энергией электрическому двигателю, который работает в режиме рекуперации энергии в питающую сеть. Дан-

ная процедура обеспечивает возможность построения энергосберегающих систем электропривода в различных областях использования с высоким качеством потребления электроэнергии.

Применение преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) обусловлено рядом преимуществ по сравнению с неуправляемыми выпрямителями, среди которых можно выделить: поддержание коэффициента мощности равного единице в точке подключения ПЧ-АВ; возможность рекуперации энергии в сеть, при работе двигателя в генераторном режиме работы; снижение влияние высших гармоник генерируемых ПЧ-АВ в питающую сеть, за счет применения модифицированных алгоритмов широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Как было отмечено выше, управление транзисторами/тиристорами АВ осуществляется системой управления по методу ШИМ. Опыт эксплуатации ПЧ-АВ показал, что системы управления АВ чувствительны к возмущениям напряжения, возникающем в питающей сети. Наиболее негативное влияние на работу системы управления АВ оказывает несимметрия напряжения, которая приводит к снижению устойчивости работы ПЧ-АВ [2-5]. В связи с этим качество функционирования и работоспособность таких механизмов напрямую зависят от показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Нормы качества электроэнергии в точках общего подключения определяют надежность электроснабжения и регламентируются нормами ГОСТ 32144-2013.

Одним из важнейших показателей является провал напряжения, который возникает во внешней питающей сети и оказывает влияние на работу основных и вспомогательных технологических агрегатов. Так, например, возникновение однофазного провала напряжения на уровне 30% приводит к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока, амплитуда которых достигает 20% от номинального значения. Несимметрия напряжения приводит к увеличению токов, потребляемых АВ в 1,5-2 раза от номинального значения и к их несимметрии. Из сказанного выше следует, что несимметричные провалы напряжения приводят к аварийному отключению ПЧ-АВ внутренними защитами

преобразователя [5]. Аварийное отключение ПЧ-АВ характеризуется нарушением нормального технологического процесса и приводит к значительному материальному ущербу.

Аналогичная проблема наблюдается на металлургическом заводе ММК Metalurji, г Искендерун, Турция на стане горячей прокатки (СПП) 1750. Электроснабжение завода осуществляется по воздушной линии электропередач 380 кВ, которая проходит через горную местность с лесными массивами. В связи с этим часто возникают однофазные короткие замыкания, сопровождающиеся провалами напряжения. Провалы напряжения трансформируются во внутриводскую сеть 34,5 кВ, через сетевые трансформаторы, оказывают негативное влияние на работу ПЧ-АВ. Частота возникновения провалов напряжения, сопровождающихся отключением главных электроприводов СПП 1750, составляет до 50 раз в год. В связи с этим в работе [21] было предложено объединить на параллельную работу секции шин 34,5 кВ, питающих электросталеплавильный комплекс, и главные электроприводы СПП 1750. Для обеспечения компенсации провалов напряжения с помощью резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора (СТК), функционирующего в составе электросталеплавильного комплекса.

Дуговая сталеплавильная печь (ДСП) является электроприемником с резкопеременным и нелинейным характером нагрузки. В связи с этим при работе печи возникают возмущения напряжения в точке подключения ДСП, характеризующиеся высоким коэффициентом несимметрии по обратной последовательности. При эксплуатации электросталеплавильного комплекса наблюдается ряд технологических особенностей, например таких как: включение печного трансформатора (ПТ) на холостом ходу, которое сопровождается броском тока намагничивания, величина которого может достигать от 2 до 8 номинальных токов ПТ, который приводит к просадкам напряжения в точке подключения; включение фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ), входящих в состав СТК. При включении ФКЦ возникают коммутационные перенапряжения, достигающие 30% от номинального уровня напряжения сети.

Из выше сказанного следует, что для оценки, предложенного в работе [21], способа повышения надежности работы ПЧ-АВ за счет объединения на параллельную работу электросталеплавильного комплекса и главных электроприводов СГП «1750» с целью компенсации провалов напряжения с помощью резервов реактивной мощности СТК необходимо проведение исследования о возможности параллельной работы ДСП и ПЧ-АВ.

Таким образом, решение проблемы повышения эффективности функционирования электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью является актуальным как для действующих компактных металлургических предприятий России (ПАО ММК, ПАО Северсталь, АО Сортовой завод Балаково) и зарубежья (ЗАО ММК Metalurji). Решение вопросов параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов позволит значительно сократить риски возникновения аварийных режимов работы внутризаводских сетей и тем самым сократить вероятность возникновения связанных с ними экономических потерь.

Степень разработанности. Исследования режимов работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения питающей сети, а также влияние работы АВ на питающую сеть отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых: А.А. Николаева, Г.П. Корнилова, Цзин Тао, Сычева Ю.А., Брованова С.В., Буланова М.В., Гилемова И.Г., Афанасьева М.Ю., Ивекеева В.С., А.С. Маклакова, М.А. Р.Т. Шрейнера, J. Rodriguez, H. Abu-Rub, I.L. Jose, B. W., D.G. Holmes, J. Holtz, B. Wu, Dehong Xu, Yangfan Zhang и других.

Большинство работ, направленных на исследование режимов работы ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения, посвящено усовершенствованию системы управления АВ за счет введения предмодулирующих сигналов по напряжению обратной последовательности, третьей гармоники, напряжению сети ориентированной по вектору напряжения обратной последовательности. А также использованию динамического компенсатора искажения напряжения (на примере СТАТКОМ).

Результаты экспериментальных исследований параллельной работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и электроприемников с резкопеременным характером нагрузки изучены крайне слабо. Это связано с трудностями их проведения на действующем оборудовании.

Необходимо отметить, что внедрение предлагаемых авторами модернизированных систем управления АВ с адаптацией к несимметрии напряжения сети затруднительно из-за закрытой структуры программного кода системы управления преобразователями частоты. Установка динамических компенсаторов напряжения сопровождается значительными экономическими вложениями.

В связи с этим вопрос возможности параллельной работы электросталеплавильного комплекса и электроприводов на базе ПЧ-АВ заслуживает детального рассмотрения в рамках отдельной исследовательской работы.

Объектом исследования является электротехнический комплекс «система электроснабжения промышленного предприятия- мощные электроприводы клетей стана горячей прокатки «1750» на базе ПЧ-АВ- ДСП-250 со статическим тиристорным компенсатором реактивной мощности.

Предметом исследования является система управления активных выпрямителей в составе ПЧ-АВ мощных электроприводов клетей прокатного стана.

Целью диссертационной работы является повышение устойчивости электроприводов прокатного стана на базе ПЧ-АВ при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью в условиях наличия колебаний и провалов напряжения, создаваемых работой ДСП и внешними возмущающими воздействиями со стороны электроэнергетической системы.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Экспериментальный и теоретический анализ влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ в составе электроприводов клетей стана горячей прокатки «1750» ЗАО «ММК Metalurji», г.Дёртйол, Турция, при внешних провалах напряжения и параллельной работе с ДСП.

2. Разработка усовершенствованной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» для проведения исследований влияния

несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ при параллельной работе с ДСП.

3. Проведение теоретических исследований возможности параллельной работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и ДСП. Проведение оценки устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу, а также при включении ФКЦ в составе СТК.

4. Разработка усовершенствованной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ, обеспечивающей необходимую устойчивость при возмущениях, вызванных работой электросталеплавильного комплекса, с дополнительными контурами регулирования тока по реактивной составляющей, а также с отдельным регулированием ортогональных составляющих токов по прямой и обратной последовательностям.

5. Теоретическая оценка эффективности разработанной системы управления АВ для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора, а также при включении ФКЦ. Оценка результирующего эффекта повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при совместном использовании СТК и разработанной системы управления АВ.

Решение поставленных задач выполнялось на базе электроприводов стана горячей прокатки «1750», функционирующего на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji», г. Дёртйол, Турция.

В первой главе рассмотрены существующие способы снижения негативного влияния несимметрии питающего напряжения на работу преобразователей частоты с активными выпрямителями. Большинство способов повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения сети основаны на усовершенствовании системы управления АВ путем введения предмодулирующего сигнала по напряжению обратной последовательности, напряжению третьей гармоники и сетевому напряжению, ориентированному по вектору напряжения обратной последовательности. Реализация предлагаемых способов затруднительна ввиду закрытого кода системы управления производителями преобразователей частоты. Рассмотрен способ повышения устойчивости ПЧ-АВ за счет

перевода АВ при возникновении несимметрии в диодный режим работы, в момент возникновения несимметрии напряжения система управления АВ снимает импульсы управления с транзисторов/тиристоров, и напряжение в звене постоянного тока не контролируется. Способ позволяет избежать возникновения колебаний напряжения в звене постоянного тока, увеличения токов, потребляемых АВ в момент возникновения провала напряжения. Необходимо отметить, что после восстановления напряжения сети и переходе АВ в нормальный режим работы возникает бросок тока, действующее значение которого больше значения уставки срабатывания защиты.

Рассмотрен способ, предложенный в [21], о компенсации провалов напряжения во внутриводской сети за счет резервов реактивной мощности СТК, функционирующего в составе электросталеплавильного комплекса. Для реализации предложенного способа необходимо объединить на параллельную работу секции шин 34,5 кВ, от которых подключены электросталеплавильный комплекс и главные электроприводы СГП «1750». Исследований возможности параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП в настоящее время не проводились, в связи с этим необходимо проведение детальных исследований возможности параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований режимов работы дуговой сталеплавильной печи, переходные процессы токов и напряжения сети при включении печного трансформатора на холостом ходу, включение фильтрокомпенсирующих цепей СТК. А также проведен анализ переходных процессов токов, потребляемых преобразователем частоты с активным выпрямителем, и напряжения в звене постоянного тока при несимметрии питающего напряжения.

Для проведения исследований влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ была проведена настройка программного обеспечения Drive Window на запись переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока. За время проведения исследований удалось получить переходные процессы, протекающие в АВ при возникновении од-

нофазного провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 13%. Анализ экспериментальных данных показал, что несимметрия напряжения питающей сети приводит к значительному увеличению токов, потребляемых АВ, и их несимметрии. В токах появляется обратная последовательность, которая приводит к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока. При большей глубине провала напряжения АВ будет отключен внутренними защитами преобразователя частоты.

В третьей главе разработана имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ». Имитационная модель отличается от известных тем, что позволяет проводить исследования влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, проводить исследования при компенсации провалов напряжения во внутриваровской сети за счет резервов реактивной мощности СТК, при объединении на параллельную работу прокатного и электросталеплавильного комплексов. Проводить теоретические исследования параллельной работы ДСП и ПЧ-АВ, при включении ПТ на холостом ходу и при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК.

Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» представлена: моделью питающей сети 380 кВ; моделью главного электропривода СГП «1750», выполненной на базе ПЧ-АВ; моделью ДСП, моделью ФКЦ и ТРГ СТК 330 МВАр. При моделировании ДСП-250 были учтены печной реактор, печной трансформатор, короткая сеть и электрическая дуга. Электрическая дуга в модели замоделирована по методу Тельного, в виде двух встречно включенных управляемых источников ЭДС. Управляющие сигналы для источников ЭДС рассчитываются на основании, восстановленных массивов мгновенных значений токов, потребляемых ДСП-250, полученных при проведении экспериментальных исследований.

В четвертой главе диссертационной работы были проведены теоретические исследования влияния однофазного провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% на работу ПЧ-АВ. Исследования показали, что при возникновении однофазного провала напряжения глубиной 30% в сети 380 кВ возникает увеличение то-

ков, потребляемых АВ. В звене постоянного тока увеличивается размах колебаний напряжения, значение которого превышает предельно допустимое значение. Преобразователь частоты будет отключен защитой по напряжению в звене постоянного тока либо тепловой защитой АВ. Проведены теоретические исследования работы ПЧ-АВ при демпфировании провалов напряжения во внутривзаводской сети 34,5 кВ с помощью СТК. Анализ переходных процессов показал, что при использовании СТК для компенсации провалов напряжения сохраняется устойчивая работа АВ.

Представлены результаты теоретических исследований возможности параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП. Оценку возможности параллельной работы проводили для наиболее худших режимов работы электросталеплавильного комплекса: при работе ДСП на начальной стадии плавки; при включении ПТ на холостом ходу; при включении ФКЦ СТК. Анализ результатов моделирования показал, что несимметрия напряжения, вызванная работой ДСП, приводит к увеличению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока до 320 В при предельно допустимом значении 500 В. А также возникает несимметрия токов, которая не превышает предельно допустимых значений. Ухудшение переходных процессов, протекающих в АВ наблюдается при включении ПТ на холостом ходу, при включении ФКЦ СТК. В связи с этим необходимо разработать технические мероприятия направленные на сохранение устойчивой работы ПЧ-АВ при параллельной работе с ДСП.

В пятой главе разработана усовершенствованная система управления АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения сети. В существующую систему управления АВ добавлен блок диагностики напряжения сети, в котором происходит сравнение напряжения сети и напряжения на входе АВ, сигнал рассогласования обрабатывается дополнительным пропорционально-интегральным регулятором на выходе которого формируется ток задания по реактивной составляющей на потребление/генерацию реактивной мощности. А также для снижения негативного влияния составляющей обратной последовательности в разработанной системе управления предусмотрен дополнительный контур регу-

лирования токов по ортогональным составляющим токов прямой и обратной последовательностей.

Оценка эффективности разработанной системы управления была проведена для режимов работы АВ при включении ПТ на холостом ходу и при включении ФКЦ СТК. Анализ переходных процессов, протекающих в АВ, показал, что за счет применения усовершенствованной системы управления сохраняется устойчивая работа ПЧ-АВ.

Были проведены теоретические исследования применения разработанной системы управления АВ при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 30%. Результаты исследований показали, что применение усовершенствованной системы управления позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ при однофазном провале напряжения глубиной до 30%. Необходимо отметить, что при большей глубине провала напряжения значение коэффициента модуляции превысит предельно допустимые значения, будет потеряна управляемость АВ.

В связи с этим была проведена оценка результирующего эффекта при совместном использовании СТК и разработанной системы управления АВ при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50%. Проведенные исследования показали, что при совместном использовании СТК и разработанной системы управления АВ сохраняется устойчивая работа ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения глубиной до 50%. Таким образом, совместное использование СТК и разработанной системы управления АВ позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ при 90% всех провалов напряжений, возникающих во внутри-заводской сети.

В заключении приведены основные выводы по результатам, полученным в ходе выполнения диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана усовершенствованная имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», отличающаяся от известных тем, что позволяет проводить теоретические исследования влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, исследования возможности параллельной рабо-

ты ДСП и группы электроприводов СГП «1750» на базе ПЧ-АВ, проводить исследования влияния коммутационных процессов при включении ПТ на холостом ходу, при включении ФКЦ СТК.

2. Результаты теоретических исследований возможности параллельной работы главных электроприводов клеток СГП на базе ПЧ-АВ с электросталеплавильным комплексом.

3. Разработана усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ, отличающаяся от известных тем, что для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при возмущениях напряжения питающей сети реализован внешний контур регулирования сетевого тока по реактивной составляющей и дополнительный контур регулирования ортогональных составляющих тока обратной последовательности.

4. Результаты исследований эффективности усовершенствованной системы управления АВ, доказывающие наличие технического эффекта по повышению устойчивости ПЧ-АВ при внешних провалах напряжения, параллельной работе с ДСП, коммутационных перенапряжениях и отклонениях напряжения, вызванных включением ФКЦ СТК и печного трансформатора на холостом ходу.

Практическая ценность и реализация работы заключается в том, что разработанная система управления АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения питающей сети позволяет обеспечить устойчивую работу ПЧ-АВ при параллельной работе с мощной ДСП. Совместное использование СТК и ПЧ-АВ с усовершенствованной системой управления позволяет сохранить устойчивую работу электроприводов прокатного стана при провалах напряжения в сети глубиной до 50%. На примере металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji», г.Дёртйол, Турция технический эффект от внедрения разработанной системы управления АВ и совместного использования вместе с СТК заключается в уменьшении количества простоев СГП «1750», вызванных провалами напряжения в сети. Вероятность сохранения устойчивой работы главных электроприводов СГП «1750», при возникновении провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ составляет 90%.

Разработанная усовершенствованная система управления АВ рекомендуется к внедрению на аналогичных металлургических предприятиях, включающих в свой состав мощные ДСП, электроприводы прокатных станов, питающихся от одной главной понизительной подстанции.

Методика проведения исследований. Работа основана на применении положений теории автоматического управления, методов теории электрических цепей, положений теории электрических машин, а также методов математического моделирования в среде Matlab (Simulink). Экспериментальные данные для исследований получены на действующем металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» (г. Дёртиол, Турция), имеющем в своем составе ДСП-250 (300 МВА), АПК (53 МВА) и стан горячей прокатки 1750 с электроприводами суммарной мощностью 50,4 МВт.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», для проведения теоретических исследований влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, возможности параллельной работы ДСП и группы электроприводов СГП «1750» на базе ПЧ-АВ, влияния коммутационных процессов, возникающих при включении ПТ на холостом ходу, а также при включении ФКЦ СТК.

2. Результаты теоретических исследований, доказывающие возможность параллельной работы главных электроприводов клеток СГП на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильного комплекса на базе сверхмощной ДСП-250 со статическим тиристорным компенсатором.

3. Усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ с внешним контуром регулирования тока по реактивной составляющей и контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности, обеспечивающая устойчивость при сильных отклонениях напряжения питающей сети.

4. Результаты исследований эффективности усовершенствованной системы управления АВ по повышению устойчивости работы ПЧ-АВ при внешних

провалах напряжения, параллельной работе с ДСП, коммутационных перенапряжениях и отклонениях напряжения, вызванных включением ФКЦ СТК и печного трансформатора на холостом ходу.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается 1) правомерностью исходных положений и предпосылок; 2) корректным использованием математических и имитационных методов моделирования на ЭВМ; 3) соответствием полученных в работе результатов представленным в научных трудах по схожей тематике других авторов; 4) результатами экспериментальных исследований, полученных на действующем производстве – в электротехническом комплексе ЗАО «ММК Metalurji» на главных электроприводах стана горячей прокатки «1750» и электросталеплавильном комплексе.

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 6 международных конференциях, в том числе: 2021 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2021); 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнито-

горск, оз. Банное, 2020); 2019 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI) (г. Магнитогорск, оз. Банное, 2019); 2015 73 Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г.Магнитогорск, 2015); 2017 75 Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г.Магнитогорск, 2017); 2019 77 Международной научно-технической конференций «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г.Магнитогорск, 2019).

В 2023-2024 гг. исследования выполнялись в рамках государственного задания (научный проект №FZRU-2023-0008) по теме «Разработка фундаментальных основ и научно обоснованных технических решений для повышения ресурсо- и энергоэффективности электротехнических и технологических систем предприятий горно-металлургического комплекса России».

Публикации. По содержанию диссертации опубликовано **9** научных трудов, в том числе **3** статьи в изданиях, входящих в перечень рекомендованных ВАК РФ, **3** статьи в изданиях, индексируемых Scopus, получен **1** патент на изобретение, получено **2** свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором разработана усовершенствованная имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», позволяющая проводить исследования влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ, возможности совместной работы ДСП и группы электроприводов СГП «1750», влияния коммутационных процессов, возникающих при включении ПТ на холостом ходу, а также при включении ФКЦ СТК. Получены результаты исследований, доказывающие возможность параллельной работы главных электроприводов прокатного стана и ДСП. Разработана усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ с внешним контуром регулирования тока по реактивной составляющей и контуром регулирования ортогональных составляющих токов обратной последовательности, обеспечивающая устойчивость при сильных отклонениях напряжения питающей сети, доказана эффективность применения усовершенствованной СУ АВ при внешних возмущениях напряжения питающей сети и при параллельной работе с ДСП.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ С АКТИВНЫМИ ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящее время электроприводы переменного тока выполняются на базе высоковольтных электродвигателей переменного тока и преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) и автономными инверторами напряжения (АИН). Применение ПЧ-АВ обусловлено рядом преимуществ по сравнению с преобразователями частоты с диодными выпрямителями: возможность рекуперации энергии в сеть без применения дополнительных блоков рекуперации; работа с коэффициентом мощности равным 1; лучшие показатели электромагнитной совместимости, лучший гармонический состав токов и напряжения на входе АВ. Активный выпрямитель имеет полностью идентичную схему, что и АИН и выполнен на полностью управляемых ключах (IGCT-тиристорах или IGBT-транзисторах). Управление ключами АВ происходит методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) [1-15]. Анализ существующих конфигурации силовых схем электроприводов прокатных станов

В настоящее время мощные электроприводы в металлургической промышленности выполняются на базе многоуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями и автономными инверторами напряжения. Применение многоуровневых АВ (5-, 7-, 9-уровневые и т.д.) позволяет формировать напряжение на входе АВ, приближенное к синусоидальному, что способствует улучшению электромагнитной совместимости в точке подключения ПЧ. Однако системы управления таких ПЧ имеют более сложную структуру, а также усложняется силовая схема, что приводит к значительному увеличению стоимости преобразователя частоты. В связи с этим большинство мощных электроприводов выполняется на базе 3-уровневых ПЧ-АВ.

На рисунке 1.1. показана упрощенная принципиальная схема 3-уровневого ПЧ-АВ. Активный выпрямитель выполнен на полностью управляемых полупроводниковых ключах, как правило используют запираемые тири-

сторы с изолированным затвором (*IGCT*- тиристоры), или биполярные транзисторы (*IGBT*- транзисторы). Каждая фаза АВ состоит из 4 тиристоров (T_1 - T_{12}) с параллельно им подключенными диодам (D_1 - D_4 , D_7 - D_{10} , D_{13} - D_{16}) и соединительными диодами (D_5 - D_6 , D_{11} - D_{12} , D_{17} - D_{18}). Соединительные диоды предназначены для подключения фазы к нулевой точке ПЧ, что позволяет сформировать три уровня напряжения на входе АВ. Автономный инвертор напряжения, как было сказано выше, имеет такую же силовую схему. Звено постоянного тока 3-уровневого ПЧ представлено в виде двух эквивалентных конденсаторов, включенных последовательно (C_1 , C_2). Точка между конденсаторами образует нулевой потенциал ПЧ, к которой подключены соединительные диоды [6-16].

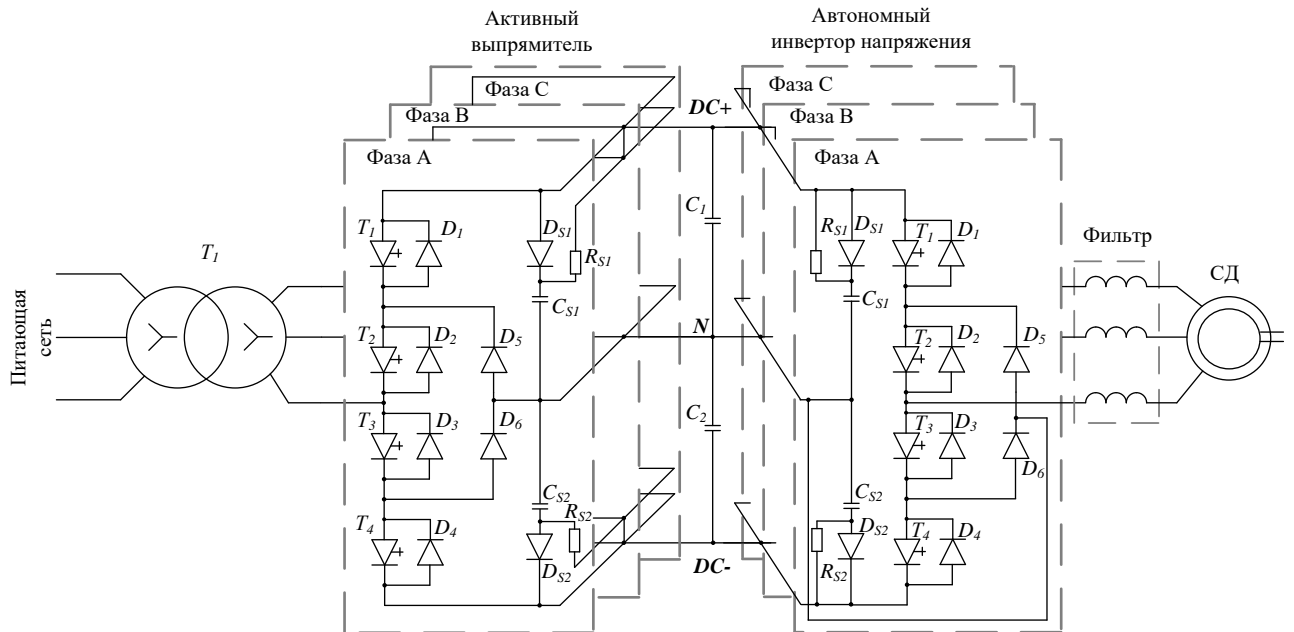


Рисунок 1.1- Упрощенная силовая схема 3-уровневого ПЧ-АВ

Принцип действия трехуровневого АВ рассмотрим на примере фазы А (рисунок 1.2). Напряжение на входе АВ формируется в виде прямоугольных импульсов положительной и отрицательной полярности. Формирование напряжения происходит следующим образом. В первый интервал времени, для того чтобы получить на выходе 0, включаются тиристоры T_2 и T_3 . В зависимости от направления тока в нагрузке L будут работать диод D_5 и тиристор T_3 . Во второй период времени закрывается тиристор T_3 и открывается тиристор T_1 , таким об-

разом, на выходе получается напряжение $+U_{DC}/2$. В третий период времени тиристор T_3 открывается, а тиристор T_1 закрывается. В четвертый, пятый, шестой и седьмой периоды времени переключения происходят аналогичным образом. В восьмой период времени закрывается тиристор T_2 и открывается тиристор T_4 , и на входе получается напряжение $-U_{DC}/2$. Все остальные переключения происходят аналогично [17].

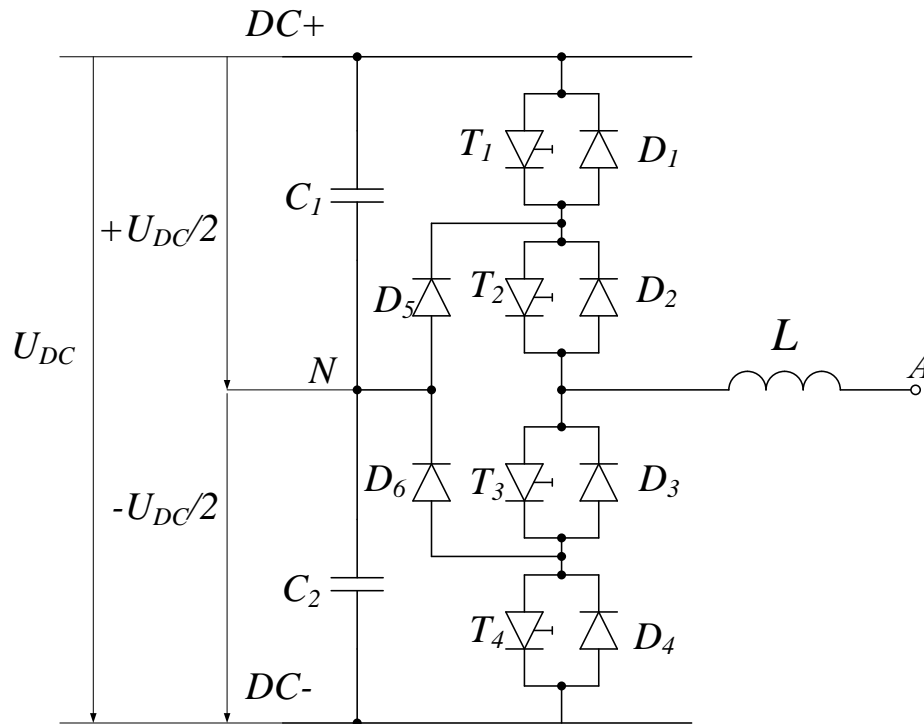


Рисунок 1.2- Фазный модуль 3-уровневого АВ

Таким образом, из четырех ключей в каждом плече моста одновременно могут быть включены только два, которые присоединяют звено постоянного тока к нагрузке в трех точках «+», 0, «-». Эти соединения образуют три возможных состояния в каждом плече моста: P - подключение к положительному полюсу звена постоянного тока, O - подключение к нейтральному полюсу звена постоянного тока, N - подключение к отрицательному полюсу звена постоянного тока. Во внимание принимаем все возможные состояния относительно трех фаз трехуровневого преобразователя, получаем 27 комбинаций [12].

Электроприводы на базе 3-уровневых ПЧ-АВ могут быть реализованы с различными схемами выпрямления. Для электроприводов небольшой мощности используется 6-ти пульсная схема выпрямления (рисунок 1.3, а), в которой

используется один двухобмоточный согласующий трансформатор. Первичная обмотка подключается к сети 6-35 кВ цеховой подстанции. Вторичная обмотка подключается к АВ. Обмотки трансформатора имеют нулевой угол сдвига между вторичным и первичным напряжением и соединяются по схеме Y/Y или Δ/Δ . Электродвигатель подключен к АИН через сглаживающий фильтр. В гармоническом составе тока, потребляемого ПЧ, присутствуют гармоники порядка $6 \cdot n \pm 1$, где $n = 1, 2, 3, \dots$.

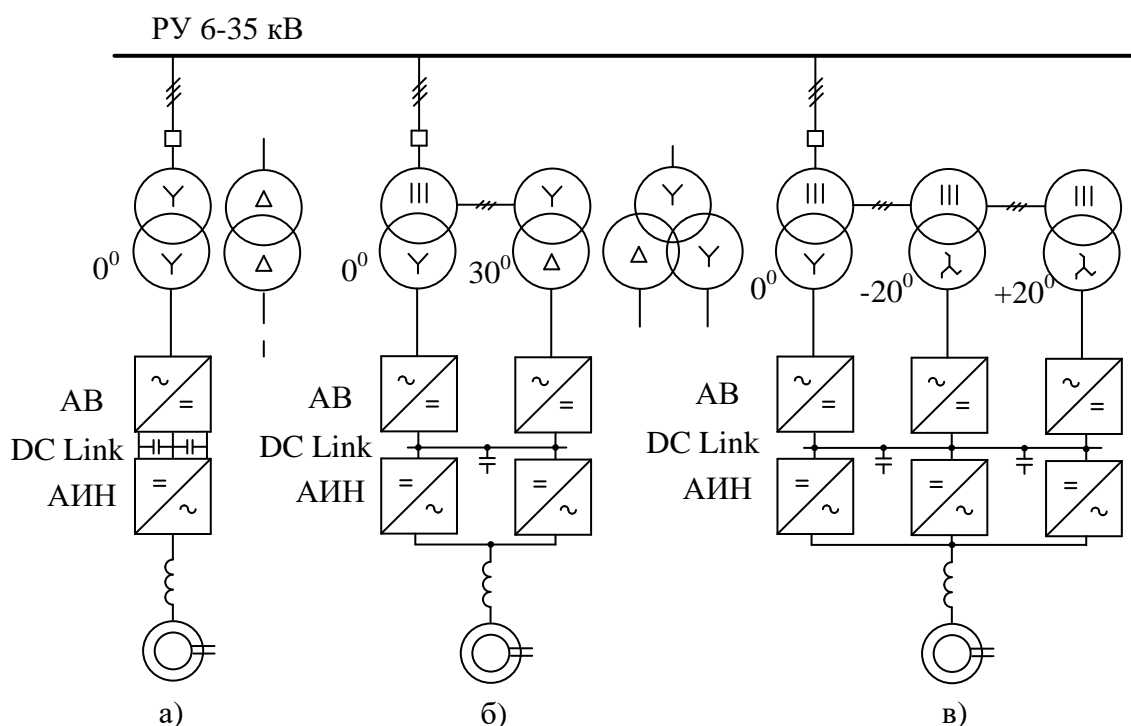


Рисунок 1.3- Силовые схемы электроприводов на базе 3-уровневых ПЧ-АВ: а) 6-пульсная схема; б) 12-пульсная схема; в) 18-пульсная схема

Электроприводы большой мощности выполняют по 12- и 18- пульсной схемам выпрямления (рисунок 1.3 б, в). Для реализации 12-пульсной схемы выпрямления необходимо чтобы между векторами напряжений на вторичной стороне трансформаторов присутствовал угол сдвига равный 30 градусам. Для этого используют два трансформатора, первичные обмотки которых соединены последовательно, а вторичные обмотки первого трансформатора включены по схеме «звезда», второго по схеме «треугольник». Двенадцатипульсную схему выпрямления возможно реализовать используя один трансформатор с расщепленной обмоткой. При использовании 12-пульсной схемы выпрямления в гар-

моническом спектре тока присутствуют гармоники порядка $12 \cdot n \pm 1$, что значительно снижает негативное влияние высших гармоник на качество электроэнергии в точке подключения АВ.

Для реализации 18-пульсной схемы выпрямления используют три трансформатора, с углом сдвига между векторами вторичных напряжений $-20, 0, +20$ градусов. Гармонический состав тока будет содержать только гармоники порядка $18 \cdot n \pm 1$.

1.1 Анализ способов повышения надежности работы ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения

Как было сказано выше, современные электроприводы переменного тока большой мощности выполняются на базе высоковольтных трехуровневых ПЧ-АВ. Активный выпрямитель подключен к сети переменного тока и преобразует напряжение переменного тока в стабильное выпрямленное в звене постоянного тока преобразователя частоты. Опыт эксплуатации ПЧ-АВ показал, что системы управления активных выпрямителей неадаптированы к несимметрии напряжения питающей сети. Несимметричные провалы напряжения, возникающие в питающей сети, вследствие удаленных коротких замыканий, приводят к аварийным отключениям ПЧ-АВ [5-15]. Отключение ПЧ связано с появлением в токе, потребляемом АВ, токов обратной последовательности, которые при однофазном провале напряжения примерно равны токам прямой последовательности. Фильтры низких частот, установленные в цепях обратной связи сетевых токов, не рассчитаны на токи обратной последовательности. В связи с этим в контурах регулирования токов возникают колебания двойной частоты, которые вызывают колебания в напряжении в звене постоянного тока.

Отключения ПЧ-АВ приводят к значительному экономическому ущербу, вследствие недовыпуска готовой продукции. Отключение ПЧ-АВ происходит в связи со снижением уровня напряжения в звене постоянного тока до критического значения, а также вследствие броска тока при восстановлении напряжения питающей сети (рисунок 1.4).

Вопросу повышения надежности работы ПЧ-АВ при провалах напряжения посвящено множество работ как отечественных, так и зарубежных авторов и предложено несколько способов обеспечения устойчивой работы ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения [2,3].

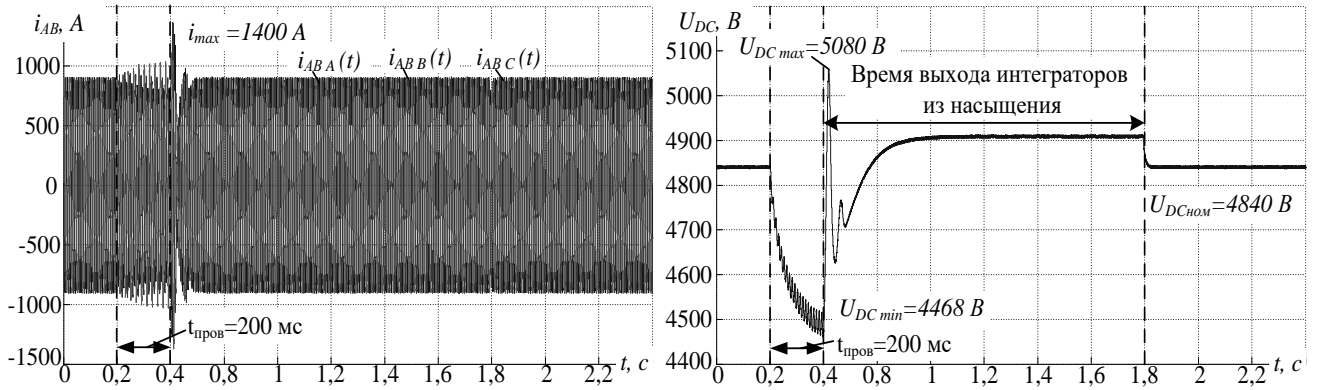


Рисунок 1.4 – Мгновенные значения токов, потребляемых активными выпрямителями, и напряжение в звене постоянного тока при возникновении провала напряжения в питающей сети

1.1.1 Система управления АВ с предупреждением по напряжению обратной последовательности

Одним из способов повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения питающей сети- это система управления АВ с предупреждением по напряжению обратной последовательности. В ней трехфазная система напряжений преобразуется в двухфазную $\alpha\beta$, с помощью преобразования Кларка. При возникновении несимметрии питающей сети напряжения U_α и U_β перестают быть ортогональными, и их представляют как сумму напряжений прямой и обратной последовательностей. Для выделения обратной последовательности вводят задержку на четверть периода. Напряжение обратной последовательности используется в качестве корректирующего сигнала. За счет его введения удается снизить величину токов обратной последовательности на входе АВ[16-25]. Недостатком системы управления АВ с введением корректирующего сигнала по обратной последовательности является выход коэффициента модуляции за границы рабочего диапазона, с последующим выходом регуляторов тока в насыщение и потерей управления АВ. В связи с введенной задержкой

для выделения напряжения обратной последовательности возникает рассогласование между фактическим и сформированным системой управления АВ сигналом напряжения обратной последовательности. Различие становится более заметным из-за использования в системе управления АВ фильтра высших гармоник, который необходим для исключения ложных срабатываний ШИМ модулятора и перегрузки ключей АВ по току. На рисунке 1.5 представлена упрощенная система управления АВ с предупредлением по напряжению обратной последовательности.

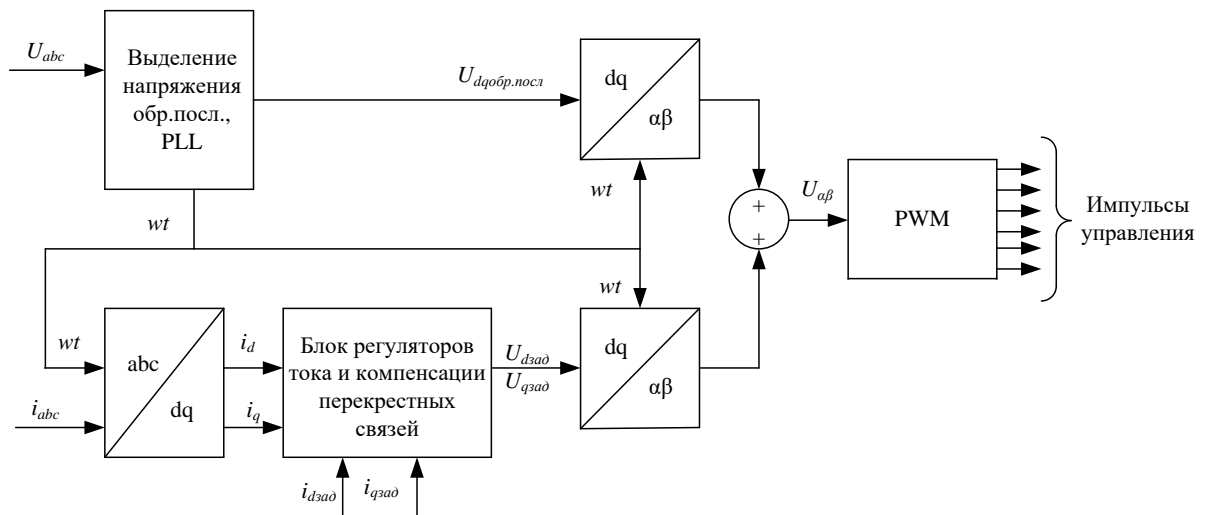


Рисунок 1.5- Упрощенная схема системы управления АВ с предупредлением по напряжению обратной последовательности

В момент возникновения несимметрии напряжения питающей сети происходит бросок тока, амплитуда которого в 2 раза выше амплитуды тока при работе в нормальном режиме. Это может привести к отключению ПЧ токовой защитой (рисунок 1.6). В связи с этим способ обеспечения устойчивой работы с предупредлением по обратной последовательности не обеспечивает устойчивую работу высоковольтных ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения.

1.1.2 Система управления АВ с предупредлением по напряжениям обратной и нулевой последовательностей

Использование системы управления ключами АВ с предупредлением по напряжению обратной и нулевой последовательностей в момент возникновения

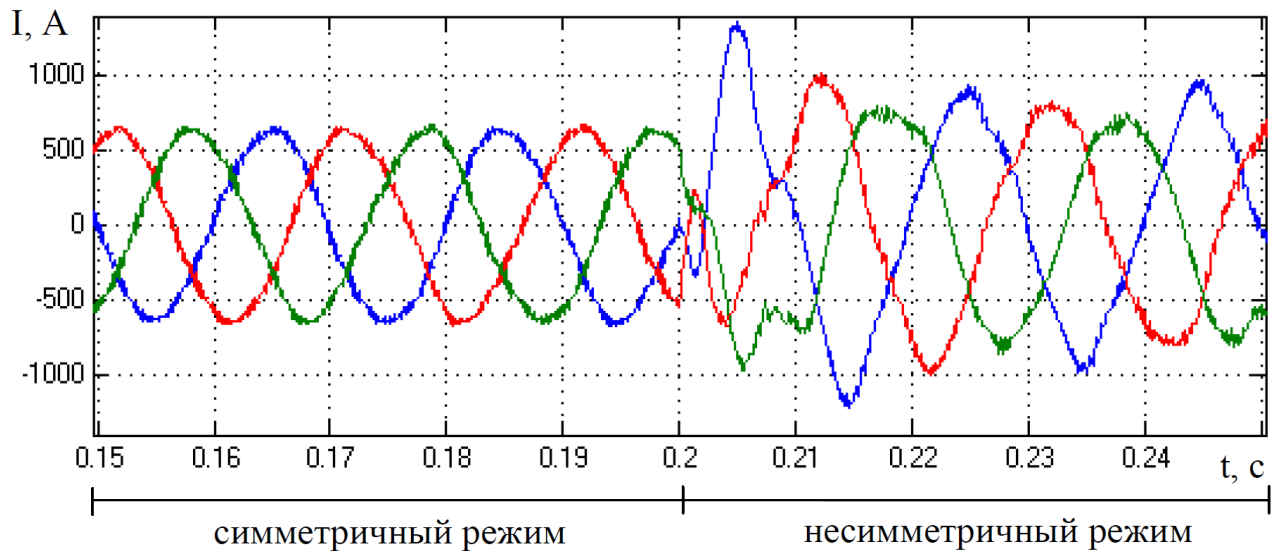


Рисунок 1.6- Мгновенные значения тока, потребляемого АВ при использовании метода с предупреждением по напряжению обратной последовательности несимметрии напряжения в питающей сети. В момент возникновения провала напряжения в питающей сети [10] помимо вводимого корректирующего сигнала обратной последовательности в систему управления АВ добавляется напряжение нулевой последовательности, данный сигнал одинаков для всех трех фаз. Для реализации данного способа нужно выполнять расчет оптимальных значений коэффициентов модуляции для различной глубины и характера провалов напряжения. Из-за введения нулевой последовательности в сигнал управления, напряжения на входе АВ формируются с углом сдвига отличным от 120 градусов, в связи с этим в токе, потребляемом АВ, появляются нечетные гармоники, на которые не рассчитаны фильтры в контуре регулирования токов. Поэтому наблюдается множество ложных срабатываний ключей АВ, которые на реальном ПЧ могут привести к его выходу из строя. Вторым недостатком является сложность реализации системы идентификации провала напряжения по измеряемым параметрам питающего напряжения (так как система должна обладать необходимым быстродействием) в рамках существующей системы управления АВ (рисунок 1.7).

1.1.3 Система управления АВ с использованием метода кинетического буферирования

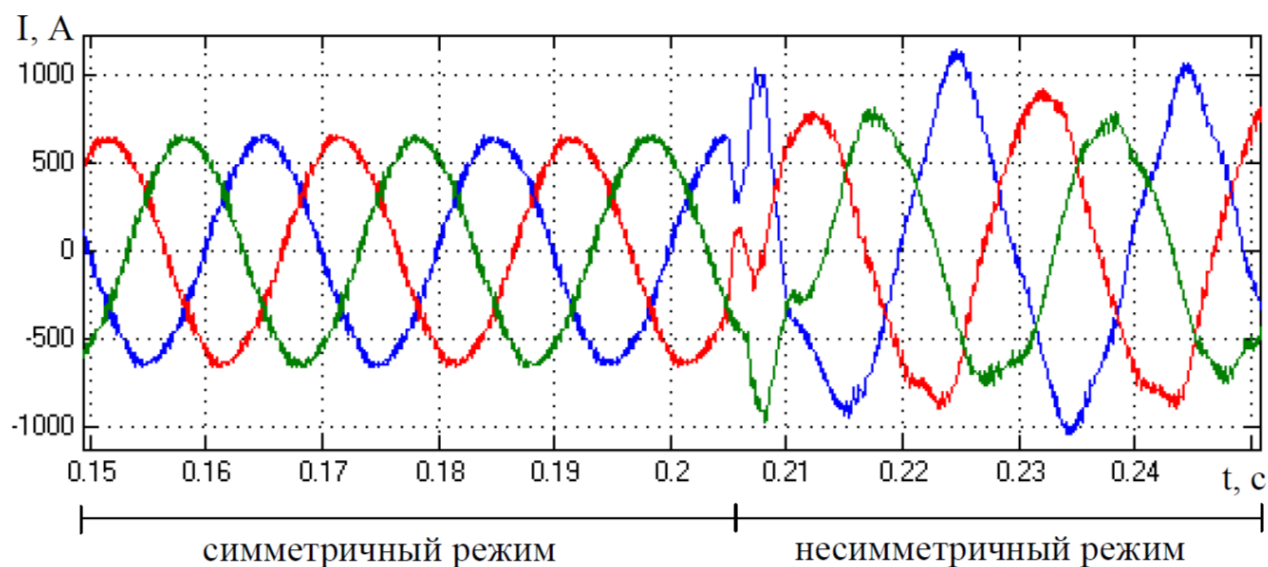


Рисунок 1.7- Мгновенные значения тока, потребляемого АВ при использовании метода с предупредлением по напряжению обратной и нулевой последовательностей

В преобразователях частоты фирмы Siemens серии Sinamics S120 и G120, в системе управления АВ реализована функция кинетического буферирования, принцип которой заключается в поддержании напряжения в звене постоянного тока преобразователя частоты при провалах напряжения в питающей сети за счет кратковременного перевода двигателя в режим торможения с заданным темпом. За счет этого достигаются уменьшение отклонения напряжения в звене постоянного тока и снижение броска тока на входе АВ ниже уставок защиты при восстановлении напряжения питающей сети. Команда на поддержание напряжения в звене постоянного тока (команда на активацию режима кинетического буферирования) появляется при достижении некоторого минимального значения напряжения в звене постоянного тока. В ПЧ-АВ других фирм производителей подобная функция может быть реализована искусственным образом с помощью доступных функциональных блоков систем управления активным выпрямителем и инвертором.

Для демонстрации эффективности работы алгоритма кинетического буферирования на разработанной математической модели ПЧ-АВ ACS6000 от АВВ в системе прямого управления моментом (Direct Torque Control) была реа-

лизована функция изменения задания на скорость двигателя в периоды возникновения и исчезновения провала напряжения (рисунок 1.8).

Подобная работа была проведена на главных электроприводах листового стана холодной прокатки ЛПЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», где на базе ПЧ-АВ серии *ACS6000* фирмы *ABB* были реализованы алгоритмы кинетического буферирования, что позволило сократить число аварийных отключений при провалах напряжения.

В момент возникновения провала напряжения в системе управления инвертором формируется сигнал на снижение электромагнитного момента синхронного двигателя, при этом СД продолжает работать в двигательном режиме с замедлением скорости под действием активного момента прокатки. Тем самым уменьшается нагрузка АВ со стороны звена постоянного тока, и провал напряжения в меньшей степени влияет на отклонение напряжения U_{DC} , а также на несимметрию и броски тока на входе активного выпрямителя [20]. В данном случае необходимо реализовать функции быстродействующей диагностики провала напряжения и формирования отрицательного сигнала задания на момент двигателя для его перевода в режим торможения. Однако необходимо отметить, что данный способ повышения устойчивости работы ПЧ-АВ может быть использован для провалов напряжения глубиной не превышающей 30% и длительностью не более 300 мс.

1.1.4 Система управления АВ с переводом работы АВ в диодной режим работы при возникновении провалов напряжения

В преобразователях частоты производства фирмы *ABB* серии *ACS 6000* в системе управления активного выпрямителя реализован алгоритм перехода в пассивный (диодный) режим работы. При возникновении несимметрии напряжения в питающем напряжении появляется обратная последовательность, которая диагностируется системой управления АВ и снимает импульсы управления тиристорами. Снятие импульсов управления тиристорами приводит к снижению амплитуды токов до двукратного значения, а также к снижению напряжения в звене постоянного тока.

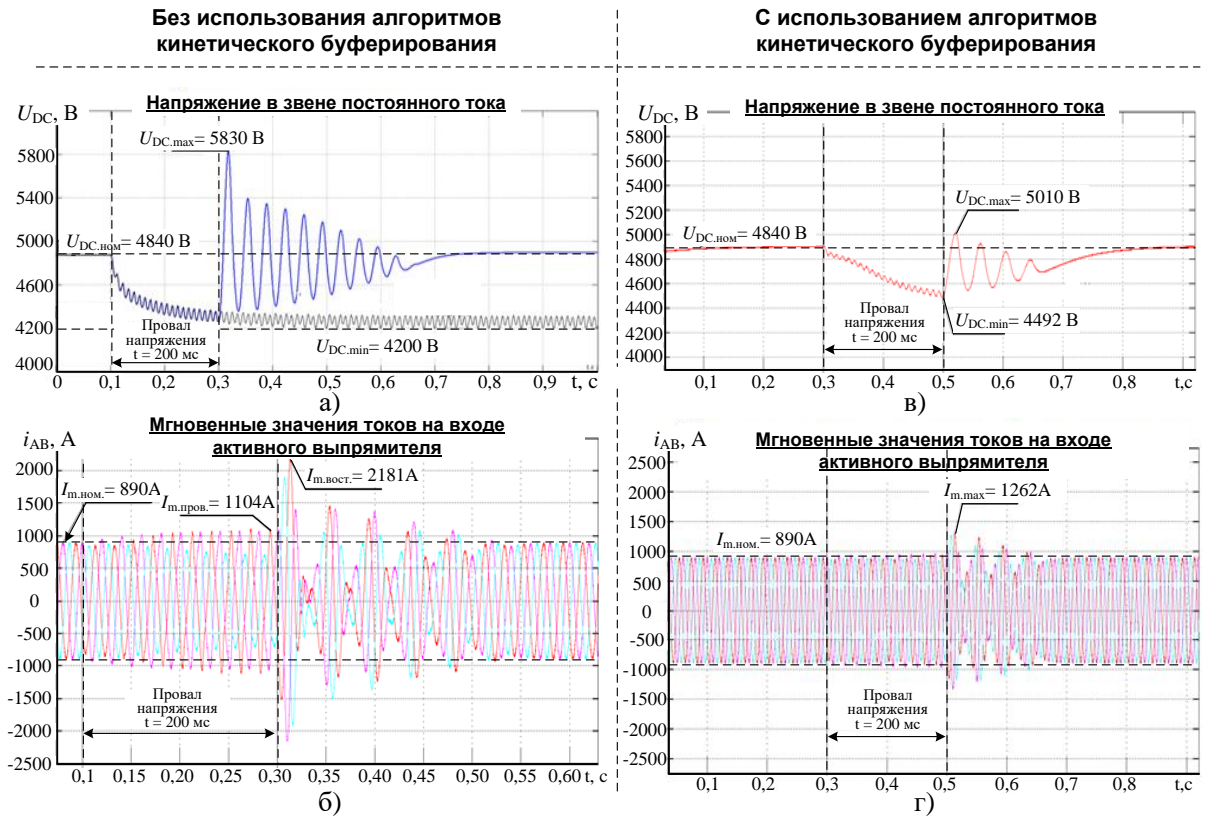


Рисунок 1.8 – Переходные процессы напряжений и токов в звене постоянного тока и на входе активного выпрямителя при возникновении провала напряжения с глубиной $\delta U = 30\%$ и временем $t_{\text{пров.}} = 200 \text{ мс}$, а, б – без использования кинетического буферирования; в, г – с использованием кинетического буферирования

В связи с этим возникновение в питающей сети однофазного провала напряжения глубиной 30 % приводит к снижению напряжения в звене постоянного тока до 30% от заданного, что является основной причиной срабатывания токовой защиты АВ при восстановлении напряжения питающей сети [5].

Помимо способов повышения надежности работы АВ при несимметрии напряжения за счет усовершенствования системы управления существует организационные мероприятия по обеспечению надежной работы ПЧ-АВ, такие как: 1) использование автономных источников питания для силовых преобразователей, функционирующих в режиме раздельной работы с сетью; в качестве таких источников могут выступать заводские газотурбинные электростанции, как это реализовано на предприятии ЗАО «ММК Metalurji»; 2) деление замкну-

тых сетей 110 кВ внутризаводского электроснабжения на независимые контуры, связь между которыми сохраняется на напряжении 220 и 500 кВ внешней энергосистемы, в результате чего возможно снизить влияние провалов напряжения в сети 110 кВ на отдельные мощные электроприемники.

Необходимо отметить, что приведенные выше способы не являются универсальными, поскольку в случае внешних провалов напряжения, возникающих в магистральных сетях 220 кВ и выше, провалы напряжения воздействуют на всю систему внутризаводского электроснабжения промышленного предприятия, а не на отдельные локальные ее участки. Использование автономного питания группы электроприводов прокатного стана от собственной заводской электростанции является сложно реализуемым вариантом из-за высокой суммарной мощности преобразователей (около 60 МВт). В рамках современных мини-заводов с производительностью до 2,5 млн. тонн стали в год и не имеющих полного металлургического цикла данное решение не является экономически целесообразным. К такому типу предприятий относится исследуемый завод ЗАО «ММК Metalurji».

Следует отметить, что способы повышения надежности работы электроприводов прокатного стана за счет применения специальных алгоритмов управления ПЧ-АВ не всегда могут быть реализованы на действующих электроприводах из-за закрытой структуры систем управления силовых преобразователей. Не все фирмы-производители ПЧ-АВ обеспечивают возможность использования дополнительных функциональных блоков системы, на основе которых можно реализовать вышеописанные алгоритмы управления активным выпрямителем и инвертором. Также необходимо отметить, что под воздействие провалов напряжения попадают не только мощные электроприводы клетей, но и ответственные вспомогательные механизмы прокатного стана, силовые преобразователи которых могут не иметь встроенной защиты от несимметрии питающего напряжения. По этой причине в работе [21] было предложено использовать резервы реактивной мощности статического тиристорного компенсатора реактивной мощности (СТК), для этого необходимо объединить на параллель-

ную работу электросталеплавильный и прокатный комплексы (рисунок 1.9). Как правило, электроснабжение главных электроприводов клетей прокатных станов осуществляется от отдельной секции, так называемой «грязной секции» шин. Поэтому объединение на параллельную работу электросталеплавильного и прокатного комплексов не повлияют на электроснабжение других электроприемников. В связи с этим необходимо проложить дополнительную кабельную линию, протяженность которой в условиях современных заводов составляет несколько десятков метров.

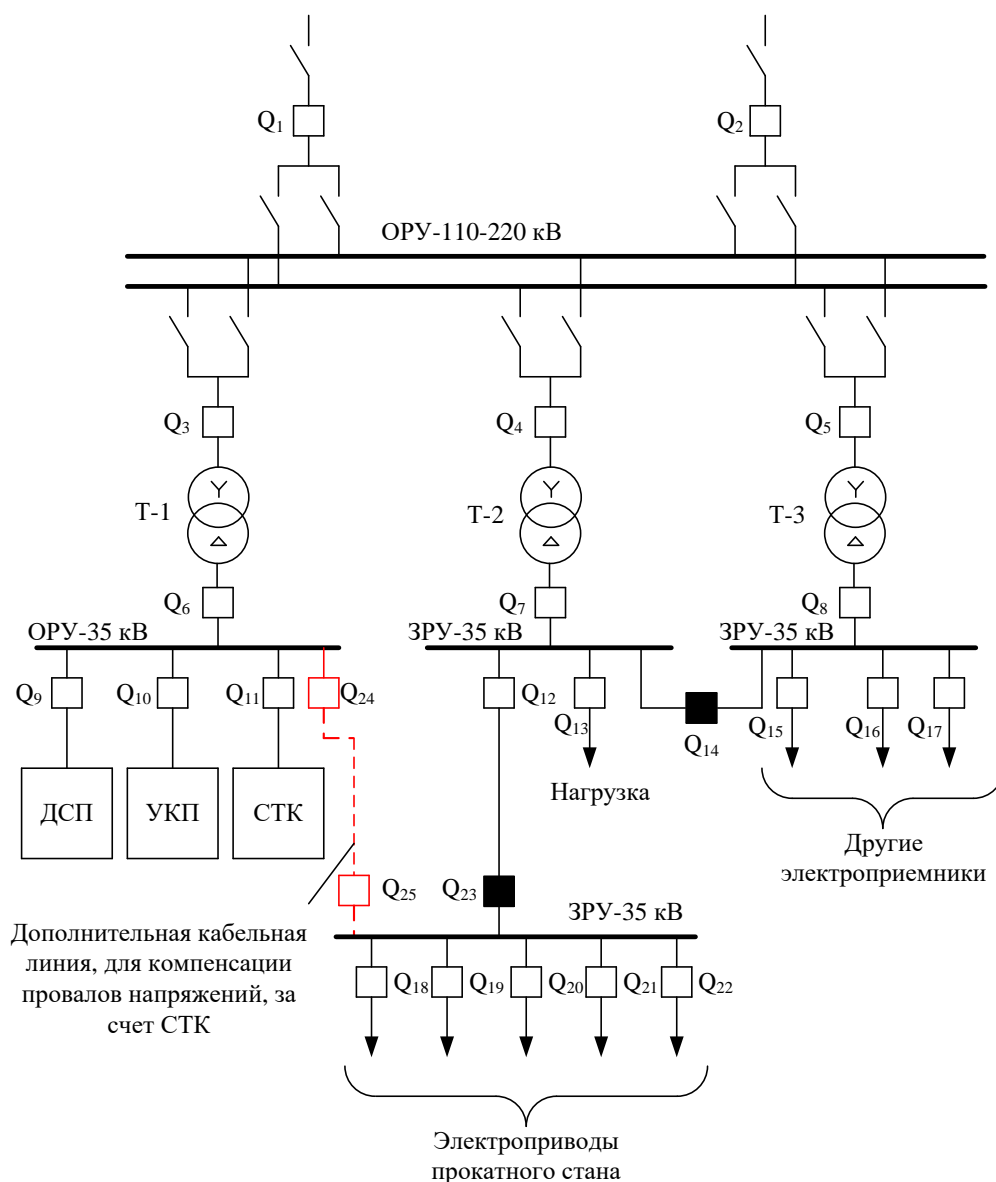


Рисунок 1.9- Упрощенная схема электроснабжения при параллельной работе электросталеплавильного и прокатного комплексов

Необходимо отметить, что на сегодняшний день не проводились исследования возможности использования резервов реактивной мощности СТК для повышения надежности работы ПЧ-АВ при провалах напряжения, и возможности параллельной работы главных электроприводов стана горячей прокатки и электросталеплавильного комплекса при возмущениях, вызванных работой ДСП, а также включением фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) СТК.

1.2 Выводы по главе 1

1. Проведен анализ существующих силовых схем электроприводов прокатных станов на базе ПЧ-АВ. Для снижения негативного влияния на качество электроэнергии в точке подключения АВ, как правило, применяют трехуровневые ПЧ. В качестве полупроводниковых ключей используются IGBT- тиристоры или IGBT- транзисторы. Для электроприводов большой мощности (6-20 МВт) используют 12-, 18- пульсные схемы выпрямления, что позволяет улучшить ЭМС ПЧ с питающей сетью.

2. Показано, что ПЧ-АВ имеют высокую чувствительность к несимметрии питающего напряжения, вызванную внешними провалами напряжения, электроприемниками с нелинейным и резкопеременным характером нагрузки. Системы управления АВ имеют высокую чувствительность к гармоническому составу напряжения, который оказывает негативное влияние на работу блоков синхронизации с питающей сетью. Опыт эксплуатации ПЧ-АВ показал, что проблема повышения устойчивости АВ при несимметрии напряжения является существенной, так как внешние провалы напряжения, отклонения напряжения, вызванные работой электроприемников с нелинейным и резкопеременным характером нагрузки, приводят к аварийному отключению ПЧ-АВ. Аварийное отключение ПЧ-АВ сопровождается значительным экономическим ущербом, браком выпускаемой продукции.

3. Произведен сравнительный обзор существующих способов повышения надежности работы ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения питаю-

щей сети: система управления с предуплавлением по напряжению обратной последовательности, с предуплавлением по обратной и нулевой последовательностям, метод кинетического буферирования и перевод АВ при несимметрии питающего напряжения в диодный режим. Необходимо отметить, что способы повышения надежности работы АВ при несимметрии питающего напряжения за счет введения предмодулирующего сигнала по напряжению не всегда обеспечивают устойчивую работу ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения. При глубоких провалах напряжения наблюдается бросок тока в 1,5-2 раза больше номинального тока АВ, в связи с неконтролируемой величиной введения предмодулирующего сигнала.

4. Одним из эффективных способов повышения устойчивости работы ПЧ-АВ является использование резервов реактивной мощности СТК, функционирующего в составе электросталеплавильного комплекса. Для его реализации необходимо объединить на параллельную работу электросталеплавильный и прокатный комплексы. Необходимо отметить, что на сегодняшний день до конца не изучена возможность параллельной работы ПЧ-АВ и дуговой сталеплавильной печи (ДСП) из-за наличия дополнительных отклонений напряжения, создаваемых ДСП, а также коммутационных провалов напряжений и перенапряжений, вызванных включением печного трансформатора на холостом ходу и включением фильтро-компенсирующих цепей СТК.

5. Актуальной задачей является повышение устойчивости электроприводов прокатного стана при параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью при наличии внешних провалов напряжения и возмущениях, создаваемых работой ДСП. Для ее решения были сформулированы задачи диссертационного исследования:

-Экспериментальный и теоретический анализ влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ при внешних провалах напряжения и параллельной работе с ДСП, в составе электроприводов клетей стана горячей прокатки «1750» ЗАО «ММК Metalurji», г.Дёртйол, Турция;

-Разработка усовершенствованной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» для проведения исследований влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу ПЧ-АВ при параллельной работе с ДСП. Проведение теоретических исследований возможности параллельной работы электроприводов на базе ПЧ-АВ и ДСП. Проведение оценки устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу, а также при включении ФКЦ в составе СТК;

-Разработка усовершенствованной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ, обеспечивающей необходимую устойчивость при возмущениях, вызванных работой электросталеплавильного комплекса, с дополнительным контуром регулирования тока по реактивной составляющей, а также с отдельным регулированием ортогональных составляющих токов по прямой и обратной последовательностям;

- Теоретическая оценка эффективности разработанной системы управления АВ для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при включении печного трансформатора, а также при включении ФКЦ. Оценка результирующего эффекта повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при совместном использовании СТК и разработанной системы управления АВ.

ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ И ГЛАВНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ СТАНА «1750» ГОРЯЧЕЙ ПРОКАТКИ. ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ НА ВНУТРИЗАВОДСКУЮ СЕТЬ 34,5 кВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ЗАВОДА ЗАО «ММК METALURJI»

Главным требованием, предъявляемым к системам электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий, является надежное и бесперебойное электроснабжение. Аварийные перерывы электроснабжения приводят к значительным экономическим убыткам. В связи с этим нормативной документацией устанавливаются показатели качества электроэнергии, выполнение которых является главным условием бесперебойной работы промышленных предприятий. Показатели качества электроэнергии делятся на две группы: продолжительные изменения, зависящие от характера нагрузок и случайные события, которые возникают вследствие неисправностей в системе электроснабжения. Одним из таких случайных событий является провал напряжения, согласно ГОСТу 32144-2013 под провалом напряжения определяют временное уменьшение напряжения в конкретной точке СЭС ниже установленного порогового значения [26-32]. Провал напряжения характеризуется тремя основными параметрами: глубиной провала напряжения ΔU , длительностью провала Δt (от 10 мс до 1 мин) и частотой возникновения F . При высокой частоте возникновения провалов напряжений возникает необходимость в разработке способов, направленных на обеспечение устойчивости работы электроприемников, чувствительных к провалам напряжения. Эффективность способов повышения устойчивости работы при провалах напряжения зависит от выявления причин их возникновения, а также от анализа переходных процессов, влияющих на работу электроприемников, чувствительных к провалам напряжения. Проведем анализ возникновения провалов напряжения во внутризаводской сети 34,5 кВ и анализ причин отклю-

чения электроприводов прокатного стана «1750» металлургического завода «ММК Metalurji», г.Дёртйол, Турция.

2.1 Анализ причин возникновения и распределения провалов напряжения во внутривозводской сети завода «ММК Metalurji»

Металлургический завод ЗАО «ММК Metalurji» один из крупных производителей стали с полным циклом производства. Расположен на юго-западе Турции в г.Дёртйол. Сырье для производства листопроката в виде металлического лома и чугуна поступает на завод морским путем.

В состав завода входят три основных цеха: электросталеплавильный цех, стан «1750» горячей прокатки, реверсивный стан холодной прокатки. В состав электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) входят: дуговая сталеплавильная печь, объемом ванны 250 т и мощностью печного трансформатора 300 МВА, установка ковш-печь (УКП) с трансформатором мощностью 53 МВА, статический тиристорный компенсатор реактивной мощности 330 МВАр. Производительность цеха 2400000 т/год.

После разливки металла слябовые заготовки поступают на линию прокатки в стан горячей прокатки. Характеристика силового оборудования СГП будет описана ниже. После прокатки стальная полоса, смотанная в рулоны, поступает в непрерывно-травильный агрегат, затем на реверсивный стан холодной прокатки. Часть готовой продукции поступает в Стамбул, другая часть поступает в агрегат непрерывного горячего цинкования и линию полимерных покрытий. Готовая продукция распределяется на внутренних и внешних рынках.

Металлургический завод «ММК Metalurji» получает питание по кольцевой линии от подстанции Erzin, входящий в состав системы электроснабжения (СЭС) провинции Хатай и Адана [26,28]. Подстанция Erzin связана с внешней энергосистемой Турции и образует кольцо с электростанциями Egemer, Antakya-3, металлургический завод Isdemir и металлургический завод «ММК Metalurji», по уровню напряжения 380 кВ. В связи со сложным рельефом местности провинции Хатай и Адана высоковольтная линия электропередач (ЛЭП)

проходит по горной местности и лесным массивам, что приводит к частым технологическим нарушениям, вызванным погодными условиями и продуктами жизнедеятельности птиц.

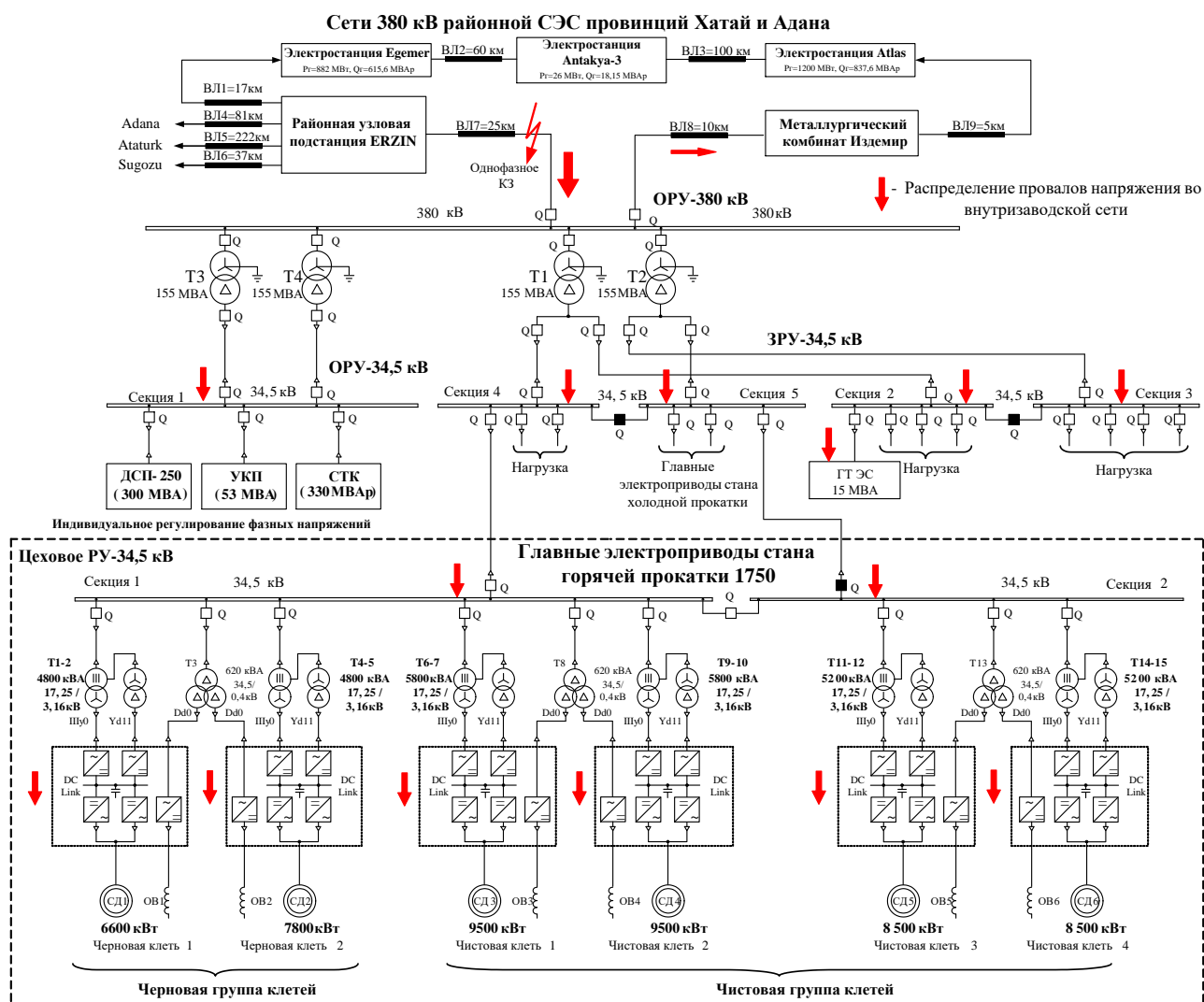
Главная понизительная подстанция (ГПП) металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» выполнена по схеме с двумя рабочими и обходной системами шин. В состав подстанции входит 4 понизительных трансформатора (Т-1, Т-2, Т-3 и Т-4) мощностью 155 МВА и напряжением 34,5 кВ. Мощность короткого замыкания в точке подключения ГПП составляет $S_{кз} = 7000$ МВА.

Трансформаторы Т-3 и Т-4 включены на параллельную работу, осуществляют электроснабжение электросталеплавильного комплекса. В его состав которого входят дуговая сталеплавильная печь (ДСП) 250, с мощностью печного трансформатора 300 МВА, установка ковш-печь (УКП), с мощностью трансформатора 53 МВА и статический тиристорный компенсатор реактивной мощности (СТК) мощностью 330 МВАр. В нормальном режиме работы СТК обеспечивает компенсацию реактивной мощности, фильтрацию и симметрирование высших гармоник, вызванных работой ДСП и УКП [27, 29-32].

От трансформаторов Т-1, Т-2 подключены главные электроприводы станов горячей и холодной прокатки, цех полимерных покрытий, агрегат непрерывного горячего цинкования, машина непрерывного литья заготовок и другие вспомогательные электроприемники прокатного и сталеплавильного комплексов. Упрощенная схема электроснабжения металлургического завода «ММК Metalurji» приведена на рисунке 2.1.

Как было сказано выше, ЛЭП 380 кВ проходит в сложной географической местности, в связи с этим подвержена кратковременным однофазным коротким замыканиям, вызывающим однофазные провалы напряжения на ГПП завода.

Возникающие в сети 380 кВ однофазные провалы напряжения трансформируются во внутризаводскую сеть и оказывают негативное влияние на работу главных электроприводов стана горячей прокатки. На рисунке 2.2. представлены мгновенные значения напряжений на стороне 380 кВ, 34,5 кВ и токов, потребляемых прокатным комплексом.



Возникновение несимметричного провала напряжения в сети 380 кВ, глубиной 57% и длительностью 120 мс, приводит к броску тока, потребляемого главными электроприводами СГП, амплитуда которого в 2 раза больше, чем в нормальном режиме работы. Из рисунка 2.2 видно, что возникновение однофазного провала напряжения в сети 380 кВ приводит к снижению напряжения в двух фазах во внутривзаводской сети 34,5 кВ. Необходимо отметить, что аварийное отключение главных электроприводов приводит к значительному экономическому ущербу. Так как отключение стана в момент прокатки влечет за собой застревание полосы в прокатных клетях, на устранение данной ситуации требуется от 2 до 2,5 часов. На металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» стан горячей прокатки работает в составе непрерывного литейно-прокатного

комплекса, поэтому аварийное отключение электроприводов влечет за собой остановку ЭСПЦ.

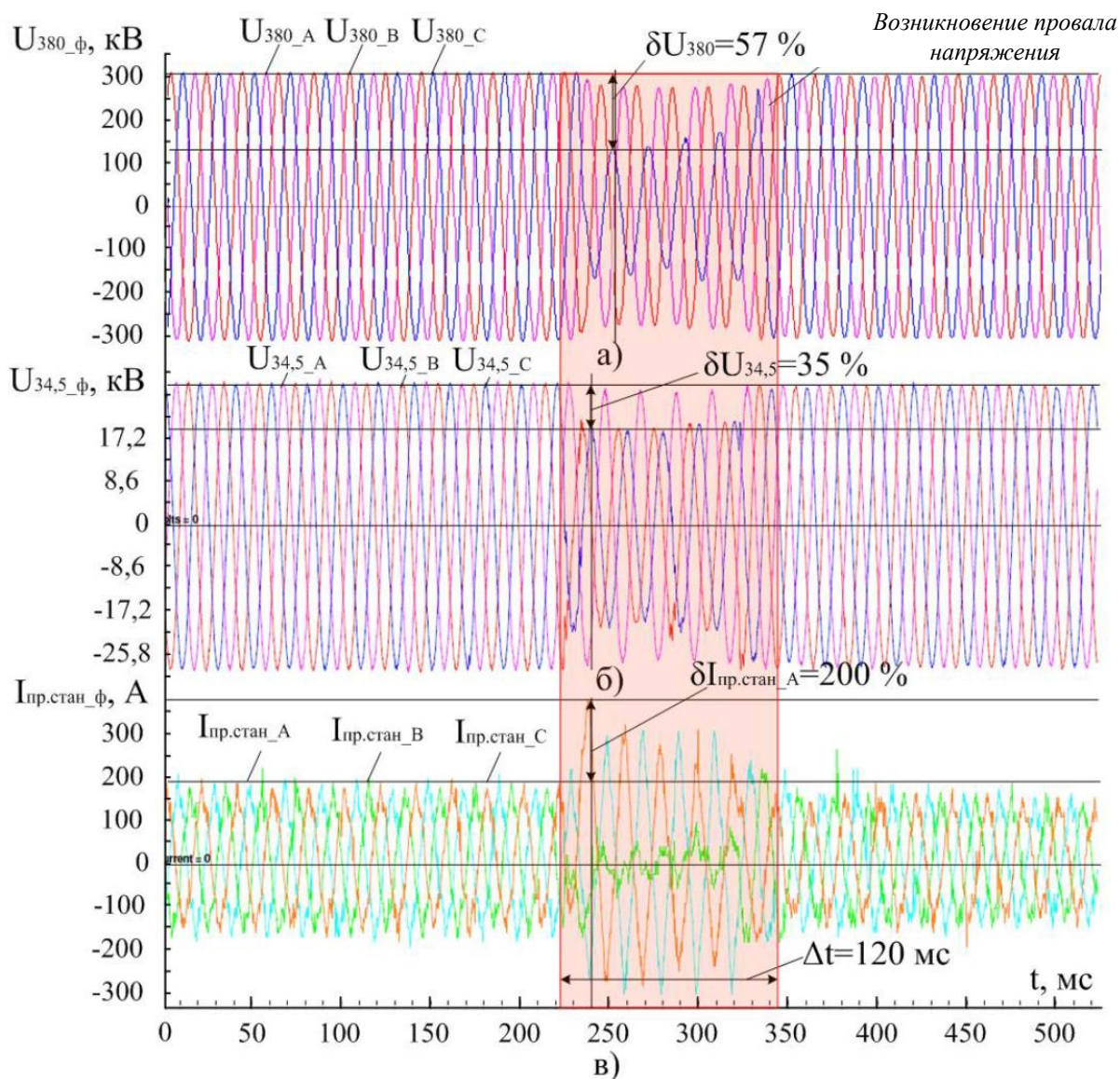


Рисунок 2.2- Мгновенные значения токов и напряжений: а) мгновенные значения фазных напряжений в сети 380 кВ; б) мгновенные значения фазных напряжений в сети 34,5 кВ; в) мгновенные значения токов, потребляемых СГП «1750»

На рисунке 2.3 приведены мгновенные значения напряжений в сети 34,5 кВ и токов, потребляемых СГП, при возникновении в сети 380 кВ однофазного провала напряжения глубиной 38% и длительностью 50 мс. Возникновение несимметричного провала напряжения привело к увеличению амплитуды потребляемого тока, и сработала токовая защита ПЧ-АВ.

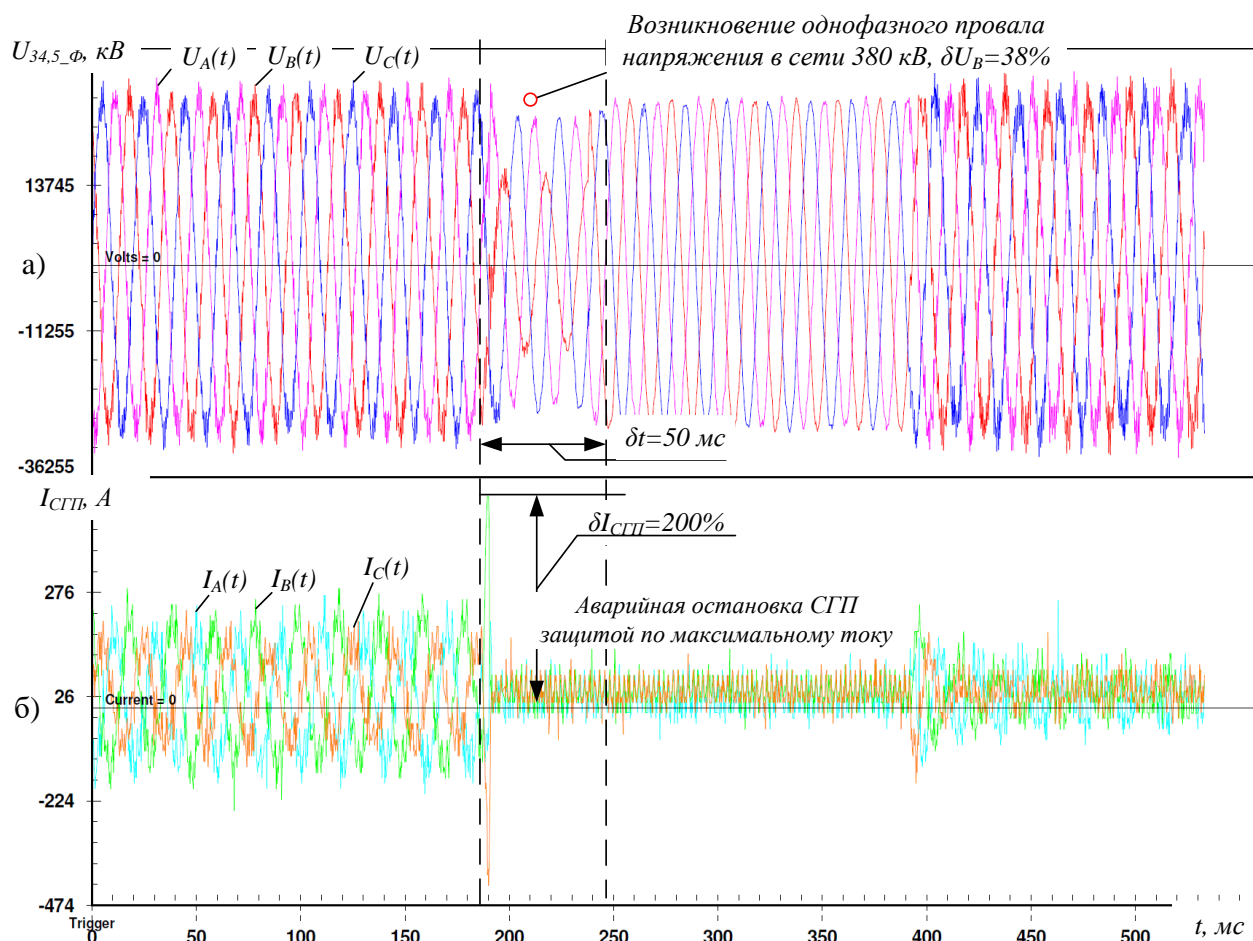


Рисунок 2.3- Мгновенные значения фазных напряжений в сети 34,5 кВ (а), токов потребляемых СГП «1750» (б) при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 38% и длительностью 50 мс

Для проведения анализа частоты возникновения подобных ситуации на заводе «ММК Metalurji» были получены статистические данные о провалах напряжений в период 2012-2014 годов. По статистическим данным было установлено, что 65% всех провалов напряжения в сети 380 кВ составляют однофазные, 30% двухфазные и 5% трехфазные. На рисунке 2.4 представлена диаграмма распределения однофазных провалов напряжений в зависимости от глубины и длительности. Однофазные провалы напряжения глубиной 5-50% и длительностью 50-300 мс возникают в 90% случаев от всех однофазных провалов напряжения. Большая часть этих провалов вызвала аварийное отключение главных электроприводов клеток стана горячей прокатки «1750».

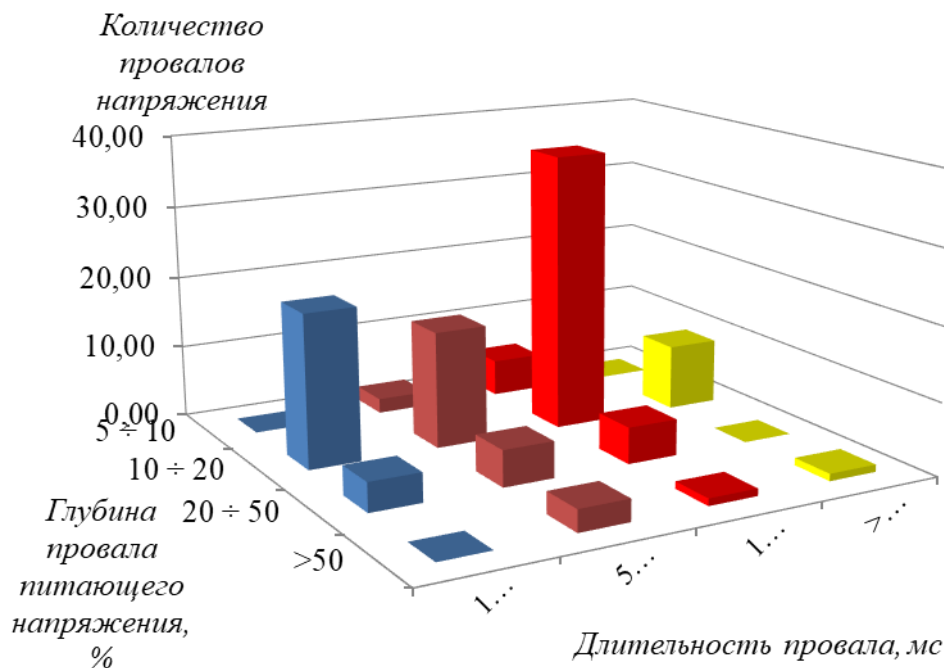


Рисунок 2.4 – Диаграмма распределения однофазных провалов напряжения в сети 380 кВ за 2012-2014 годы

Длительность провалов напряжения в сети 380 кВ составляет 50-300 мс, вероятно, что провалы напряжения – следствие однофазных коротких замыканий. Учитывая то, что ЛЭП 380 кВ проходит в местности со сложным географическим рельефом (горная местность, лесные массивы), то вероятной причиной возникновения коротких замыканий являются: перекрытие элементов ЛЭП, вследствие прямых ударов молнии, снижение диэлектрической прочности изоляторов, замыкание фазных проводов на ветки деревьев.

В работе [21] авторами был проведен анализ возникновения провалов напряжений и атмосферных осадков в районе провинции Хатай и Адана. Анализ показал, что время возникновения провалов напряжений совпадает с временем прохождения дождливого периода. Таким образом, провалы напряжения, возникающие в сети 380 кВ, имеют сезонный характер и наиболее частой причиной их возникновения являются неблагоприятные погодные условия. Вывод о сезонном возникновении провалов напряжения подтверждается статистикой полученной с завода. В таблице 2.1 приведены процентные соотношения возникновения провалов напряжений и прохождения грозового фронта, 50% провалов напряжений совпадают с грозовыми осадками [21, 32].

Таблица 2.1- Статистика совпадений возникновения провалов напряжений и прохождения грозового фронта

Показатель	Календарный год		
	2012	2013	2014
Количество дней в году, когда возникали провалы напряжения	27	72	41
Количество дней в году, с грозами и атмосферными осадками	125	93	115
Количество совпадений	17/63 %	34/47,2 %	19/46,3 %

2.2 Результаты экспериментальных исследований режимов работы стана горячей прокатки «1750» металлургического завода «ММК Metalurji»

На металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» функционирует широкополосный стан горячей прокатки, предназначенный для производства полос из низкоуглеродистого и низколегированного металла, смотанных в рулоны. Горячекатаная полоса может иметь следующие размеры [33,34]:

- толщина 1,0...20,0 мм – из низкоуглеродистого металла;
- толщина 1,2...12,7 мм – из низколегированного металла;
- ширина – 800...1570 мм.

В состав стана горячей прокатки входит следующее оборудование:

Черновая группа клетей:

- вертикальная клеть с валками диаметром 580...640 мм и приводом от двух электродвигателей мощностью 120 кВт каждый;
- устройство для гидросбива окалина №1, обеспечивающее давление воды до 380 бар;
- две клетки кварто: первая клеть R_1 с рабочими валками диаметром 980...1050 мм и приводом мощностью 6600 кВт; вторая клеть R_2 с рабочими валками диаметром 730...810 мм и приводом мощностью 7800 кВт; диаметр

опорных валков составляет 1320...1450 мм; клеть оснащена системами положительного и отрицательного изгиба, сдвижки рабочих валков.

Чистовая группа клетей:

- барабанные ножницы;
- устройство для гидросбива окалины №2, обеспечивающее давление воды до 380 бар;
- две клетки кварто с рабочими валками диаметром 730...810 мм, диаметр опорных валков 1320...1450 мм и привод мощностью 9500 кВт для каждой клетки;
- две клетки кварто с рабочими валками диаметром 560...630 мм, диаметр опорных валков 1320...1450 мм и привод мощностью 8500 кВт для каждой клетки;
- система ламинарного охлаждения полосы с 21 коллектором типа «водяная стена»;
- гидронажимные устройства на всех четырех клетях, системы технологической смазки, положительного и отрицательного изгиба, сдвижки рабочих валков.

Группа моталок, состоящая из двух подпольных моталок, обеспечивающих смотку рулонов с наружным диаметром до 2000 мм [8]. Схема технологического процесса производства горячекатаных полос приведена на рисунке 2.5.

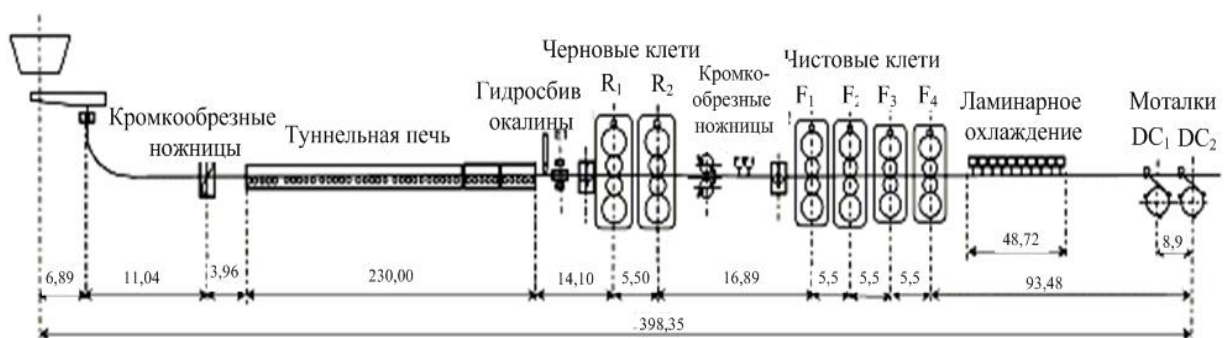


Рисунок 2.5- Схема технологического процесса стана горячей прокатки «1750»

2.2.1 Характеристика силового оборудования стана горячей прокатки «1750»

Главные электроприводы стана горячей прокатки «1750» выполнены на базе высоковольтных синхронных двигателей (СД) и преобразователей частоты. Номинальные параметры синхронных электродвигателей приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2- Номинальные параметры двигателей клетей

Клеть	$P_{ном}$, кВт	$U_{ном}$, В	$I_{ном}$, А	Базовая скорость, об/мин	Максимальная скорость, об/мин	Передаточное отношение
R_1	6600	3150	1242	110	170	1:8,20
R_2	7800	3065	1504	130	300	1:4,95
F_1	9500	3045	1832	220	525	1:4,21
F_2	9500	3045	1832	220	560	1:2,85
F_3	8500	3035	1645	220	570	1:30
F_4	8500	3035	1645	220	570	1:00

Как было отмечено выше, для регулирования скорости вращения СД используются высоковольтные преобразователи частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ) и автономными инверторами напряжения (АИН) производства фирмы *ABB* серии *ACS 6000*. Преобразователи частоты *ACS 6000* предназначены для регулирования скорости и крутящего момента асинхронных и синхронных электродвигателей в диапазоне мощностей 3-27 МВт, обладают рядом преимуществ:

- быстрое и точное регулирование в сочетании с низкими энергозатратами, обеспечивая наилучшие эксплуатационные характеристики. Управление двигателем основано на методе прямого управления моментом, разработанным кор-

порацией *ABB*. Данный метод обеспечивает наилучшую зависимость между крутящим моментом и скоростью вращения;

- высокая эффективность и надежность, благодаря использованию новейших силовых полупроводниковых ключей *IGCT* (запираемые тиристоры с блоком управления), разработанные корпорацией *ABB*;

- сетевой блок питания для 2-квadrантной работы с постоянным коэффициентом мощности 0,96 во всем диапазоне скоростей вращения;

- активный выпрямительный блок для 4-квadrантной работы с пониженным содержанием гармоник и регулируемым коэффициентом мощности;

- общая шина постоянного тока для работы с несколькими двигателями и рекуперацией энергии в сеть;

- модульная конструкция, обеспечивающая получение оптимальных конфигураций;

- энергия торможения, генерируемая в одном двигателе, может передаваться на другие инверторы по общей шине постоянного тока без потребления энергии из сети питания. Коэффициент мощности близок к единице во всем диапазоне скоростей;

- энергия торможения, генерируемая в одном двигателе, может передаваться на другие инверторы по общей шине постоянного тока без потребления энергии из сети питания.

В преобразователях частоты *ACS 6000 AB* и *АИН* имеют полностью идентичную структуру и представляют собой два полностью управляемых источника напряжения, *AB* подключается к сети переменного тока, а *АИН* подключается к нагрузке. Силовые схемы *AB* и *АИН* состоят из двенадцати полностью управляемых тиристоров и восемнадцати диодов, управление тиристорами осуществляется по принципу широтно-импульсной модуляции (ШИМ). В связи с этим *AB* и *АИН* подключаются к сети и нагрузке через фильтры для улучшения гармонического состава тока и напряжения. Основные параметры ПЧ *ACS 6000* приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3- Основные параметры преобразователей частоты с АВ

Параметр	Клеть R ₁	Клеть R ₂	Клеть F ₁	Клеть F ₂	Клеть F ₃	Клеть F ₄
$S_{AB}, \text{кВА}$	8200	9600	11600	11600	10400	10400
$I_{AB, \text{ном}}, \text{А}$	750	877	1060	1060	950	950
$I_{\text{АИИ}, \text{max}}, \text{А}$	2557	2557	3288	3288	3288	3288
$U_{AB, \text{ном}}, \text{В}$	3150	3150	3150	3150	3150	3150
$U_{\text{АИИ}, \text{ном}}, \text{В}$	3300	3300	3300	3300	3300	3300
$U_{DC, \text{ном}}, \text{В}$	4840	4840	4840	4840	4840	4840
$U_{DC, \text{max}}, \text{В}$	5800	5800	5800	5800	5800	5800
$U_{DC, \text{min}}, \text{В}$	3380	3380	3380	3380	3380	3380
$\Delta U_{DC}, \text{В}$	500	500	500	500	500	500

Электроснабжение главных электроприводов СГП, осуществляется от закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 34,5 кВ. Для улучшения качества выпрямленного напряжения и гармонического состава токов, потребляемых ПЧ-АВ, применяется двенадцатипульсная схема выпрямления. Для ее реализации первичные обмотки трансформаторов соединены последовательно, а вторичные обмотки одного трансформатора соединены по схеме «звезда», а второго по схеме «треугольник». Номинальные параметры трансформаторов, питающих главные электроприводы СГП, приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4- Параметры трансформаторов, питающих главные электроприводы СГП «1750»

Номер трансформатора	$S_{\text{ном}}, \text{кВА}$	$U_1, \text{кВ}$	$U_2, \text{кВ}$	$f, \text{Гц}$	$\Delta P_k, \text{кВт}$	$\Delta P_x, \text{кВт}$	$U_k, \%$
T ₁ -T ₂	4800	17,250	3,160	50	31,814	3,33	8
T ₄ -T ₅	4800	17,250	3,160	50	34,745	3,942	8
T ₆ -T ₇ , T ₉ -T ₁₀	5800	17,250	3,160	50	47,86	5,9	10
T ₁₁ -T ₁₂ , T ₁₄ -T ₁₅	5200	17,250	3,160	50	41,864	5,366	9

2.2.2 Анализ экспериментальных исследований режимов работы главных электроприводов СГП «1750»

Для анализа режимов работы главных электроприводов СГП были проведены измерения токов, потребляемых АВ, напряжений в точке подключения ПЧ. Измерения проводились с использованием измерительных комплексов: регистратора ПКЭ Fluke 435 (частота дискретизации 5 кГц), регистратора ПКЭ ELSPEC G4430, сервера архивов ИВА.

По полученным экспериментальным данным режима работы прокатного стана были построены графики действующих значений токов, потребляемых прокатным комплексом. На рисунке 2.6 представлены два цикла работы стана горячей прокатки. Параметры токов, потребляемых прокатным комплексом, и изменения нагрузки в течение суток будут использованы для проведения исследований возможности параллельной работы дуговой сталеплавильной печи с прокатным комплексом, а также для разработки мероприятий обеспечивающих их устойчивую параллельную работу.

При анализе данных, полученных из архивов ИВА, был выявлен режим работы прокатного комплекса при несимметричном провале напряжения в сети 380 кВ. Глубина провала напряжения в сети 380 кВ составляет 13%, длительность 350 мс. На рисунке 2.7 представлены переходные процессы токов, потребляемых АВ главного электропривода черновой клетки R_1 и напряжения в звене постоянного тока. В момент возникновения провала напряжения прокатный стан работал в режиме прокатки. Из рисунка 2.7 а,б видно, что возникновения однофазного провала напряжения приводит к возникновению несимметрии токов, потребляемых АВ, и увеличению тока в 1,45 раз относительно потребляемого тока в нормальном режиме работы сети. А также в звене постоянного тока возникает увеличение размаха колебания напряжения амплитудой до 280 В и удвоенной частоты. Колебания напряжения в звене постоянного тока вызваны появлением в токах, потребляемых АВ, обратной последовательности.

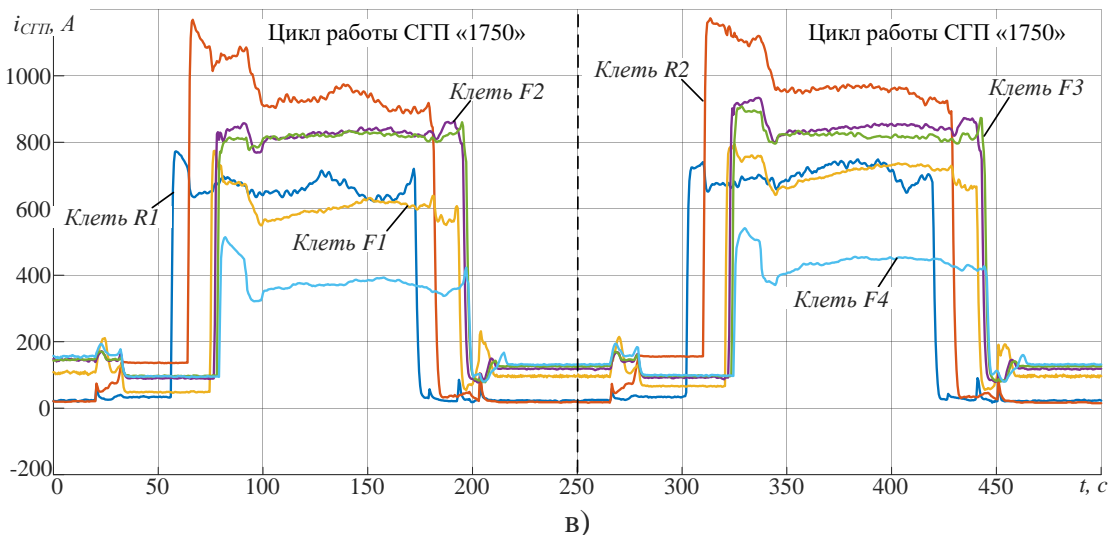
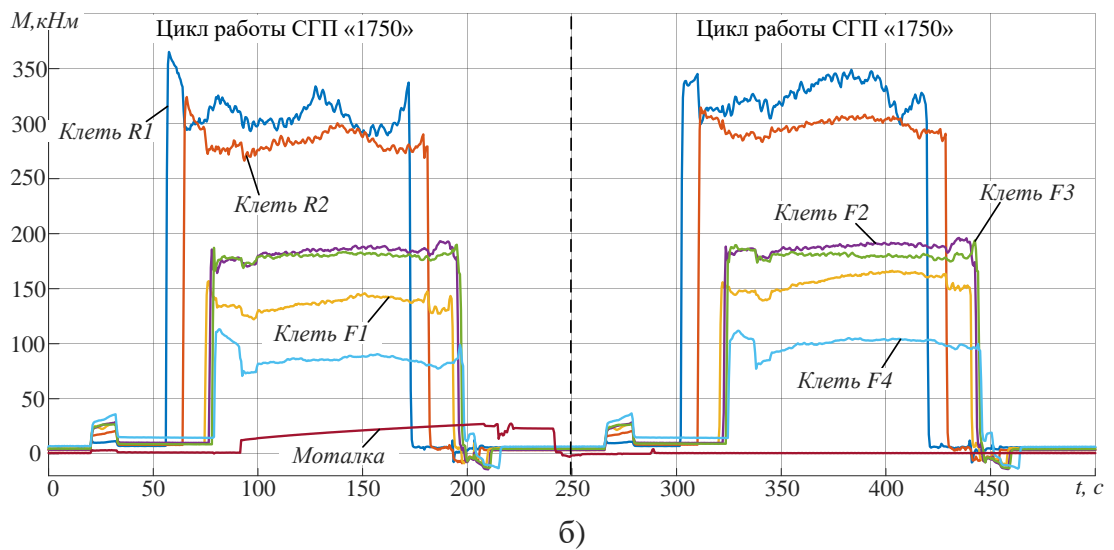
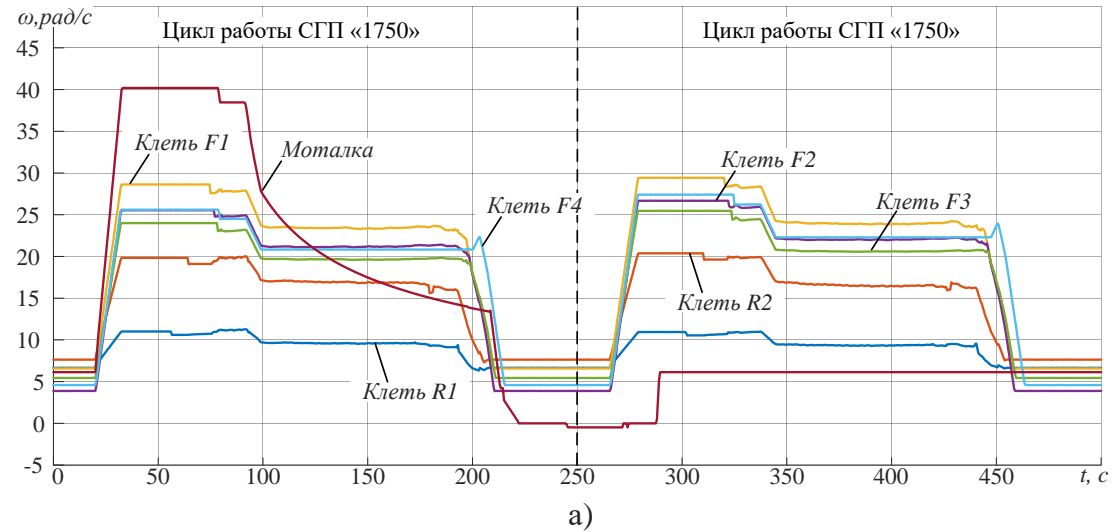


Рисунок 2.6- Экспериментальные значения: а) скорости вращения электродвигателей СГП «1750»; б) крутящих моментов; в) токов, потребляемых АВ СГП «1750»

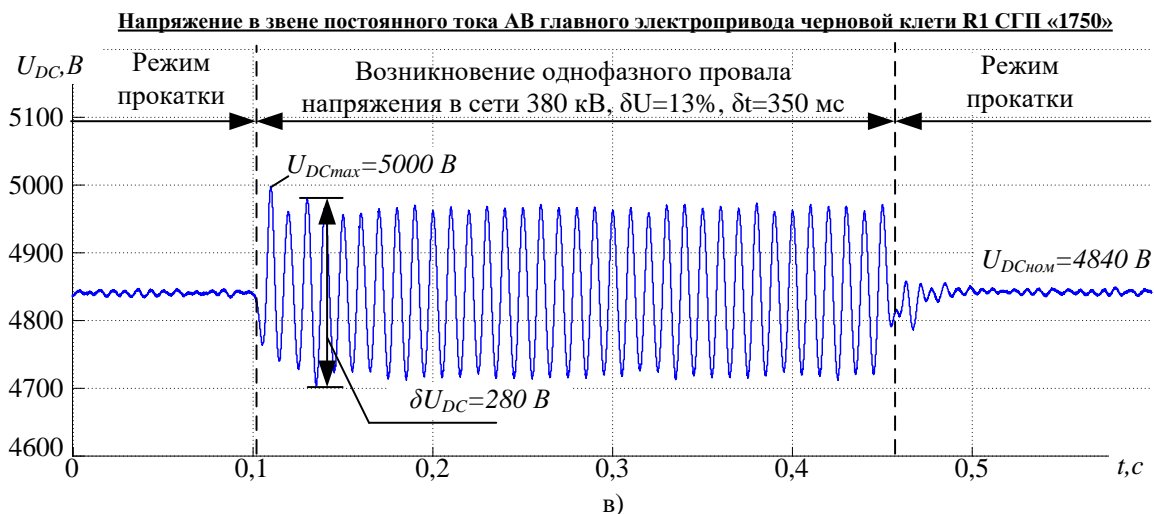
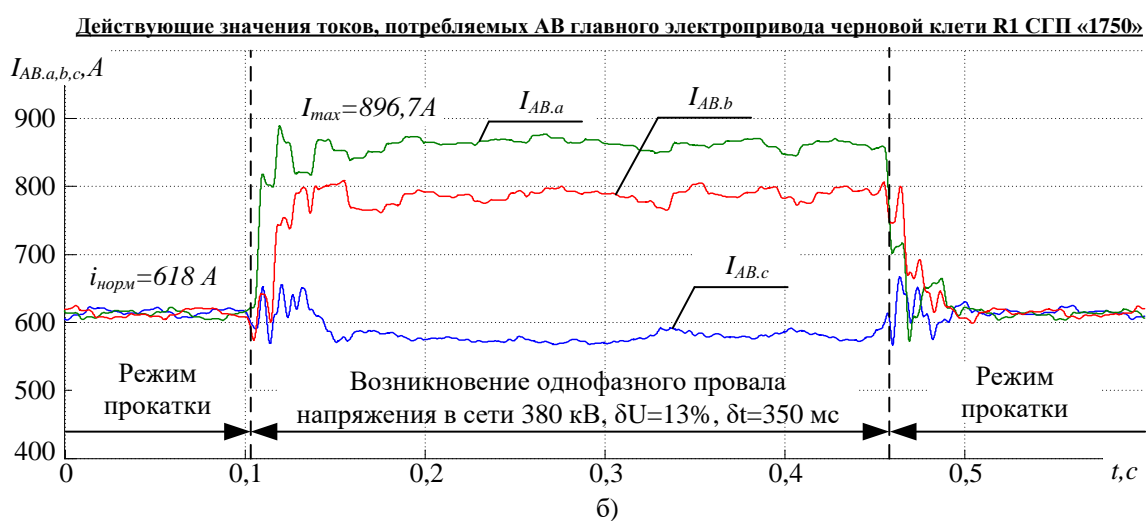
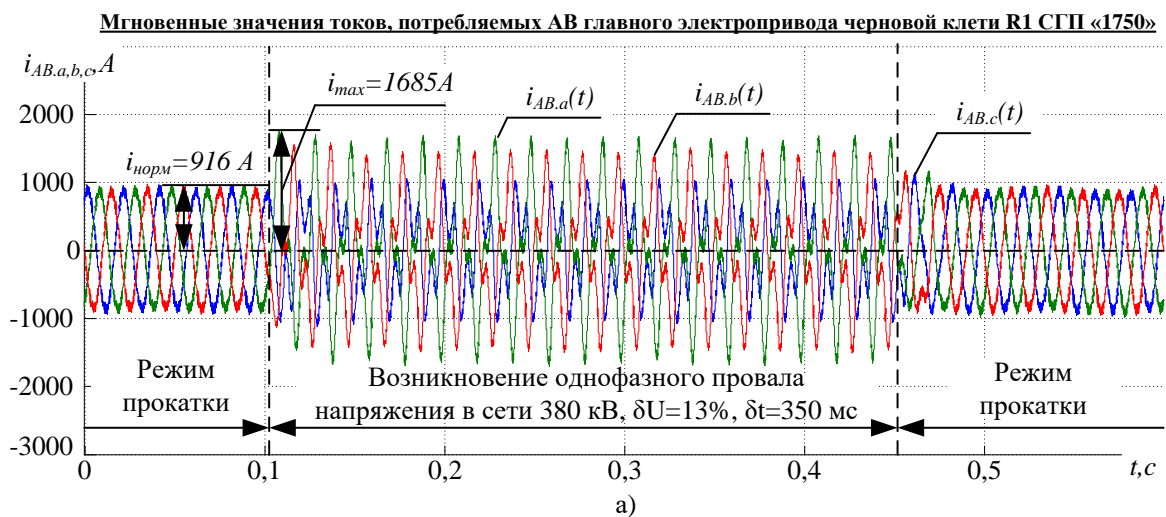


Рисунок 2.7- Переходные процессы: а,б- токов, потребляемых АВ, и в- напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 13% и длительностью 350 мс

2.3 Результаты экспериментальных исследований режимов работы электросталеплавильного цеха металлургического завода «ММК Metalurji»

На сегодняшний день дуговые сталеплавильные печи (ДСП) являются неотъемлемой частью металлургического производства. На металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji», функционирует мощная дуговая печь ДСП-250. Как было отмечено ранее, электроснабжение электросталеплавильного цеха осуществляется от двух силовых трансформаторов (включенных на параллельную работу) T_3 и T_4 суммарной мощностью 310 МВА. В состав электросталеплавильного цеха помимо ДСП входит установка ковш-печь (УКП) и статический тиристорный компенсатор реактивной мощности, мощностью 330 МВАр [33,34].

2.3.1 Характеристика силового оборудования электросталеплавильного комплекса

Дуговая сталеплавильная печь – это электроприемник с несимметричным и резкопеременным характером нагрузки [16, 17]. К питающей сети ДСП-250 подключена через печной трансформатор мощностью 300 МВА производства фирмы AREVA (Приложение А). Печной трансформатор снабжен устройством регулирования под нагрузкой (РПН) вторичного напряжения. Основные параметры печного трансформатора и реактора приведены в таблице 2.5.

При эксплуатации электроприемников с нелинейной характеристикой нагрузки необходимо решение двух основных проблем:

1. Обеспечение эффективного использования электрической энергии на всех стадиях работы ДСП.
2. Обеспечение требований электромагнитной совместимости ДСП с питающей сетью и другими электроприемниками.

Решения этих проблем выполнено за счет использования СТК и настройки системы управления технологическим режимом работы печи [18,19]. Основ-

ными задачами СТК являются компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник, генерируемых в сеть при работе ДСП.

Таблица 2.5 – Номинальные параметры печного трансформатора и реактора ДСП-250

№ п/п	Параметр	Значение
1	Номинальная мощность трансформатора, МВА	300
2	Номинальная частота питающего напряжения, Гц	50
3	Номинальное напряжение первичной обмотки, кВ	34,5
4	Номинальное напряжение вторичной обмотки, кВ	1,683
5	Номинальный ток первичной обмотки, кА	2,89
6	Номинальный ток вторичной обмотки, кА	59,49
7	Группа соединения	0
8	Диапазон регулирования вторичного напряжения, В	1119-1683
9	Количество ступеней РПН трансформатора	16
10	Мощность реактора, МВАр	35,3
11	Напряжение реактора, кВ	34,5
12	Номинальный ток реактора, кА	2,899
13	Количество ступеней РПН реактора	12

На металлургическом заводе «ММК Metalurji» СТК состоит из тиристорно-реакторной группой (ТРГ) и фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ)-фильтр 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник. Фильтры 2-ой, 3-ей и ТРГ подключены к сети 34,5 кВ через общий выключатель. Общий выключатель установлен и для включения фильтров 4-ой и 5-ой гармоник. Фильтр 6-ой гармоники подключен через отдельный выключатель. Тиристорно-реакторная группа состоит из полупроводниковых ключей тиристоры и реакторов для снижения величины токов, протекающих через тиристоры, фазы ТРГ включены по схеме «треугольник». Регулирование реактивной мощности, осуществляется за счет системы управления СТК, в которой рассчитываются углы отпирания тиристо-

ров в зависимости от параметров питающей сети и принятого режима регулирования. Основные параметры СТК приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные технические параметры СТК

№ п/п	Параметр	Значение
1	Номинальное напряжение, кВ	34,5
2	Номинальная мощность емкостного характера, МВАр	330
3	Номинальная мощность индуктивного характера, МВАр	330
4	Частота настройки фильтра 2-ой гармоники, о.е.	1,95
5	Частота настройки фильтра 3-ей гармоники, о.е.	2,95
6	Частота настройки фильтра 4-ой гармоники, о.е.	3,9
7	Частота настройки фильтра 5-ой гармоники, о.е.	4,9
8	Частота настройки фильтра 6-ой гармоники, о.е.	5,9
9	Номинальный ток фильтра 2-ой гармоники, кА	1,166
10	Номинальный ток фильтра 3-ей гармоники, кА	1,168
11	Номинальный ток фильтра 4-ой гармоники, кА	1,113
12	Номинальный ток фильтра 5-ой гармоники, кА	1,084
13	Номинальный ток фильтра 6-ой гармоники, кА	0,991
14	Мощность фильтра 2-ой гармоники, МВАр	69,7
15	Мощность фильтра 3-ей гармоники, МВАр	69,8
16	Мощность фильтра 4-ой гармоники, МВАр	66,5
17	Мощность фильтра 5-ой гармоники, МВАр	64,8
18	Мощность фильтра 6-ой гармоники, МВАр	59,2
19	Добротность фильтра 2-ой гармоники	15
20	Добротность фильтра 3-ей гармоники	80
21	Добротность фильтра 4-ой гармоники	80
22	Добротность фильтра 5-ой гармоники	80
23	Добротность фильтра 6-ой гармоники	80
24	Индуктивность одной фазы ТРГ на основной частоте, мГн	27,6
25	Удельные потери в конденсаторах, Вт/кВАр	0,2

2.3.2 Анализ экспериментальных исследований режимов работы электросталеплавильного комплекса ЗАО «ММК Metalurji»

Для анализа режимов работы электросталеплавильного комплекса были проведены измерения токов, потребляемых ДСП, СТК, напряжений в точке подключения ДСП. Измерения проводились с использованием измерительных комплексов: регистратора ПКЭ Fluke 435 (частота дискретизации 5 кГц), регистратора ПКЭ ELSPEC G4430, сервера архивов FDA.

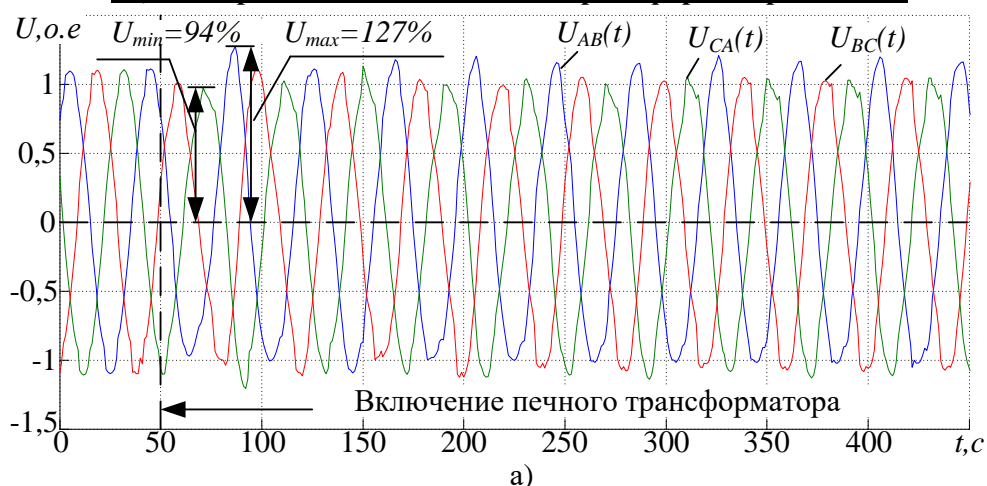
2.3.2.1 Анализ переходных процессов токов и напряжений, протекающих при включении печного трансформатора на холостом ходу

Опыт эксплуатации ДСП показывает, что включение печного трансформатора (ПТ) на холостом ходу сопровождается бросками токов намагничивания [93]. Причиной возникновения броска тока намагничивания является насыщение магнитной системы трансформатора.

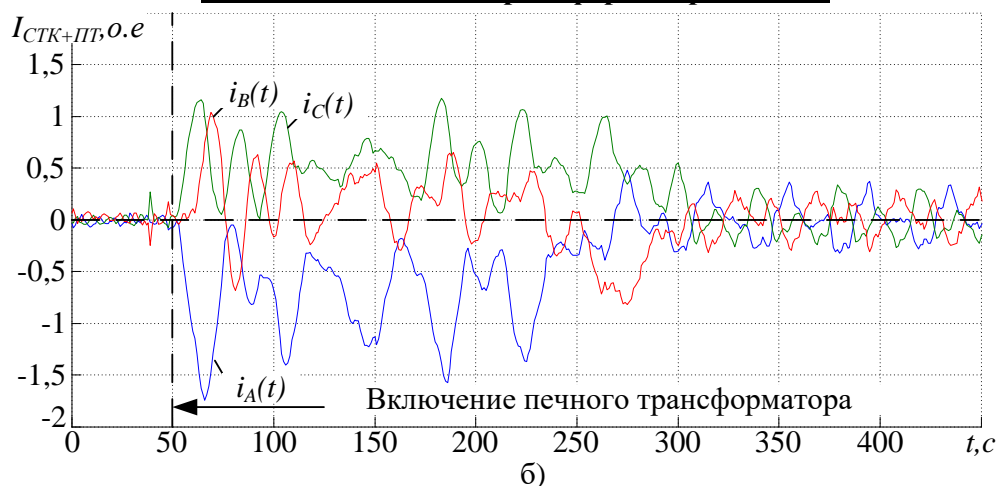
Амплитуда броска тока намагничивания зависит от многих факторов: от уровня напряжения сети, от ступени РПН, от остаточного магнитного потока в стержнях магнитопровода, от фазы напряжения в момент замыкания полюсов выключателя. Бросок тока намагничивания сопровождается естественным возникновением провалов напряжения на первичной стороне печного трансформатора, а также возникновением несимметрии напряжения в точке подключения ПТ.

Из экспериментально полученных данных видно, что при включении печного трансформатора возникает бросок тока фазы А, амплитуда которого равна удвоенному значению номинального тока ПТ (рисунок 2.8, в), который приводит к возникновению перенапряжения линейного напряжения U_{AB} на 27% (рисунок 2.8, а), а также к несимметрии линейных напряжений на секции шин 34,5 кВ, на все время переходного процесса.

**Мгновенные значения линейных напряжений на секции шин
34,5 кВ при включении печного трансформатора на Х.Х.**



**Мгновенные значения суммарных токов СТК и ПТ при
включении печного трансформатора на Х.Х.**



**Мгновенные значения токов печного трансформатора при
включении на Х.Х.**

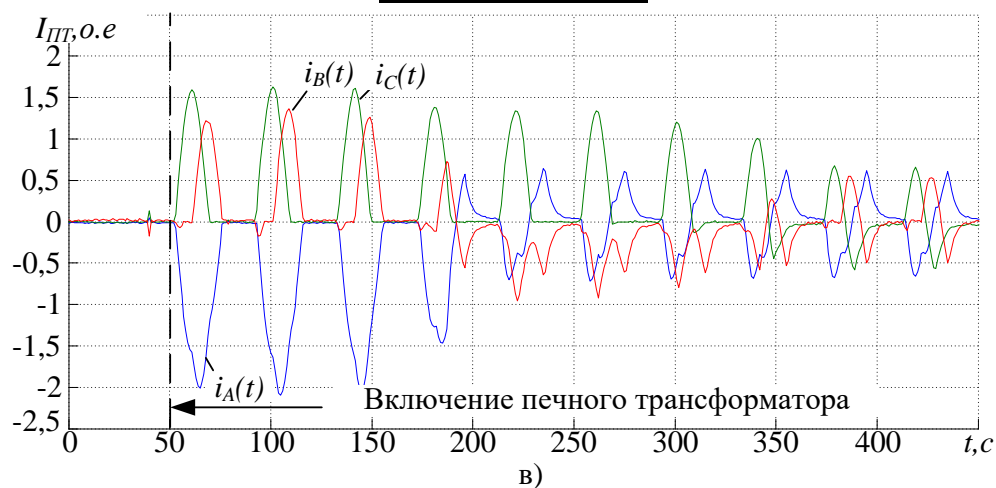


Рисунок 2.8 – Кривые мгновенных значений токов и напряжений при включении ПТ на холостом ходу: а) линейных напряжений на секции 34,5 кВ; б) суммарного тока СТК и ПТ; в) тока печного трансформатора

2.3.2.2 Анализ переходных процессов токов и напряжений, протекающих при включении фильтрокомпенсирующих цепей СТК

Как было отмечено ранее, в состав СТК входят тиристорно-реакторная группа и фильтрокомпенсирующие цепи, представленные фильтрами 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник. Фильтры 2-ой и 3-ей гармоник совместно с ТРГ подключены к сети через общий выключатель, через один выключатель подключены фильтры 4-ой, 5-ой гармоник. Фильтр 6-ой гармоник подключен через отдельный выключатель [94]. Упрощенная схема СТК 330 МВАр представлена на рисунке 2.9.

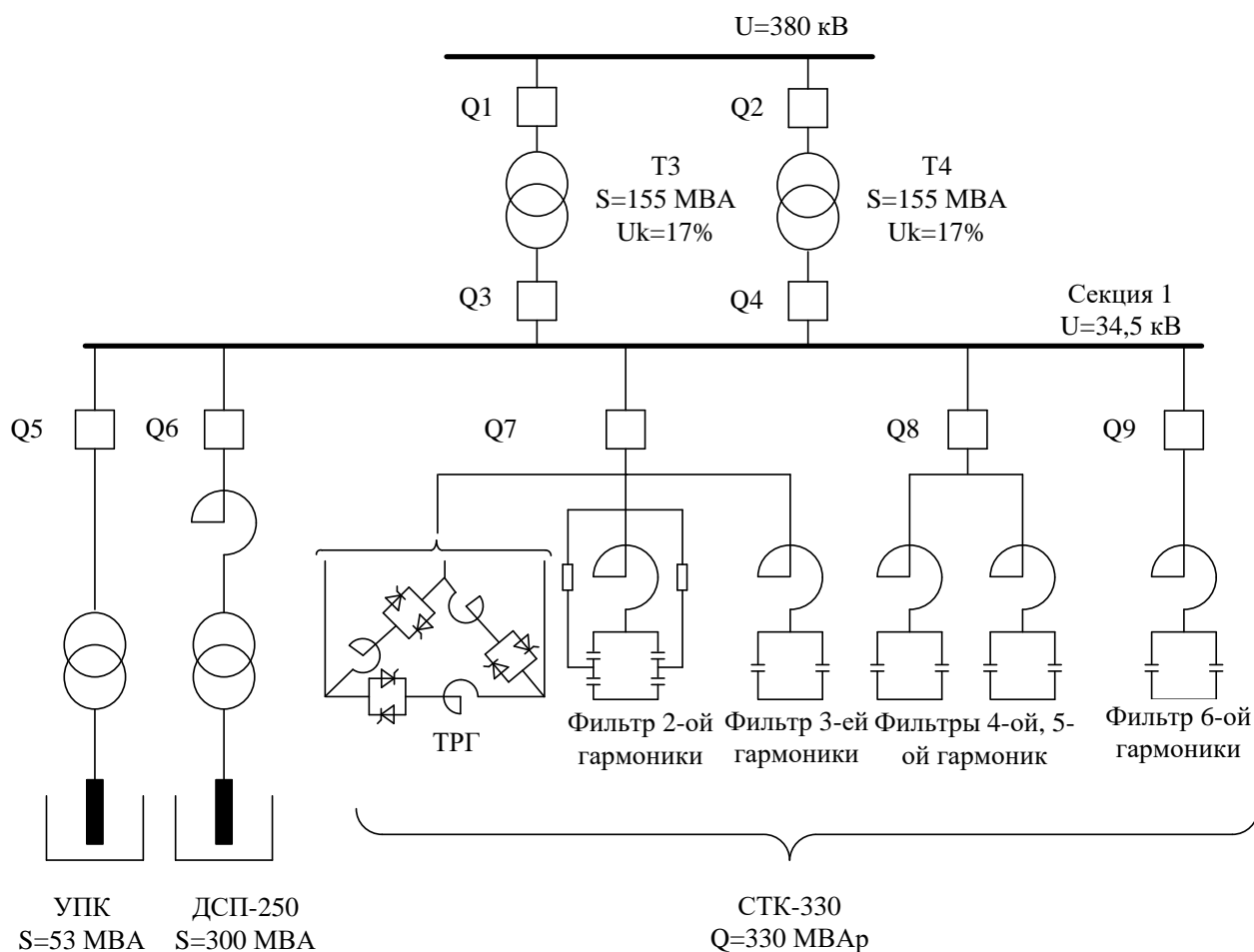


Рисунок 2.9- Упрощенная схема СТК 330 МВАр ЗАО «ММК Metalurji»

Фильтры генерируют в сеть реактивную мощность, величина которой не регулируется и зависит только от уровня напряжения в точке подключения. Переизбыток реактивной мощности компенсируется потреблением ТРГ. Опыт

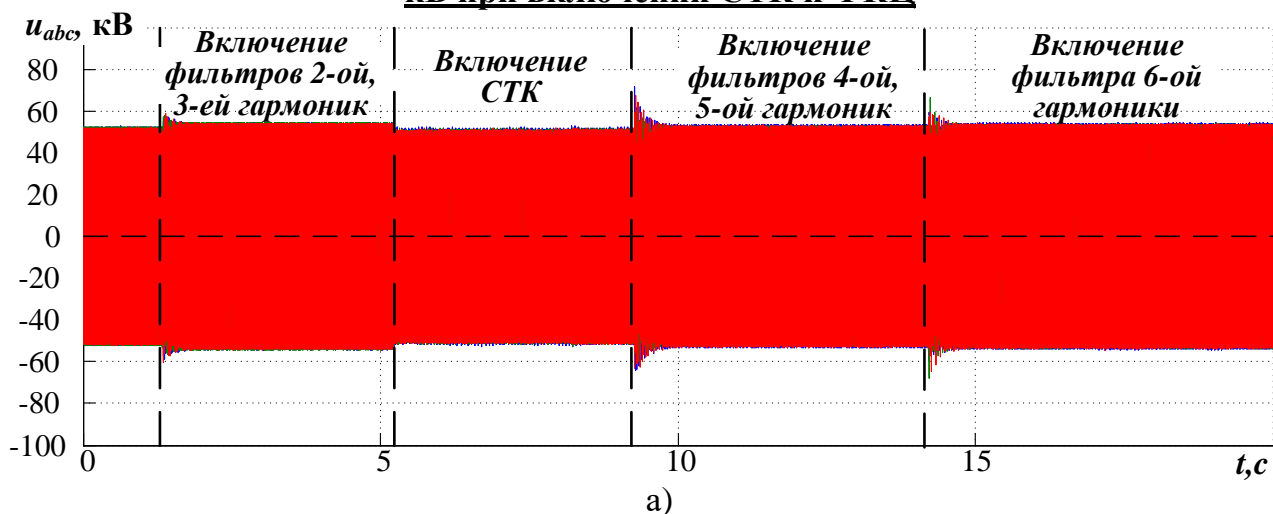
эксплуатации показал, что одновременное включение всех фильтров вызывает сильное перенапряжение в точке подключения СТК. В связи с этим на металлургическом заводе «ММК Metalurji» применяют поэтапное включение ФКЦ. Сначала включают выключатель Q_7 , через который подключают к сети фильтры 2-ой, 3-ей гармоник и ТРГ. При этом тиристоры находятся в закрытом состоянии. Через выдержку времени система управления ТРГ формирует импульсы на отпирание тиристоров. Далее через определенный интервал времени включают выключатель Q_8 , подключая к сети фильтры 4-ой и 5-ой гармоник, через определенную выдержку времени включают фильтр 6-ой гармоники. За счет использования поэтапного включения ФКЦ снижается амплитуда перенапряжений на секции шин 34,5 кВ.

Анализ экспериментально полученных мгновенных значений линейных напряжений на секции шин 34,5 кВ показал, что даже при использовании поэтапного включения ФКЦ наблюдаются значительные перенапряжения, которые достигают 30% номинального напряжения (рисунок 2.10).

2.3.2.3 Анализ переходных процессов токов и напряжений, протекающих при работе ДСП-250

Как было отмечено выше, дуговая сталеплавильная печь является электроприемником с нелинейным и резкопеременным характером нагрузки. При работе печи возникает сильное ухудшение показателей качества электроэнергии (ПКЭ) в точке подключения печного трансформатора. Наиболее тяжелым режимом работы ДСП с точки зрения влияния на питающую сеть является начальная стадия плавки. На этой стадии наблюдаются сильные колебания токов и реактивной мощности, вызванные частыми короткими замыканиями и обрывами дуг. Это приводит к сильным колебаниям напряжения на секции шин 34,5 кВ и большим дозам фликера. На подстанции завода ЗАО «ММК Metalurji» были записаны экспериментальные массивы мгновенных значений линейных напряжений в точке подключения печного трансформатора при работе печи на началь-

Мгновенные значения напряжений на секции шин 34,5 кВ при включении СТК и ФКЦ



Действующие значения напряжений на секции шин 35 кВ при включении СТК и ФКЦ (за полпериода частоты)

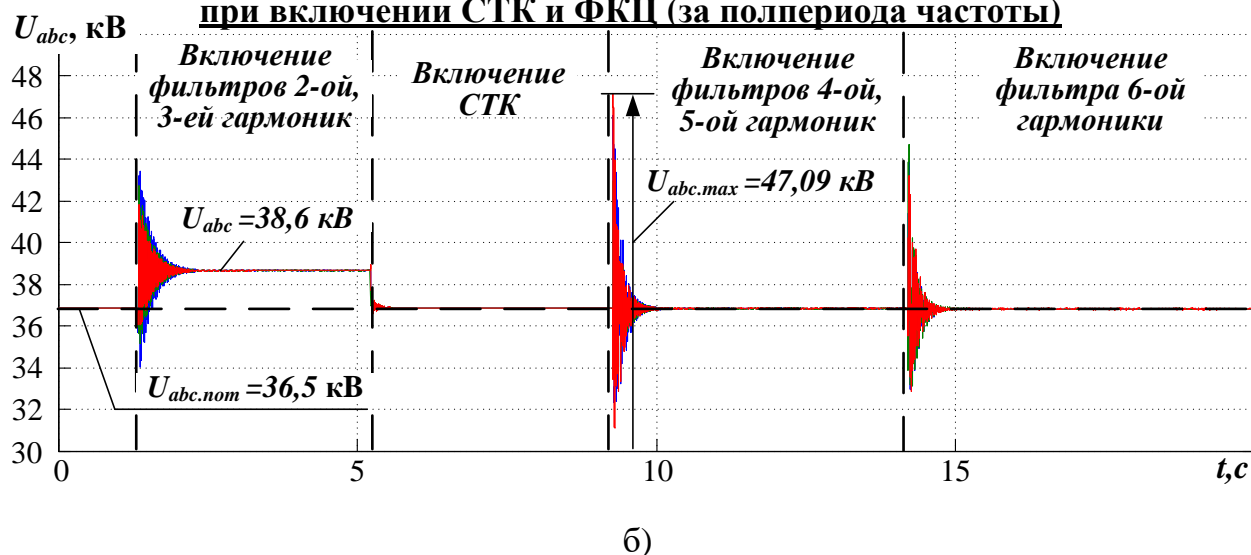


Рисунок 2.10- Кривые мгновенных и действующих значений напряжений на шинах 34,5 кВ при включении ФКЦ

ной стадии плавки для двух режимов работы: при отключенном СТК; при включенном СТК.

Из-за плохих условий горения электрической дуги, токи, потребляемые ДСП-250, сильно искажены, а также наблюдается обрыв дуги фазы А (рисунок 2.11, в), что приводит к возникновению несимметрии напряжения в точке подключения ДСП (рисунок 2.11, а), коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности достигает 7%, что на 75% превышает предельно допустимый. В процессе расплавления шихты происходит постепенное сниже-

ние коэффициента несимметрии (рисунок 2.11, б) до значения меньше предельно допустимого, а также уменьшаются колебания напряжения [81].

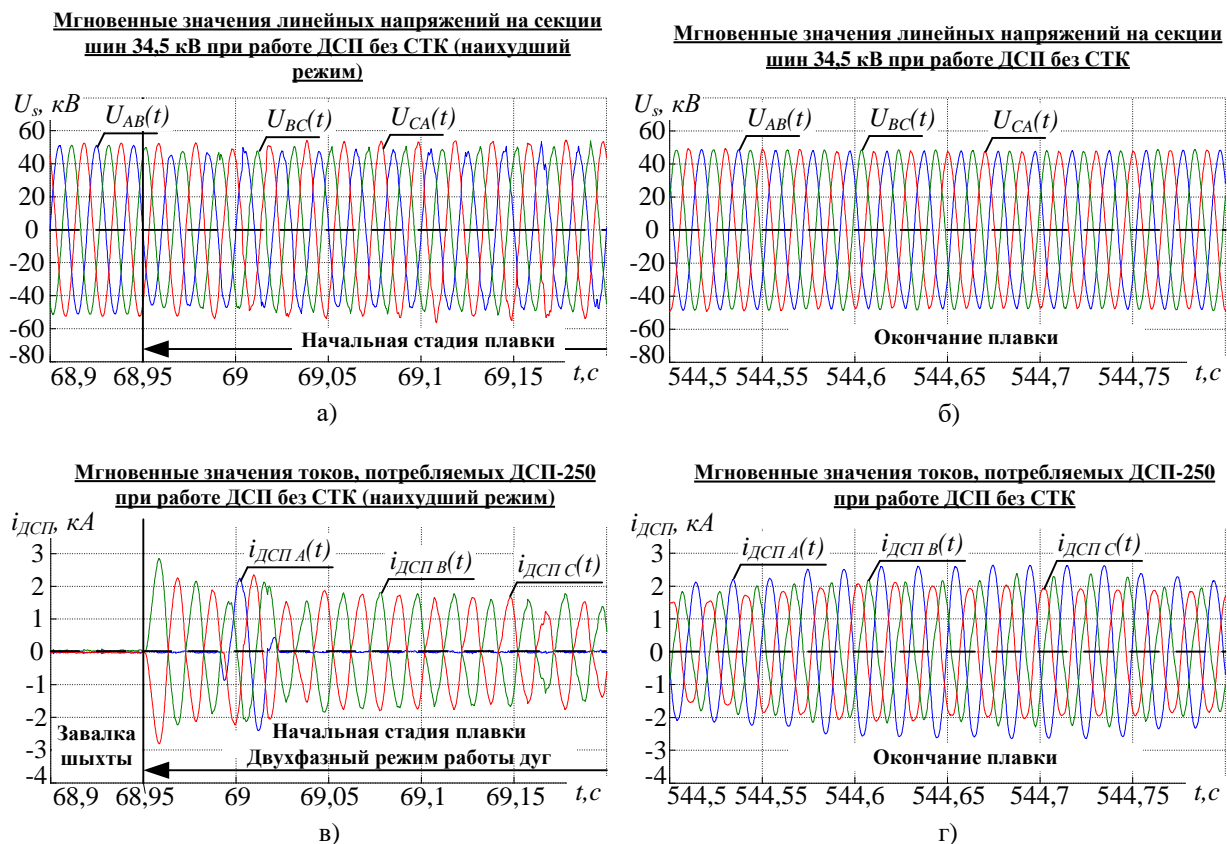


Рисунок 2.11- Мгновенные значения: а, б)линейных напряжений; в,г)токов, потребляемых ДСП-250 при отключенном СТК

Подключение СТК способствует улучшению ПКЭ и снижению несимметрии напряжения (рисунок 2.12, а), коэффициент несимметрии по обратной последовательности не превышает 2%. В процессе расплавления шихты коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности не превышает 0,6%, на конечной стадии доводки температуры металла до необходимого значения составляет 0,3%. Происходит снижение потребляемой реактивной мощности из питающей сети, что приводит к повышению производительности печи [87].

Необходимо отметить, что подключение СТК не устраняет возмущения полностью (рисунок 2.13), на начальной стадии плавки присутствуют искажения напряжения на секции шин 34,5 кВ в точке подключения печного транс-

форматора, которые могут оказать негативное влияние на работу электроприемников чувствительных к качеству напряжения сети.

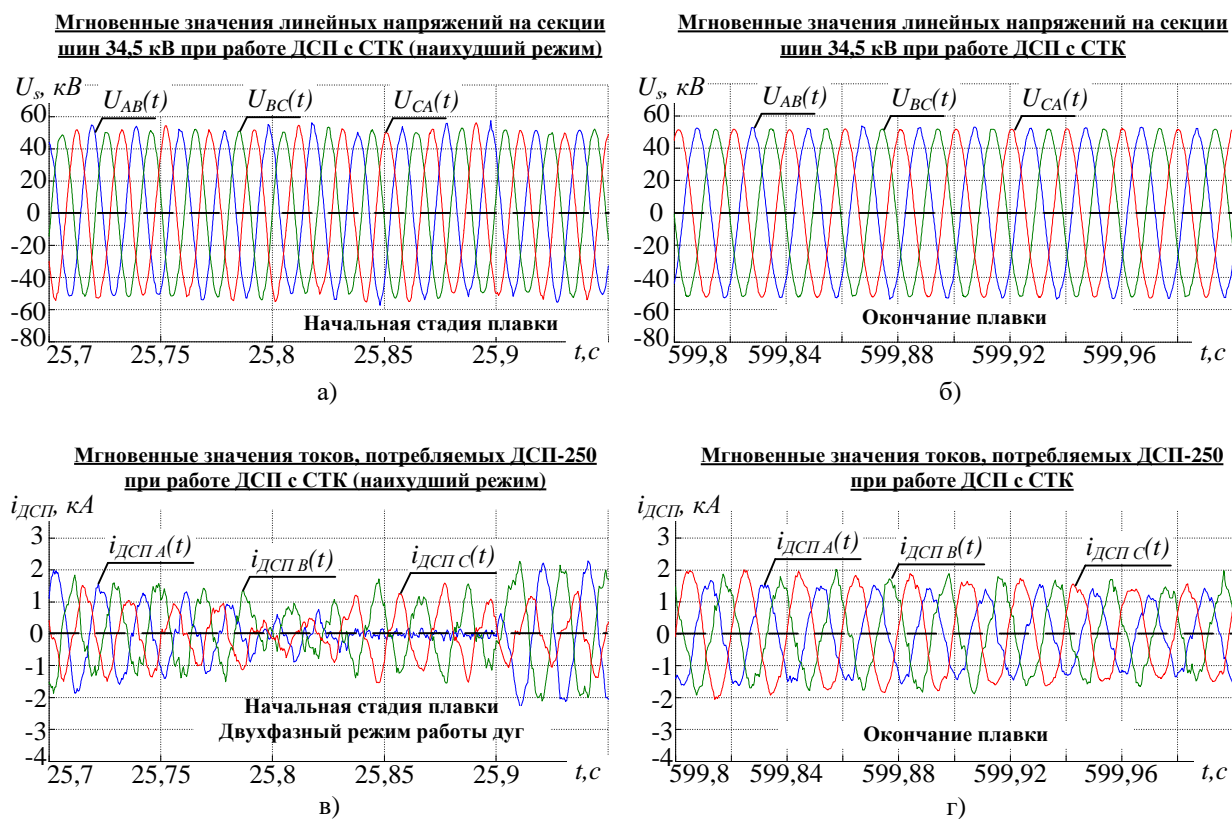


Рисунок 2.12- Мгновенные значения: а, б)линейных напряжений; в,г)токов, потребляемых ДСП-250 при включенном СТК

С помощью специализированного программного комплекса FDA offline были получены фактические параметры изменения мощности дуги, тока дуги, ступени реактора, печного трансформатора и рабочей кривой при работе ДСП-250. Полученные данные будут использованы при проведении исследований и оценки возможности параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов. На рисунке 2.14 приведены графики изменения основных электрических величин за два периода плавки. При работе печи наблюдается повышенное потребление реактивной мощности (рисунок 2.14, а), на всем периоде плавки коэффициент мощности находился в диапазоне от 0,5 до 0,65.

Как было отмечено выше, работа ДСП приводит к сильному ухудшению ПКЭ, появлению несимметрии и колебаниям напряжения в точке подключения

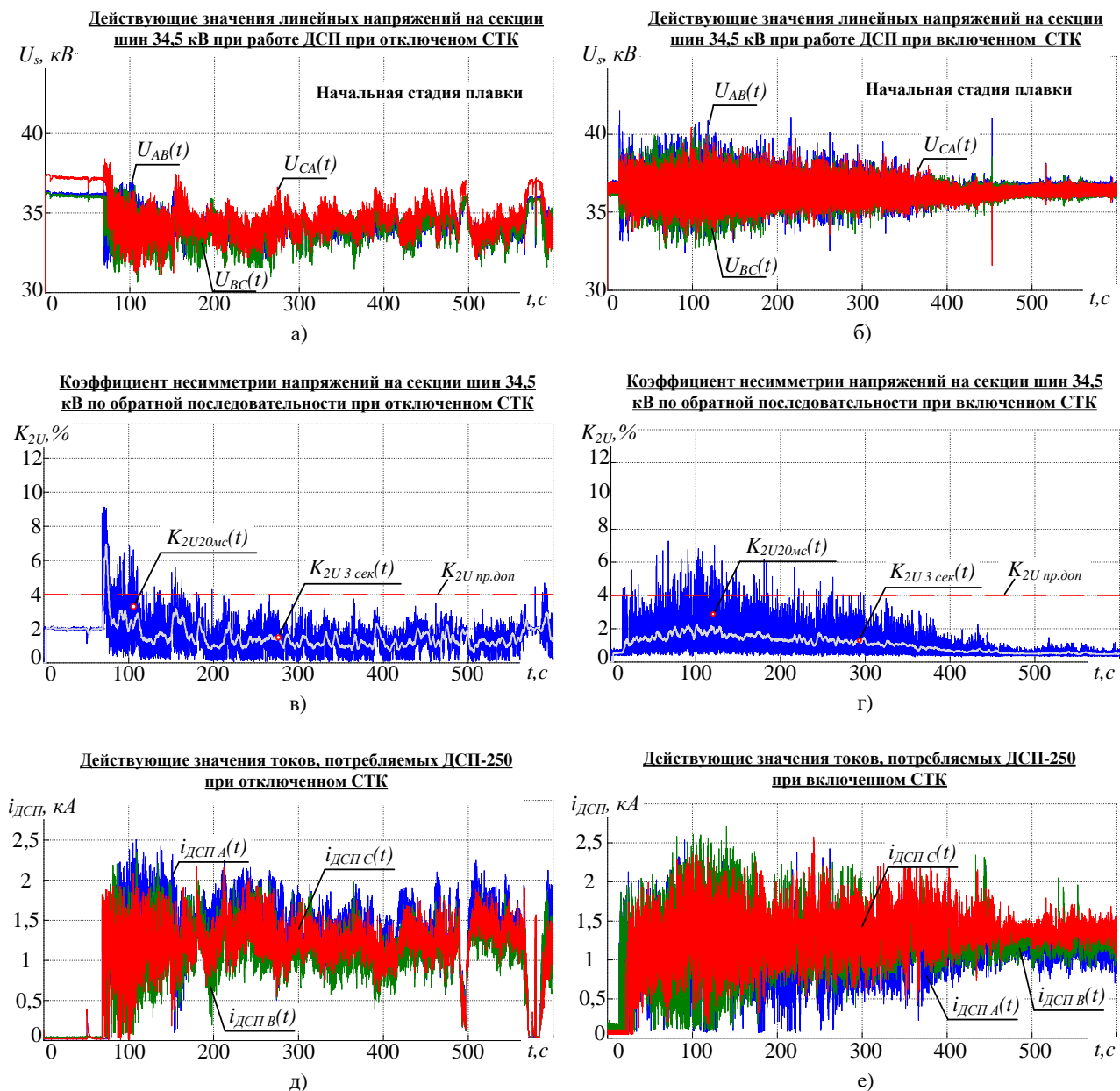


Рисунок 2.13- Основные показатели качества электроэнергии на секции шин 34,5 кВ при работе ДСП-250: а, б) действующие значения линейных напряжений при отключенном и включенном СТК; в,г) коэффициент несимметрии напряжения на секции шин 34,5 кВ по обратной последовательности при отключенном и включенном СТК; д,г) действующие значения токов, потребляемых ДСП-250 при отключенном и включенном СТК печного трансформатора, увеличенному значению потребления реактивной мощности, а также появлению интергармоник в сетевом напряжении.

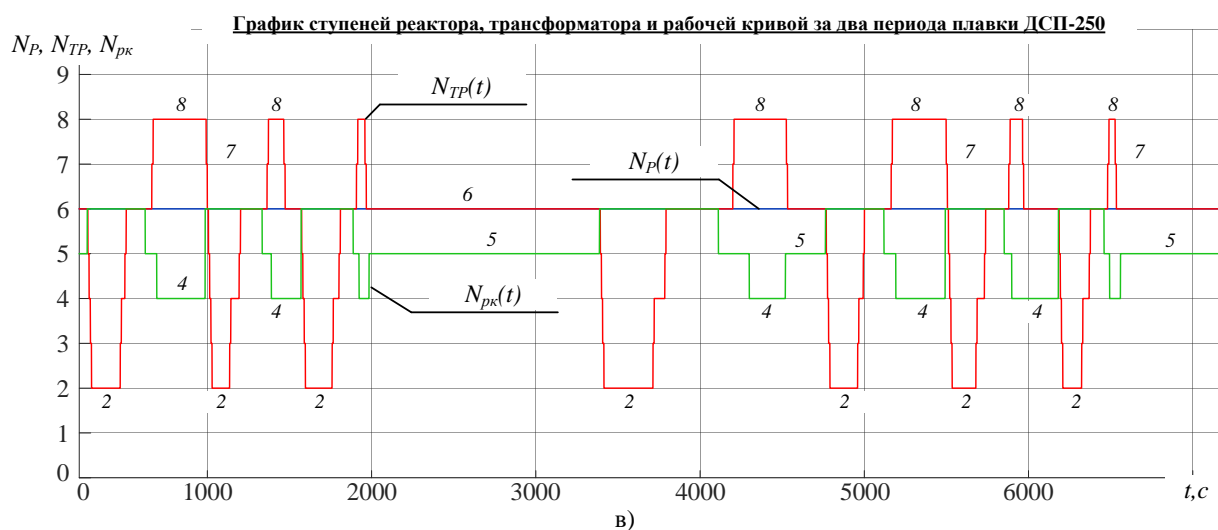
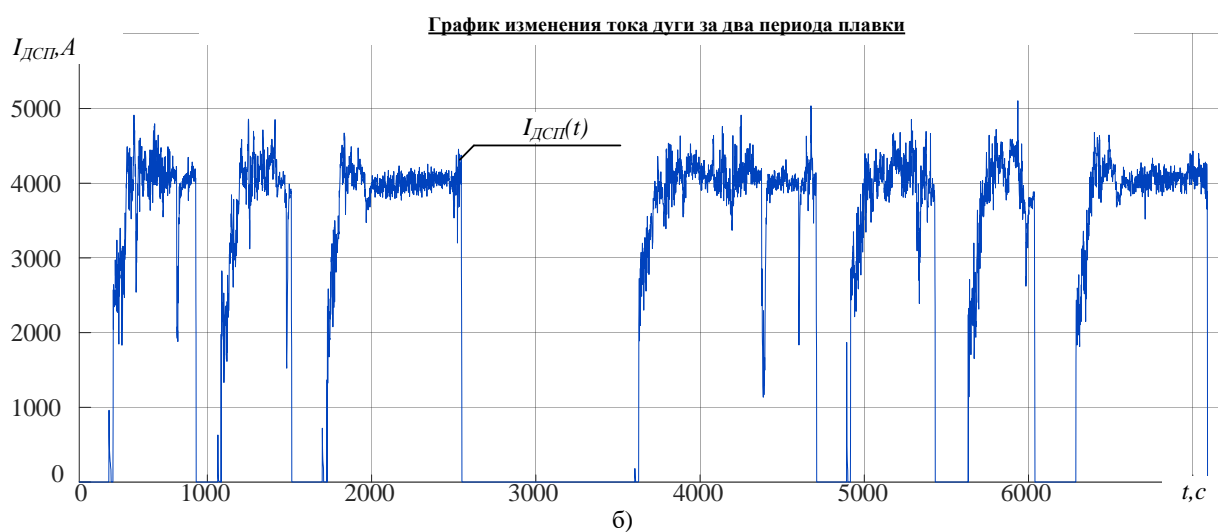
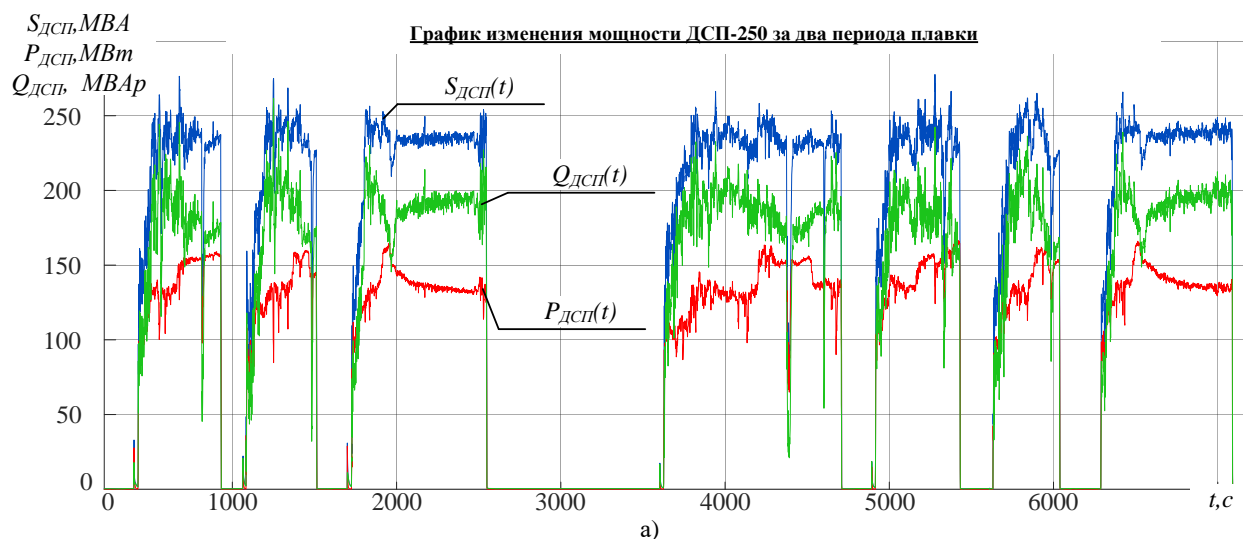


Рисунок 2.14- Графики изменения: а) мощности дуги; б) тока дуги; в) ступени реактора, трансформатора, рабочей кривой ДСП-250 за 2 периода плавки

2.4 Выводы по главе 2

1. Проведен анализ статистики возникновения провалов напряжения на примере металлургического завода «ММК Metalurji», из которого видно, что 65% от всех провалов напряжения составляют однофазные, 30% двухфазные и 5% трехфазные. Причем 70% всех однофазных провалов напряжения характеризуются глубиной от 5 до 50% и длительностью 100-300 мс. Провалы напряжения, трансформируясь во внутривозовскую сеть, приводят к отключению главных электроприводов СГП «1750».

2. Анализ переходных процессов сетевых токов и напряжений в звене постоянного тока АВ главных электроприводов СГП «1750» показал, что в момент возникновения провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 13% происходит увеличение токов, потребляемых АВ, в 1,45 раз относительно потребляемого тока в нормальном режиме работы сети, а также к несимметрии. Несимметрия токов, потребляемых АВ, вызывает увеличение колебаний напряжения в звене постоянного тока, амплитуда которых достигает 5,8% от номинального уровня. При большей глубине провала напряжения происходит отключение главных электроприводов СГП «1750» внутренними защитами ПЧ-АВ. Количество аварийных отключений в год прокатного комплекса по причине несимметричных провалов напряжения в среднем составляет 56 раз. Аварийное отключение прокатного комплекса сопровождается значительным экономическим ущербом.

3. Результаты экспериментальных исследований режимов работы электросталеплавильного комплекса показали, что при работе ДСП возникают сильное ухудшение показателей качества напряжения сети в точке подключения, возникновению несимметрии и колебаний напряжения. Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности на начальной стадии плавки составляет 7%, что на 75% превышает предельно допустимое значение по ГОСТ 32144-2013 (а также EN50160:2010). Включение печного трансформатора на холостом ходу приводит к броску тока намагничивания, амплитуда ко-

торого во много раз больше номинального значения, в точке подключения ПТ возникают провалы напряжения, а также включение ФКЦ СТК приводит к возникновению перенапряжения, значение которого достигает 30% от номинального напряжения. При объединении на параллельную работу прокатного и электросталеплавильного комплекса искажения напряжения сети, возникающие при работе электросталеплавильного комплекса, могут оказать негативное влияние на работу преобразователей частоты с активными выпрямителями.

4. Для дальнейших исследования возможности повышения устойчивости работы главных электроприводов СГП при несимметричных провалах напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК необходима разработка имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», с возможностью проведения исследований режимов работы ПЧ-АВ при компенсации провалов напряжения, а также анализа переходных процессов токов и напряжении АВ при различных стадиях плавки ДСП-250, при включении печного трансформатора на холостом ходу, при включении ФКЦ, с учетом экспериментальных значений напряжения сети.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА «ДУГОВАЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНАЯ ПЕЧЬ-СТК- ПЧ-АВ»

Для проведения исследований возможности параллельной работы главных электроприводов СГП «1750» на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильного комплекса, а также для дальнейших исследований повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при отклонениях напряжения необходимо разработать усовершенствованную имитационную модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», функционирующего на металлургическом заводе «ММК Metalurji», г.Дёртйол, Турция.

Усовершенствованная имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» должна включать в себя:

- модель питающей сети 380/34,5 кВ, с возможностью моделирования провалов напряжения различной глубины и длительности;
- модель СТК с фильтрами высших гармоник и системой управления с пофазным регулированием напряжения;
- модель ДСП-250, состоящую из реактора, печного трансформатора, короткой сети и электрической дуги. В модели ДСП необходимо реализовать возможность случайного характера изменения токов электрической дуги по частоте и амплитуде с использованием экспериментально полученных массивов мгновенных значений токов, потребляемых ДСП-250.

При моделировании агрегат печь-ковш не учитываем, так как его негативное влияние на сеть во много раз меньше чем работа ДСП на начальной стадии плавки.

Усовершенствованная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» позволит провести исследования эффективности способа повышения надежности ПЧ-АВ за счет резервов реактивной мощности СТК, предложенного в работе [21].

3.1 Разработка имитационной модели главных электроприводов стана горячей прокатки «1750»

Как было отмечено выше, стан горячей прокатки «1750» состоит из шести клеток: 2 черновых и 4 чистовых. Силовые схемы главных электроприводов СГП выполнены по идентичной схеме, в связи с этим допустимо разработать модель для одного привода. Для проведения исследований разработаем имитационную модель главного электропривода черновой клетки R_1 . Основные параметры привода приведены во второй главе.

3.1.1 Расчет параметров и разработка имитационной модели питающей сети

Во второй главе было отмечено, что электроснабжение завода, осуществляется по ВЛ 380 кВ, для преобразования уровня напряжения используются 4 силовых трансформатора (рисунок 2.1). Соединение обмоток силовых трансформаторов выполнено по схеме Y/Δ поэтому соотношение между величинами остаточных напряжений на высокой и низкой стороне трансформаторов не пропорционально. Произведем расчет остаточных напряжений на стороне 34,5 кВ при однофазном провале напряжения фазы А в сети 380 кВ. Для определения остаточных напряжений на низкой стороне трансформатора воспользуемся методом симметричных составляющих [32,35]. Для этого представим напряжение в виде суммы трех симметричных составляющих: прямой, обратной и нулевой последовательностей (3.1).

$$\begin{cases} U_A = U_1 + U_2 + U_0; \\ U_B = a^2 \cdot U_1 + a \cdot U_2 + U_0; \\ U_C = a \cdot U_1 + a^2 \cdot U_2 + U_0. \end{cases} \quad (3.1)$$

где U_1 - напряжение прямой последовательности;

U_2 - напряжение обратной последовательности;

U_0 - напряжение нулевой последовательности;

a - оператор поворота $a = e^{j120^\circ}$, $a^2 = e^{j240^\circ}$.

Составляющие напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей определим по формуле (3.2):

$$\begin{cases} U_1 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + a \cdot U_B + a^2 \cdot U_C); \\ U_2 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + a^2 \cdot U_B + a \cdot U_C); \\ U_0 = \frac{1}{3} \cdot (U_A + U_B + U_C). \end{cases} \quad (3.2)$$

Выражение для определения фазных напряжений на вторичной стороне трансформатора запишем для фазы А (3.3) [14]:

$$U_a = \frac{(U_1 + U_2 + U_0 - a^2 \cdot U_1 - a \cdot U_2 - U_0)}{\sqrt{3} \cdot k} = \frac{(1 - a^2) \cdot U_1 + (1 - a) \cdot U_2}{\sqrt{3} \cdot k} = \frac{(U_1 \cdot e^{j30^\circ} + U_2 \cdot e^{-j30^\circ})}{k}, \quad (3.3)$$

где k -линейный коэффициент трансформации, $k = \sqrt{3} \cdot \frac{\omega_Y}{\omega_\Delta}$.

Из формулы 3.3 видно, что линейные напряжения на вторичной стороне трансформатора не содержат составляющих нулевой последовательности. По системе уравнений (3.4) определим фазные напряжения на вторичной стороне трансформатора:

$$\begin{cases} U_a = \frac{U_A - U_B}{\sqrt{3} \cdot k}; \\ U_b = \frac{U_B - U_C}{\sqrt{3} \cdot k}; \\ U_c = \frac{U_C - U_A}{\sqrt{3} \cdot k}. \end{cases} \quad (3.4)$$

Воспользуемся графическим сложением векторов (рисунок 3.1), определим остаточные линейные напряжения на вторичной стороне трансформатора. Линейные напряжения во внутривоздушной сети равны $U_{ab}=U_{bc}= 0,96$, $U_{ca}= 0,84$, при провале напряжения фазы А глубиной 30% в сети 380 кВ.

Из сказанного выше следует, что при разработке имитационной модели главного электропривода СГП «1750» для проведения исследований, негативного влияния несимметрии питающего напряжения необходимо учитывать сеть 380 кВ.

В имитационной модели питающая сеть выполнена из управляемого трехфазного источника напряжения 380 кВ, параметры сети представлены трехфазным активным и индуктивным сопротивлениями. Сетевые трансформа-

торы выполнены из блоков трехфазных трансформаторов (Three-phase transformer), включенных на параллельную работу.

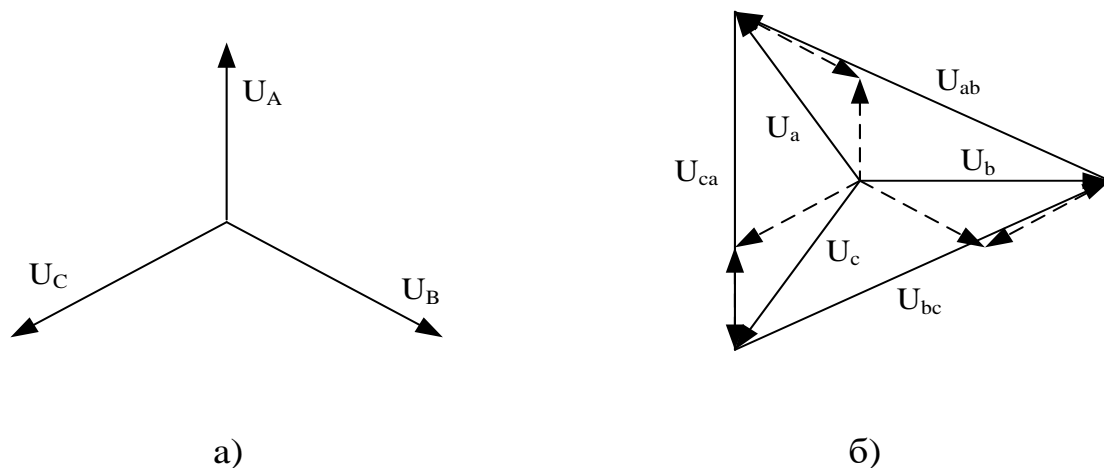


Рисунок 3.1- Векторные диаграммы напряжений при однофазном провале напряжения глубиной 30% в сети 380 кВ: а- на первичной стороне трансформатора; б- на вторичной стороне трансформатора

Индуктивное сопротивление сети 380 кВ определим по формуле (3.5):

$$X_{\text{сети } 380 \text{ кВ}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{(S_{\text{кз.мин } 380 \text{ кВ}} + S_{\text{кз.макс. } 380 \text{ кВ}}) / 2}, \quad (3.5)$$

где $U_{\text{л}}$ - номинальное межфазное напряжение, 380 кВ;

$S_{\text{кз.мин } 380 \text{ кВ}}$ - мощность короткого замыкания сети 380 кВ для минимального режима, 7800 МВА;

$S_{\text{кз.макс } 380 \text{ кВ}}$ - мощность короткого замыкания сети 380 кВ для максимального режима, 18000 МВА.

Активное сопротивление сети 380 кВ определим по формуле (3.6):

$$R_{\text{сети } 380 \text{ кВ}} = 0,1 \cdot X_{\text{сети } 380 \text{ кВ}}. \quad (3.6)$$

Параметры сети 34,5 кВ определим по формулам (3.7-3.8):

$$X_{\text{сети } 34,5 \text{ кВ}} = \frac{U_{\text{л}}^2}{S_{\text{кз.сети } 34,5 \text{ кВ}}}, \quad (3.7)$$

где $U_{\text{л}}$ - номинальное межфазное напряжение, 34,5 кВ;

$S_{\text{кз.сети } 34,5 \text{ кВ}}$ - мощность короткого замыкания сети 380 кВ для минимального режима, 1525 МВА.

$$R_{\text{сети } 34,5 \text{ кВ}} = 0,1 \cdot X_{\text{сети } 34,5 \text{ кВ}} \cdot \quad (3.8)$$

Рассчитанные по формулам (3.5-3.8) параметры активного и индуктивного сопротивлений приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1- Параметры активного и индуктивного сопротивлений сети

Наименование параметра	Значение, Ом
$R_{\text{сети } 380 \text{ кВ}}$	1,119
$X_{\text{сети } 380 \text{ кВ}}$	11,193
$R_{\text{сети } 34,5 \text{ кВ}}$	0,078
$X_{\text{сети } 34,5 \text{ кВ}}$	0,78

Параметры сетевых трансформаторов приведены в таблице 3.2 (сопротивления трансформаторов приведены к вторичной стороне).

После проведения всех расчетов в программном продукте *MatLab* с приложением *Simulink* была разработана имитационная модель питающей сети, позволяющая моделировать однофазные, двухфазные и трехфазные провалы напряжения различной глубины и длительности.

Таблица 3.2- Параметры сетевых трансформаторов

Параметр	$S_{\text{ном}}$, МВА	$U_{\text{ВН.ном}}$, кВ	$U_{\text{НН.ном}}$, кВ	U_k , %	$\Delta P_{\text{кз}}$, кВт	$\Delta P_{\text{ХХ}}$, кВт	$X_{\text{тр}}$, Ом	$R_{\text{тр}}$, Ом
Значение	155	380	34,5	18,6	525,674	70	1,43	0,03

3.1.2 Разработка имитационной модели согласующих трансформаторов

Для улучшения гармонического состава тока, потребляемого АВ, и качества выпрямленного напряжения в звене постоянного тока главные электроприводы стана горячей прокатки «1750» выполнены по двенадцатипульсной схеме выпрямления. В связи с применением двенадцатипульсной схемы выпрямления в гармоническом составе токов, потребляемых АВ, и напряжении в точке подключения преобразователя присутствуют гармоники порядка $12 \cdot n \pm 1$.

Отсутствие гармоник кратных шести в напряжении на первичной стороне трансформаторов объясним на примере седьмой гармоники (рисунок 3.2).

Вторичные напряжения трансформаторов по основной гармонике имеют угол сдвига равный 30 градусам. Относительно седьмой гармоники угол сдвига больше в 7 раз и составляет 210 градусов (рисунок 3.2, а). Напряжение фазы В относительно фазы А сдвинуто на угол 120 градусов (рисунок 3.2, б). Напряжение фазы А на первичной стороне трансформатора со схемой соединения обмоток в «треугольник» определяется как разность фазных напряжений фаз А и В, с учетом коэффициента трансформации (рисунок 3.2, в). Таким образом, напряжения седьмой гармоники на первичной стороне трансформаторов T_1 и T_2 находятся в противофазе и взаимокompенсуют друг друга (рисунок 3.2, г). Суждения верны и для других гармоник кратных шести [37-40].

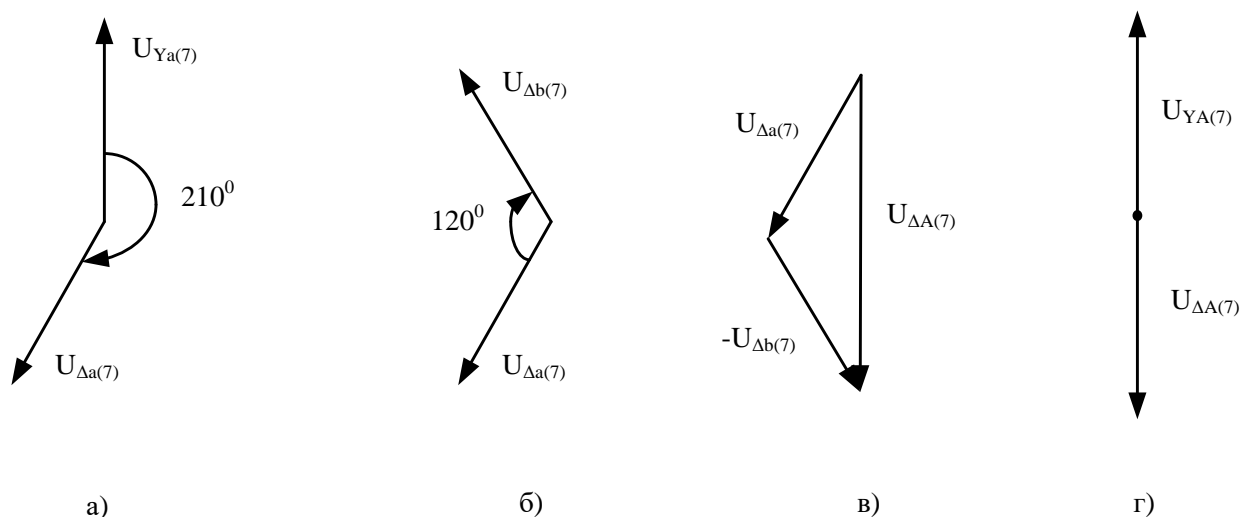


Рисунок 3.2- Векторные диаграммы напряжения седьмой гармоники на первичной и вторичной сторонах трансформаторов

Из сказанного выше следует, что для получения двенадцатипульсовой схемы выпрямления необходимо, чтобы напряжения на вторичной стороне трансформаторов имели угол сдвига в 30 градусов. В связи с этим на СГП «1750» применяется нестандартная схема соединения обмоток трансформаторов. Первичные обмотки трансформаторов T_1 и T_2 включены последовательно, первичная обмотка трансформатора T_1 имеет шесть выводов, начало которой подключены к питающей сети, концы -к началам первичной обмотки транс-

форматора T_2 . Вторичные обмотки первого трансформатора собраны по схеме «звезда», второго - по схеме «треугольник».

Для моделирования согласующих трансформаторов в программном продукте *MatLab* с приложением *Simulink* используем блок *Linear Transformer*, который позволяет замоделировать нестандартную группу соединения первичных обмоток трансформаторов. По формуле (3.9), определим полное сопротивление трансформатора:

$$Z_{тр.нн} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{ном.нн}^2}{S_{тр.ном}}, \quad (3.9)$$

где U_k - напряжение короткого замыкания, 8 % (Приложение Б);

$U_{ном.нн}$ - номинальное напряжения вторичной обмотки трансформатора, 3,16 кВ;

$S_{тр.ном}$ - номинальная мощность трансформатора, 4800 кВА.

Активное сопротивление трансформатора определяем по формуле (3.10):

$$R_{тр.нн} = \Delta P_{кз} \cdot \frac{U_{ном.нн}^2}{S_{тр.ном}^2}, \quad (3.10)$$

где $\Delta P_{кз}$ - потери короткого замыкания трансформатора, 41 кВт.

Индуктивное сопротивление трансформатора определим по формуле (3.11):

$$X_{тр.нн} = \sqrt{Z_{тр.нн}^2 - R_{тр.нн}^2}. \quad (3.11)$$

Рассчитанные по формулам (3.9-3.11) параметры трансформаторов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3- Параметры согласующих трансформаторов

Трансформатор	$S_{ном}$, кВА	$U_{ном.нн}$, кВ	$Z_{Тр.НН}$, Ом	$R_{Тр.НН}$, Ом	$X_{Тр.НН}$, Ом	$L_{Тр}$, мГн
T_1, T_2	4800	3,160	0,166	0,0177	0,165	0,53

В окно параметров блока *Linear Transformer* необходимо вводить параметры обмоток трансформатора в относительных единицах, для этого по формуле (3.12) определим базисное сопротивление трансформатора. Считаем, что

сопротивления первичной и вторичной обмоток равны, базисное сопротивление определяем от половины номинальной мощности трансформатора.

$$R_{base2} = \frac{U_{ном.НН}^2}{0,5 \cdot S_{тр.ном}} = \frac{3160^2}{0,5 \cdot 4800000} = 4,161 \text{ Ом.} \quad (3.12)$$

Базисную индуктивность трансформатора определим по формуле (3.13):

$$L_{base2} = \frac{R_{base2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{4,161}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,01325 \text{ Гн.} \quad (3.13)$$

Активное сопротивление и индуктивность вторичной обмотки трансформатора в относительных единицах определяем по формулам (3.14), (3.15):

$$R_{p.u.2} = \frac{R_{тр.НН}}{R_{base2}} = \frac{0,0177}{4,161} = 0,0043 \text{ о.е.} \quad (3.14)$$

$$L_{p.u.2} = \frac{L_{тр.НН}}{L_{base2}} = \frac{0,53 \cdot 10^{-3}}{0,01325} = 0,0397 \text{ о.е.} \quad (3.15)$$

Для приведения активного сопротивления и индуктивности вторичной обмотки трансформатора к первичной необходимо по формуле (3.16) определить коэффициент трансформации:

$$n = \frac{U_{ном.ВН}}{U_{ном.НН}} = \frac{17,25}{3,16} = 5,46. \quad (3.16)$$

По формулам (3.17), (3.18) определим активное сопротивление и индуктивность трансформатора, приведенные к первичной обмотки:

$$R_{тр.ВН} = R_{тр.НН} \cdot n^2 = 0,0177 \cdot 5,46^2 = 0,53 \text{ Ом.} \quad (3.17)$$

$$L_{тр.ВН} = L_{тр.НН} \cdot n^2 = 0,00053 \cdot 5,46^2 = 0,0157 \text{ Гн.} \quad (3.18)$$

Определим базисное сопротивление и индуктивность первичной обмотки трансформатора по формулам (3.19), (3.20).

$$R_{base1} = \frac{U_{ном.ВН}^2}{0,5 \cdot S_{тр.ном}} = \frac{17250^2}{0,5 \cdot 4800000} = 123,98 \text{ Ом.} \quad (3.19)$$

$$L_{base1} = \frac{R_{base1}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{123,98}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,395 \text{ Гн.} \quad (3.20)$$

Активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки трансформатора в относительных единицах определяем по формулам (3.21), (3.22):

$$R_{p.u.1} = \frac{R_{тр.вн}}{R_{base1}} = \frac{0,53}{123,98} = 0,0043 \text{ о.е.} \quad (3.21)$$

$$L_{p.u.1} = \frac{L_{тр.вн}}{L_{base1}} = \frac{15,7 \cdot 10^{-3}}{0,395} = 0,0397 \text{ о.е.} \quad (3.22)$$

В относительных единицах параметры трансформатора для первичной и вторичной обмоток одинаковы. Расчет параметров трансформаторов выполнен, проведем проверку полученных данных. Для этого проведем опыт короткого замыкания. При подаче на первичную обмотку трансформатора напряжения короткого замыкания при закороченной вторичной обмотке, по последней будет протекать ток, равный номинальному току трансформатора. Для проведения опыта короткого замыкания разработаем простую имитационную модель, которая состоит из трехфазного синусоидального источника напряжения, сопротивления источника, равного 20% от сопротивления трансформатора. Структурная схема для проведения опыта короткого замыкания приведена на рисунке 3.3.

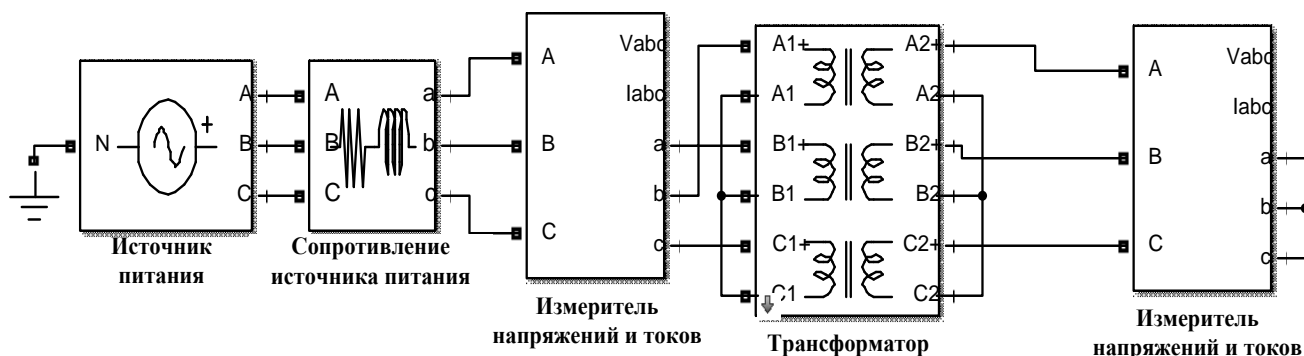


Рисунок 3.3- Имитационная модель для проведения опыта короткого замыкания

Напряжение источника принимаем равным 8% от первичного номинального напряжения трансформатора, номинальный ток трансформатора равен 878 А. Из анализа полученных данных видно, что ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора равен 875,5 А, что в 1,003 меньше номинального тока. Из проведенного опыта делаем вывод, что параметры обмоток трансформатора определены верно. Рассчитанные параметры трансформаторов приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4- Рассчитанные параметры согласующих трансформаторов

Параметр	Значение
U_1 , кВ	17,25
U_2 , кВ	3,160
$S_{ном}$, кВА	4800
R_1 , о.е.	0,0043
L_1 , о.е.	0,0397
R_2 , о.е.	0,0043
L_2 , о.е.	0,0397

3.1.3 Разработка имитационной модели силовой схемы трехуровневого активного выпрямителя

Во второй главе было отмечено, что главные электроприводы СПП выполнены по двенадцатипульсной схеме выпрямления на базе трехуровневых преобразователей частоты с активными выпрямителями и автономными инверторами напряжения с использованием преобразователей частоты ACS 6000 производства фирмы АВВ.

Главный электропривод черновой клетки состоит из синхронного электродвигателя мощностью 6600 кВт, который подключен к двум параллельно работающим ПЧ мощностью 8200 кВт (рисунок 3.4) с общим звеном постоянного тока [41-52]. Для синхронизации с питающей сетью используется трансформатор со схемой соединения Y/Y, который преобразует напряжение 34,5 кВ в напряжение 100 В, необходимое для платы управления. Питание обмотки возбуждения СД осуществляется от тиристорного преобразователя, подключенного к трехфазному трансформатору с расщепленной обмоткой 34,5/0,4 кВ. Расщепленные обмотки трансформатора используются: первая - для одной клетки, вторая - для другой.

Одноименные выходы переменного тока автономных инверторов напряжения соединены между собой и подключены к синхронному двигателю. При анализе экспериментально полученных нагрузочных диаграмм работы главных

электроприводов клеток СТГ «1750» (рисунок 2.6) ток, потребляемый АВ, совпадает по форме с моментом вращения на валу СД.

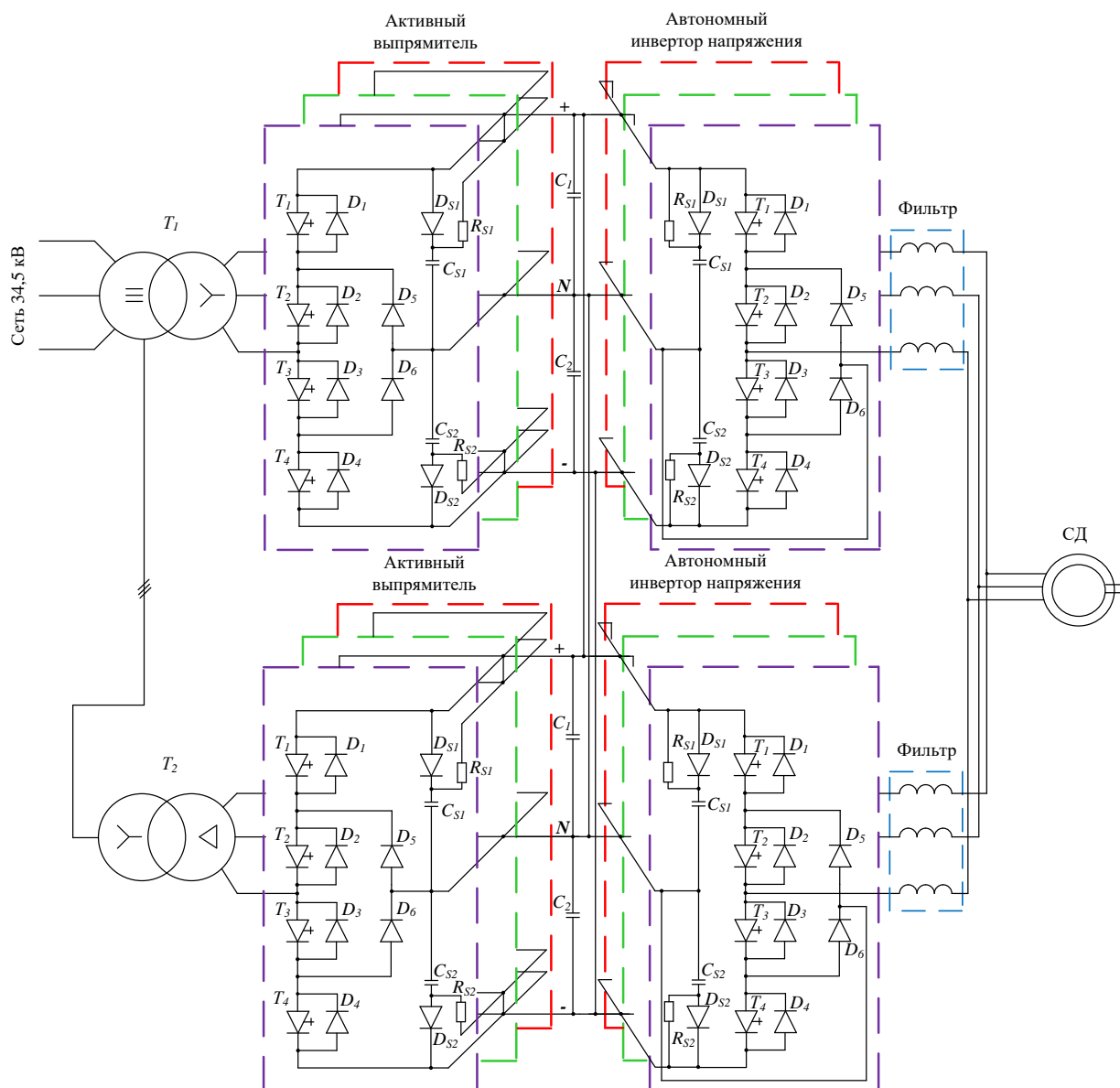


Рисунок 3.4- Упрощенная силовая схема главного электропривода черновой клетки R_1 СГП «175»

Как было отмечено выше ток, потребляемый АВ, совпадает по форме с моментом на валу электродвигателя, в связи с этим при моделировании АИН и СД допускается представить упрощенно в виде управляемого источника постоянного тока. Активные выпрямители в модели представлены блоками «*Three-Level Bridge*» из библиотеки *Power Electronics*, звено постоянного тока представлено двумя конденсаторами с эквивалентными емкостями звена постоянного тока исследуемого ПЧ. В окно параметров блока «*Three-Level Bridge*» прописаны параметры

активного сопротивления и емкости снабберной цепи, а также выбрать тип полупроводниковых элементов. Упрощенная схема имитационной модели главного электропривода СГП представлена на рисунке 3.5.

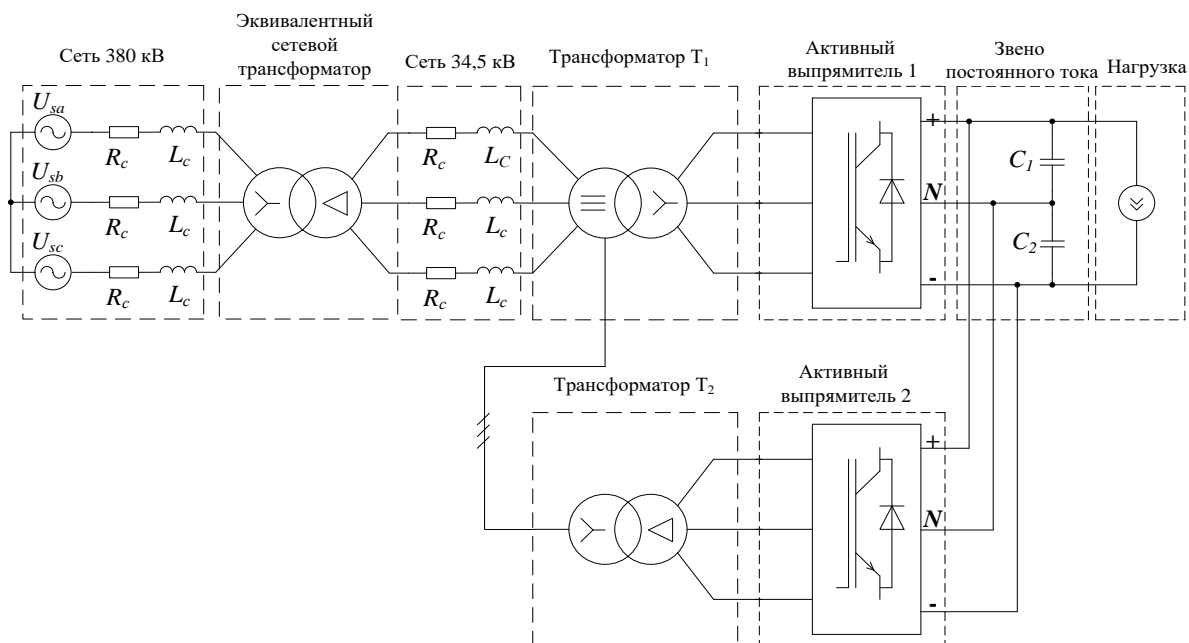


Рисунок 3.5- Упрощенная схема имитационной модели главного электропривода черновой клетки R_1 СГП «1750»

3.1.4 Разработка математической модели системы управления АВ

Для разработки математической модели системы управления (СУ) АВ преобразуем схему, представленную на рисунке 3.5, к упрощенному виду. Представим АВ в виде источников ЭДС, подключенных к источникам ЭДС питающей сети через эквивалентные активные сопротивления и индуктивности согласующих трансформаторов, приведенных к первичной стороне трансформатора (рисунок 3.6) [51-58].

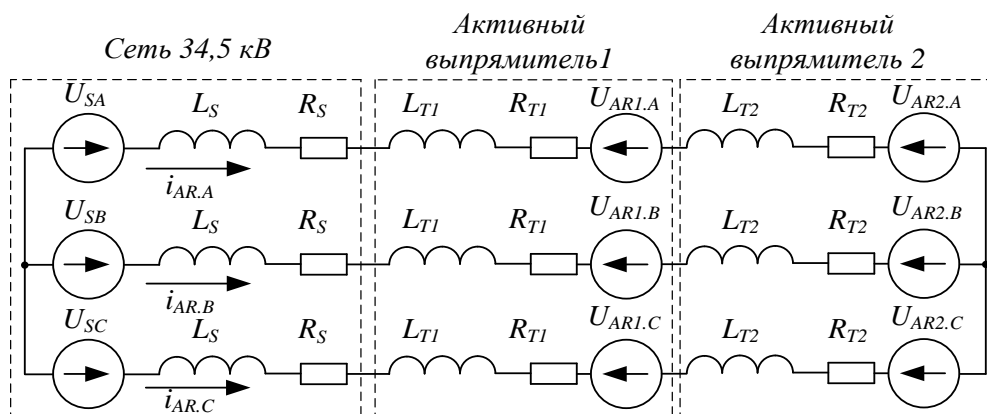


Рисунок 3.6- Упрощенная схема замещения главного электропривода черновой клетки R_1 СГП «1750»

Приведение напряжения к первичной стороне трансформатора на входе первого АВ выполним по формуле (3.23):

$$\begin{cases} U_{AR1.A} = U_{AR1.a} \cdot k_{t1}; \\ U_{AR1.B} = U_{AR1.b} \cdot k_{t1}; \\ U_{AR1.C} = U_{AR1.c} \cdot k_{t1}; \end{cases} \quad (3.23)$$

где $U_{AR1.a}$, $U_{AR1.b}$, $U_{AR1.c}$ -фазные напряжения на входе первого АВ на вторичной стороне трансформатора T_1 ;

k_{t1} - коэффициент трансформации трансформатора T_1 (Y/Y).

Коэффициент трансформации трансформатора T_1 определим по формуле (3.24):

$$k_{t1} = \frac{U_{BH.\phi}}{U_{HH.\phi}}, \quad (3.24)$$

где $U_{BH.\phi}$ - фазное напряжение на первичной стороне трансформатора;

$U_{HH.\phi}$ - фазное напряжение на вторичной стороне трансформатора.

По формуле (3.25) приведем напряжения на входе второго АВ к первичной стороне трансформатора T_2 :

$$\begin{cases} U_{AR2.A} = U_{AR2.a} \cdot k_{t2}; \\ U_{AR2.B} = U_{AR2.b} \cdot k_{t2}; \\ U_{AR2.C} = U_{AR2.c} \cdot k_{t2}; \end{cases} \quad (3.25)$$

где $U_{AR2.a}$, $U_{AR2.b}$, $U_{AR2.c}$ -фазные напряжения на входе второго АВ на вторичной стороне трансформатора T_2 ;

k_{t2} - коэффициент трансформации трансформатора T_2 (Y/ Δ).

Коэффициент трансформации трансформатора T_2 определим по формуле (3.26):

$$k_{t2} = \frac{U_{BH.\phi}}{U_{HH.\Delta}}, \quad (3.26)$$

где $U_{BH.\phi}$ - фазное напряжение на первичной стороне трансформатора;

$U_{HH.\Delta}$ - линейное напряжение на вторичной стороне трансформатора.

Из формулы (3.26) следует, что коэффициент трансформации трансформатора Т2 в $\sqrt{3}$ раз меньше коэффициента трансформации трансформатора Т1, тогда формула примет вид (3.27):

$$k_{t2} = \frac{k_{t1}}{\sqrt{3}}. \quad (3.27)$$

Преобразуем выражение (3.25) для приведения напряжений на входе второго АВ к виду (3.28):

$$\begin{cases} U_{AR2.A} = U_{AR2.a} \cdot \frac{k_{t1}}{\sqrt{3}} = U_{AR1.A}; \\ U_{AR2.B} = U_{AR2.b} \cdot \frac{k_{t1}}{\sqrt{3}} = U_{AR1.B}; \\ U_{AR2.C} = U_{AR2.c} \cdot \frac{k_{t1}}{\sqrt{3}} = U_{AR1.C}. \end{cases} \quad (3.28)$$

Из выражения (3.28) следует, что напряжения на входе первого и второго АВ, приведенные к первичной стороне трансформаторов, равны и совпадают по фазе. В связи с этим для упрощения схемы замещения напряжения на входе АВ на первичной стороне трансформаторов представим как сумму напряжений (3.29):

$$\begin{cases} U_{AR.A} = U_{AR1.A} + U_{AR2.A} = 2 \cdot U_{AR1.A}; \\ U_{AR.B} = U_{AR1.B} + U_{AR2.B} = 2 \cdot U_{AR1.B}; \\ U_{AR.C} = U_{AR1.C} + U_{AR2.C} = 2 \cdot U_{AR1.C}. \end{cases} \quad (3.29)$$

Сопротивление питающей сети 34,5 кВ много меньше сопротивления трансформаторов, в связи с этим в синтезе контуров регулирования токов им можно пренебречь. Сопротивления трансформаторов Т₁ и Т₂ представим в виде эквивалентного активного сопротивления и индуктивности (3.30):

$$\begin{cases} R_{\text{эКВ}} = R_{T1} + R_{T2} = 2 \cdot R_{T1}; \\ L_{\text{эКВ}} = L_{T1} + L_{T2} = 2 \cdot L_{T1}. \end{cases} \quad (3.30)$$

После проведенных преобразований упрощенная схема замещения главного электропривода черновой клетки R_1 СГП «1750» представлена на рисунке 3.7.

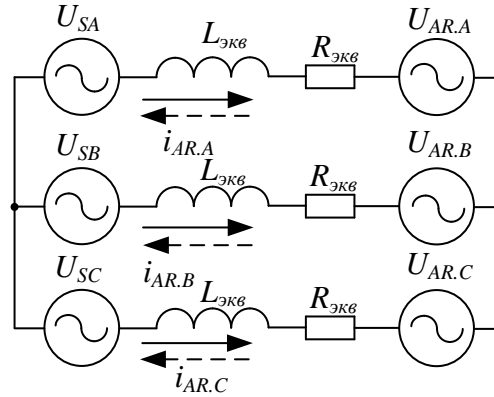


Рисунок 3.7- Упрощенная схема замещения главного электропривода черновой клетки R_1 СГП «1750»

Система равновесия токов и напряжений для представленной схемы имеет вид (3.31):

$$\begin{cases} i_{AR.A} \cdot R_{\text{эКВ}} + L_{\text{эКВ}} \cdot p \cdot i_{AR.A} = U_{SA} - U_{AR.A}; \\ i_{AR.B} \cdot R_{\text{эКВ}} + L_{\text{эКВ}} \cdot p \cdot i_{AR.B} = U_{SB} - U_{AR.B}; \\ i_{AR.C} \cdot R_{\text{эКВ}} + L_{\text{эКВ}} \cdot p \cdot i_{AR.C} = U_{SC} - U_{AR.C}. \end{cases} \quad (3.31)$$

Преобразуем систему уравнений (3.31) с учетом формулы (3.30):

$$\begin{cases} 2 \cdot i_{AR.A} \cdot R_{T1} + 2 \cdot L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.A} = U_{SA} - U_{AR.A}; \\ 2 \cdot i_{AR.B} \cdot R_{T1} + 2 \cdot L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.B} = U_{SB} - U_{AR.B}; \\ 2 \cdot i_{AR.C} \cdot R_{T1} + 2 \cdot L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.C} = U_{SC} - U_{AR.C}. \end{cases} \quad (3.32)$$

Систему уравнений (3.32) приведем к виду (3.33):

$$\begin{cases} i_{AR.A} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.A} = \frac{1}{2} U_{SA} - \frac{1}{2} U_{AR.A}; \\ i_{AR.B} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.B} = \frac{1}{2} U_{SB} - \frac{1}{2} U_{AR.B}; \\ i_{AR.C} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.C} = \frac{1}{2} U_{SC} - \frac{1}{2} U_{AR.C}. \end{cases} \quad (3.33)$$

Систему уравнений (3.33) преобразуем с учетом выражения (3.29):

$$\begin{cases} i_{AR.A} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.A} = \frac{1}{2} U_{SA} - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot U_{AR1.A}; \\ i_{AR.B} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.B} = \frac{1}{2} U_{SB} - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot U_{AR1.B}; \\ i_{AR.C} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.C} = \frac{1}{2} U_{SC} - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot U_{AR1.C}. \end{cases} \quad (3.34)$$

Введем упрощение (3.35):

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot U_{SA} = U_{SA}; \\ \frac{1}{2} \cdot U_{SB} = U_{SB}; \\ \frac{1}{2} \cdot U_{SC} = U_{SC}. \end{cases} \quad (3.35)$$

Приведем систему уравнений (3.34) с учетом введенных упрощений к виду:

$$\begin{cases} i_{AR.A} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.A} = U_{SA} - U_{AR1.A}; \\ i_{AR.B} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.B} = U_{SB} - U_{AR1.B}; \\ i_{AR.C} \cdot R_{T1} + L_{T1} \cdot p \cdot i_{AR.C} = U_{SC} - U_{AR1.C}. \end{cases} \quad (3.34)$$

В системе уравнений (3.34) анализируемые параметры изменяются во времени, в связи с этим уравнения баланса токов и напряжений АВ целесообразнее представлять не в трехфазной неподвижной системе координат abc , а в ортогональной вращающейся системе координат dq . Использование ортогональной системы координат в математическом описании СУ АВ позволяет наиболее просто произвести синтез регуляторов токов и напряжений [59-78].

Для перехода из системы координат abc в ортогональную систему dq в математическом пакете *MatLab* с приложением *Simulink* используем блок *abc to dq0 Transformation*, в котором используется преобразование Парка по формулам (3.35):

$$\begin{cases} V_d = \frac{2}{3} \cdot (V_a \cdot \sin(\omega t) + V_b \cdot \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cdot \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})), \\ V_q = \frac{2}{3} \cdot (V_a \cdot \cos(\omega t) + V_b \cdot \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + V_c \cdot \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3})), \\ V_o = \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c). \end{cases} \quad (3.35)$$

Из выражений (3.35) видно, что для преобразования необходима информация о положении вектора положения питающей сети ωt . Для определения положения вектора питающей сети в СУ АВ используется блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), который по измеренным фазным напряжениям сети определяет ωt . В модели для определения вектора положения сети был использован блок PLL , на вход которого поступает информация с датчиков измерения фазных напряжений сети, на выходе формируется угол положения вектора напряжения.

Система уравнений (3.34), преобразованная из неподвижной системы координат abc во вращающуюся систему координат dq , ориентированную по вектору напряжения питающей сети, примет вид [63-66]:

$$\begin{cases} U_{ds} = U_{dAB} + i_d \cdot R + pL \cdot i_d + \omega \cdot L \cdot i_q; \\ U_{qs} = -U_{qAB} + R \cdot i_q + pL \cdot i_q - \omega \cdot L \cdot i_d. \end{cases} \quad (3.36)$$

Система управления АВ выполнена двухконтурной: с внутренним контуром регулирования токов по активной d и реактивной q составляющим, внешним контуром регулирования напряжения в звене постоянного тока (рисунок 3.8). Внутренний контур регулирования токов представлен пропорционально-интегральными регуляторами (ПИ), на входы которых поступают сигналы рассогласования заданных и фактически измеренных токов. Сигналы рассогласования обрабатываются ПИ-регуляторами, на выходе которых формируются заданные напряжения на входе АВ после компенсации перекрестных связей согласно системе уравнения (3.36), напряжения задания поступают на блок вычисления коэффициента модуляции m и угла δ . Рассчитанные коэффициент

модуляции m и угол δ поступают в блок ШИМ, в котором в зависимости от используемого алгоритма ШИМ рассчитываются импульсы управления ключами АВ. Ток задания по активной составляющей формируется во внешнем контуре регулирования напряжения в звене постоянного тока путем сравнения напряжения заданного с фактическим. Сигнал их рассогласования обрабатывается ПИ-регулятором, на выходе которого формируется ток задания по оси d . Как было отмечено ранее, ПЧ-АВ работают с коэффициентом мощности равным 1, в связи с этим ток задания по реактивной составляющей равен 0.

В ПЧ типа ACS6000 для управления ключами АВ используется ШИМ с удалением выделенных гармоник, в зависимости от используемой силовой схемы удаляют наиболее значимые гармоники с относительно низкой частотой переключения. Для исследуемого объекта удалению подлежат гармоники 11,13,23,25, т.е. пять переключений за четверть периода. Подробное описание математической модели ШИМ- модулятора и определение углов переключения для исследуемого объекта приведено в [70-78]. Применение ШИМ с удалением выделенных гармоник позволяет обеспечить благоприятный гармонический состав напряжения в точке подключения ПЧ-АВ при относительно низкой частоте переключений 250 Гц за четверть периода питающего напряжения.

Синтез регуляторов токов по активной и реактивной составляющим и регулятора напряжения в звене постоянного тока выполнены по методу подчиненного регулирования с последующей коррекцией. Коэффициенты усиления подобраны таким образом, чтобы обеспечивалось соотношение:

$$m = \frac{\pi \cdot \sqrt{U_d^2 + U_q^2}}{2 \cdot U_{DC}} \leq 1, \quad (3.37)$$

где U_d, U_q - заданные напряжения на входе АВ по осям d, q ;

U_{DC} - напряжение в звене постоянного тока.

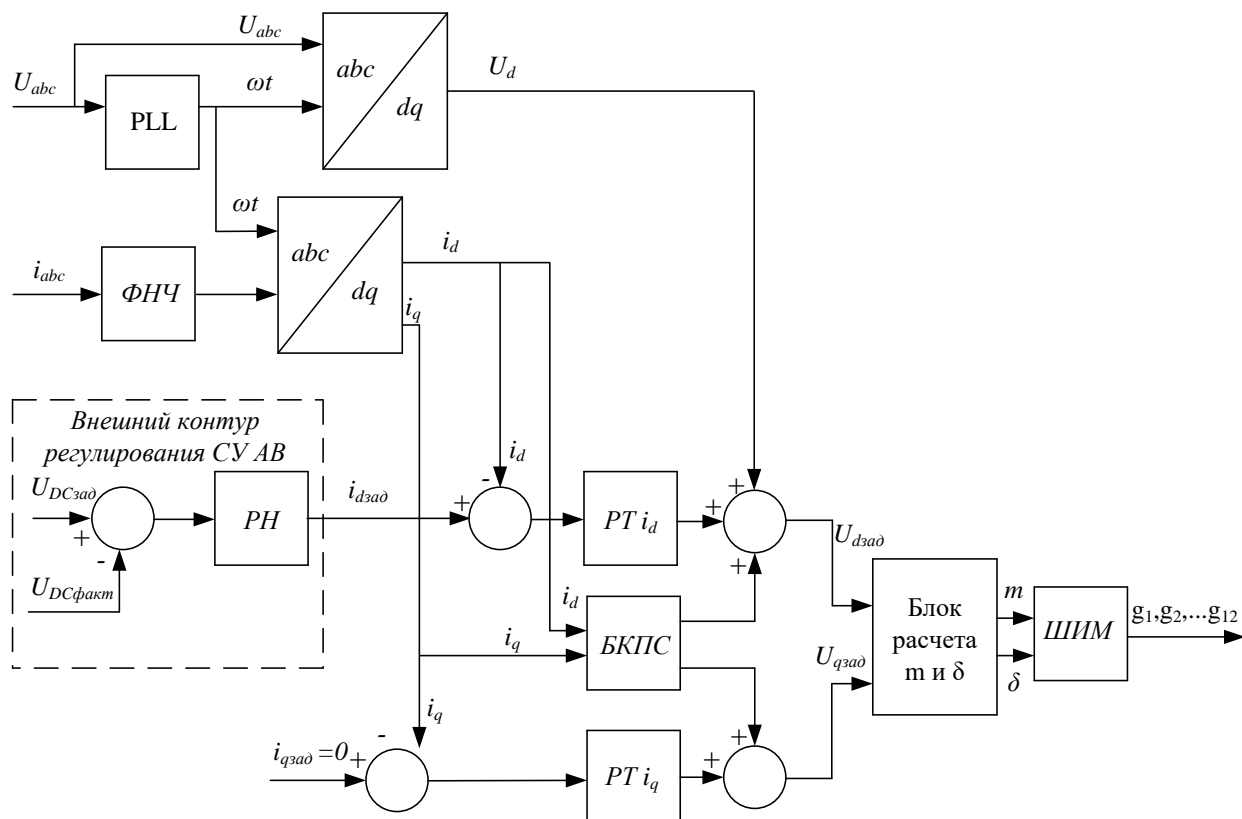


Рисунок 3.8- Структурная схема математической модели системы управления активным выпрямителем

3.2 Разработка имитационной модели дуговой сталеплавильной печи ДСП-250

Создание комплексной имитационной модели дуговой сталеплавильной печи заключается в моделировании электрического контура ДСП. Электрический контур ДСП включает в себя: сопротивление реактора, печного трансформатора, короткой сети и модели электрической дуги. Для разработки имитационной модели печи необходимо произвести расчет параметров схемы замещения электрического контура ДСП-250 [81-86, 93]. По формуле (3.38) определим параметры схемы замещения активного сопротивления обмоток печного трансформатора, приведенные ко вторичной стороне:

$$R'_{тр} = \frac{P_{кз.i} \cdot U_{л.34,5 \text{ кВ}}^2}{S_{ном.i}^2}, \quad (3.38)$$

где $P_{кз.i}$ - потери короткого замыкания печного трансформатора для i -ой ступени трансформатора, кВт ;

$U_{л.34,5 \text{ кВ}}$ - линейное напряжение на вторичной стороне сетевого трансформатора, 34,5 кВ;

$S_{ном.i}$ - номинальная мощность трансформатора для i -ой ступени трансформатора, МВА.

Реактивное сопротивление обмоток трансформатора определим по формуле (3.39):

$$X'_{тр} = \frac{U_{кз.i} \cdot U_{л.34,5 \text{ кВ}}^2 \cdot 10}{S_{ном.i}^2}, \quad (3.39)$$

где $U_{кз.i}$ - напряжение короткого замыкания i -ой ступени трансформатора, %.

Параметры схемы замещения реактора определим по формуле (3.40):

$$X'_p = \frac{\Delta U_i \cdot 10^3}{I_{ном}}, \quad (3.40)$$

где ΔU_i - падение напряжения на реакторе для i -ой ступени реактора, кВ.

Параметры схемы замещения короткой сети принимаем равными: $X_{кк} = 4,25$ мОм, $R_{кк} = 0,27$ мОм.

Результаты расчетов параметров схемы замещения печного трансформатора и реактора приведены в таблице 3.5.

Электрическую дугу в имитационной модели представим виде противо-ЭДС. Упрощенное представление электрической дуги для проведения исследований возможности параллельной работы прокатного и электросталеплавильного комплексов является допустимым.

Противо-ЭДС дуги определяем по формуле (3.41):

$$E_d = U_{ак} + \beta \cdot L_d, \quad (3.41)$$

где $U_{ак}$ - падение напряжения в приэлектродных областях, В;

β - градиент напряжения дуги, В/мм;

L_d - длина столба дуги, мм.

Таблица 3.5- Параметры схемы замещения ПТ и реактора

Ступени РПН	Хтр, мОм/ф	Лтр, мГн/ф	Rтр, мОм/фаза		Хр, Ом/ф	Лр, мГн/ф	Rp, Ом/фаза	
			t = 29,6 C°	t = 75 C°			t = 28,5 C°	t = 75 C°
1	1,353	0,00431	0,01668	0,01955	0,000	0,00000	0,00000	0,00000
2	1,340	0,00427	0,01679	0,01967	0,067	0,00021	0,00028	0,00033
3	1,331	0,00424	0,01696	0,01987	0,154	0,00049	0,00064	0,00075
4	1,315	0,00419	0,01703	0,01996	0,280	0,00089	0,00117	0,00137
5	1,300	0,00414	0,01718	0,02013	0,420	0,00134	0,00175	0,00206
6	1,286	0,00409	0,01728	0,02025	0,560	0,00178	0,00233	0,00274
7	1,273	0,00405	0,01745	0,02044	0,700	0,00223	0,00291	0,00343
8	1,276	0,00406	0,01796	0,02105	0,840	0,00267	0,00350	0,00411
9	1,250	0,00398	0,01773	0,02077	0,980	0,00312	0,00408	0,00480
10	1,239	0,00394	0,01785	0,02091	1,120	0,00356	0,00466	0,00548
11	1,229	0,00391	0,01806	0,02116	1,260	0,00401	0,00524	0,00617
12	1,215	0,00387	0,01814	0,02125	1,400	0,00445	0,00583	0,00685
13	1,203	0,00383	0,01832	0,02146				
14	1,192	0,00379	0,01842	0,02158				
15	1,181	0,00376	0,01861	0,02180				
16	1,173	0,00373	0,01872	0,02193				

Упрощенная схема замещения электрического контура имитационной модели ДСП-250 представлена на рисунке 3.9.

При создании модели была использована имитационная модель системы управления электрическим режимом ДСП-250, представленная в работе [21].

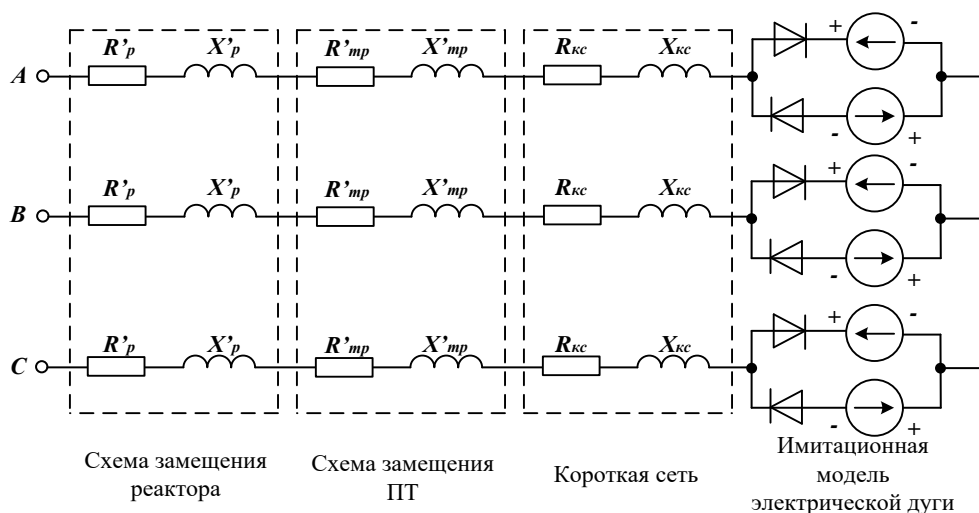


Рисунок 3.9- Упрощенная схема замещения электрического контура ДСП-250

3.3 Разработка имитационной модели СТК 330 МВАр

Имитационная модель СТК-330 МВАр включает в себя: модель тиристорно-реакторной группы, имитационную модель фильтрокомпенсирующих цепей.

Модель ФКЦ представлена фильтрами 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник. Для моделирования фильтров были использованы трехфазные блоки фильтров высших гармоник из библиотеки *SimPowerSystems*. В окно параметров блока *Three-phase harmonic filter* прописываем параметры фильтров высших гармоник, приведенные во второй главе (таблица 2.6).

Для моделирования ТРГ были использованы блоки тиристоры, которые подключены встречно-параллельно, и блоки RLC-Branch для моделирования реакторов. С целью снижения величины токов ректоры ТРГ соединены по схеме «треугольник», схема замещения представлена на рисунке 3.10.

Управления тиристорами осуществляется системой импульсно-фазового управления (СИФУ). Система управления ТРГ формирует импульсы отпираания тиристоры таким образом, чтобы обеспечить симметрирование токов по фазам, полную компенсацию реактивной мощности, потребляемой ДСП. В работе [21] была разработана усовершенствованная система

управления СТК, которая позволяет компенсировать несимметричные провалы напряжения в сети 34,5 кВ. При проведении исследования возможности параллельной работы прокатного и электросталеплавильного комплексов, а также исследования возможности повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при компенсации провалов напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК была использована математическая модель усовершенствованной СУ СТК-330, разработанная в [21, 87-93].

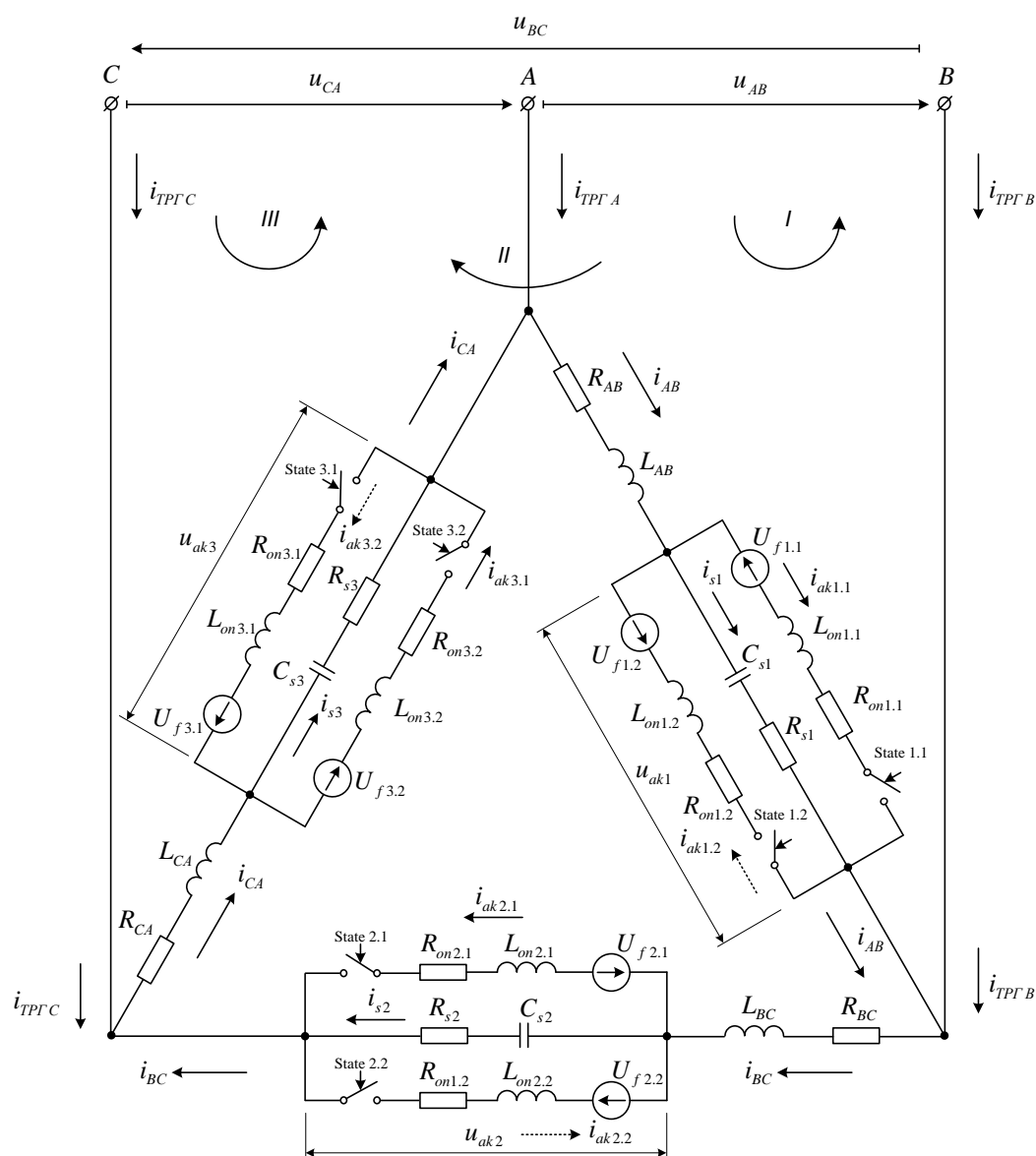


Рисунок 3.10- Упрощенная схема замещения ТРГ СТК

На рисунке 3.11 представлена разработанная имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» в математическом продукте *MatLab* с приложением *Simulink*.

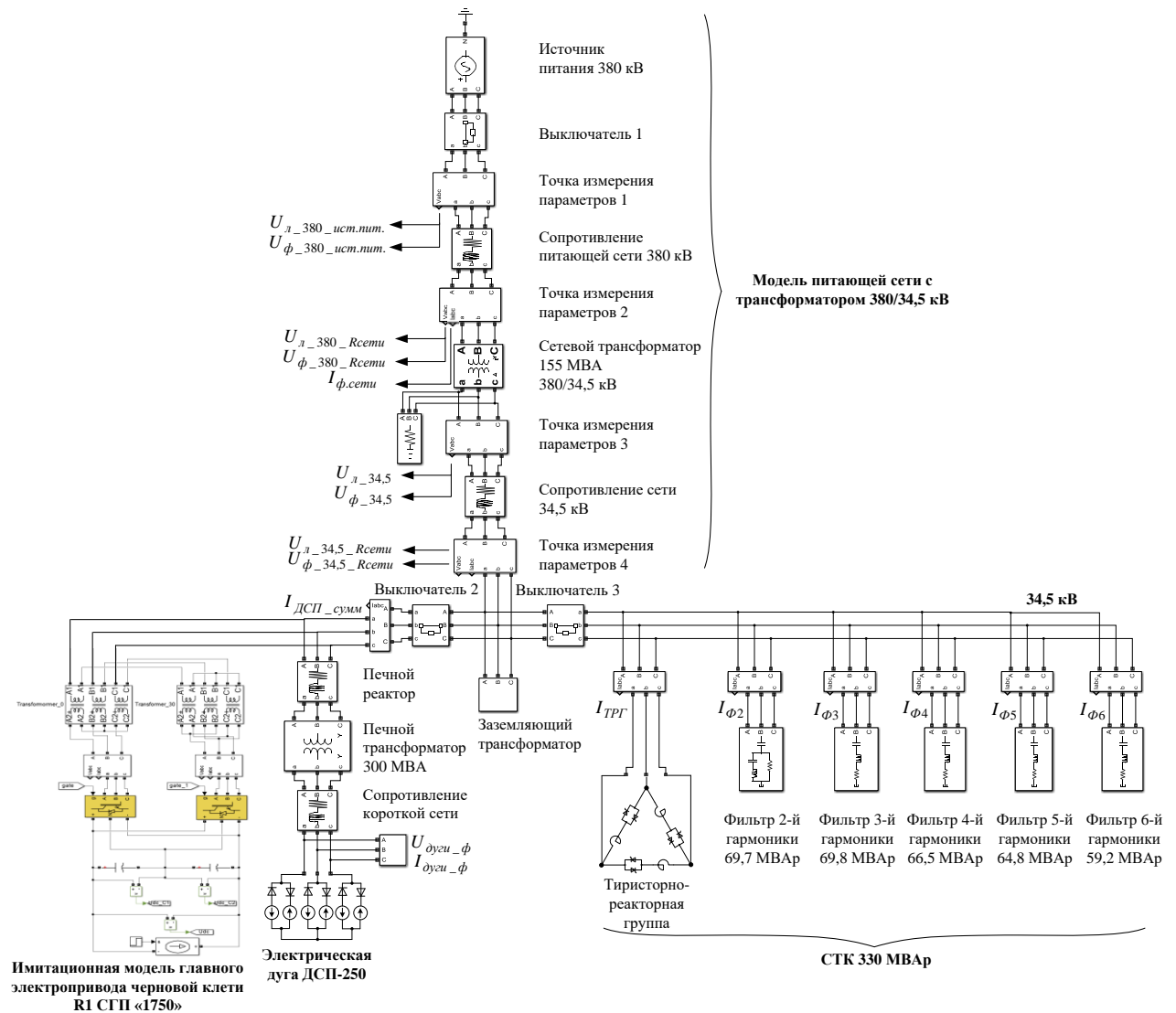


Рисунок 3.11- Имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ»

3.4 Разработка имитационной модели с учетом случайного характера изменения электрической дуги

При проведении исследований возможности параллельной работы ПЧ-АВ и дуговой печи при моделировании необходимо учитывать случайный характер изменения токов электрической дуги по частоте и амплитуде. Для этого необходимо в разработанную модель печи добавить блок расчета управляющих сигналов блоками ЭДС, которыми представлена электрическая дуга.

Управляющие сигналы рассчитываются на основе восстановленных реальных мгновенных значений токов дуг на различных стадиях плавки, а также массивов значений ступеней трансформатора и печного реактора для определения сопротивлений печного трансформатора и реактора.

Управляющий сигнал ЭДС дуги определяется по выражению (3.42):

$$E_{д} = \sqrt{U_1^2 - (I_{д}'(t) \cdot X_{\vartheta})^2} - I_{д}'(t) \cdot R_{\vartheta}, \quad (3.42)$$

где U_1 - напряжение сети 34,5 кВ, приведенное ко вторичной стороне печного трансформатора, кВ;

X_{ϑ} - эквивалентное реактивное сопротивление в приэлектродной области, Ом;

R_{ϑ} - эквивалентное активное сопротивление в приэлектродной области, Ом;

$I_{д}'$ - действующее значение фазного тока дуги, рассчитанное по восстановленным реальным значениям мгновенных токов ДСП-250, А.

Эквивалентные значения активного и реактивного сопротивлений определяем по выражениям (3.43), (3.44):

$$R_{\vartheta} = R_p + R_{TP} + R_{KC}; \quad (3.43)$$

$$X_{\vartheta} = X_p + X_{TP} + X_{KC}, \quad (3.44)$$

где R_{KC} , X_{KC} - активное и реактивное сопротивления короткой сети, Ом;

R_p , X_p - активное и реактивное сопротивления печного реактора, рассчитанные в зависимости от ступени РПН, Ом;

R_{TP} , X_{TP} - активное и реактивное сопротивления печного трансформатора, рассчитанные в зависимости от ступени РПН, Ом.

На рисунке 3.12 представлена упрощенная структурная схема имитационной модели ДСП-250 с учетом случайного изменения токов электрической дуги по частоте и амплитуде.

3.5 Проверка адекватности разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ»

Для проверки адекватности разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» были проведены исследования двух режимов работы:

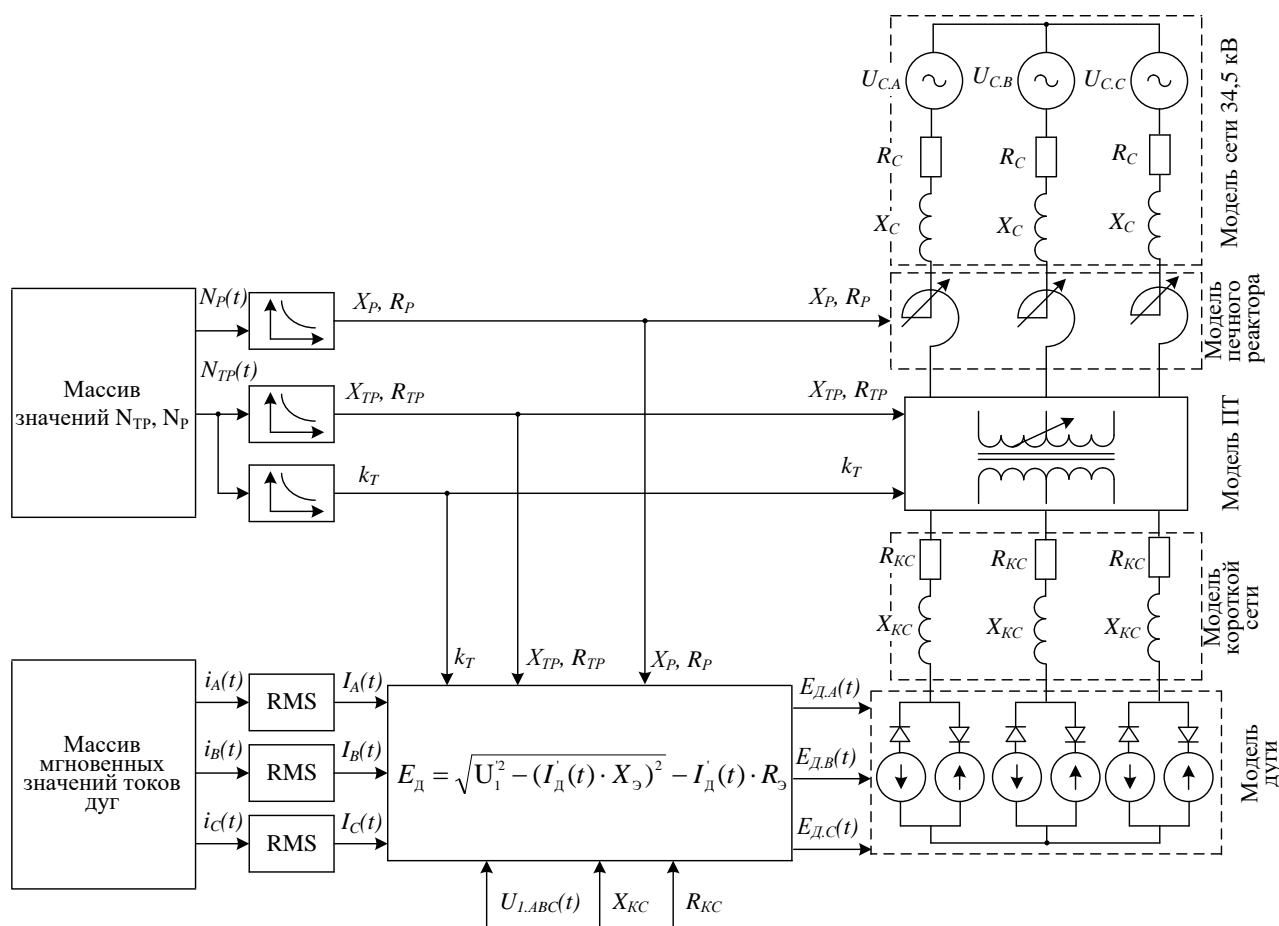


Рисунок 3.12- Имитационная модель ДСП-250 с учетом случайного изменения токов электрической дуги

-моделирование работы ДСП-250 на начальной стадии плавки;

-моделирование работы ПЧ-АВ при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 13% и длительностью 350 мс.

При проверки адекватности имитационной модели печи оценивались основные показатели электрические показатели: полная, активная и реактивная мощности, ток дуги, напряжение на секции шин 34,5 кВ, коэффициент мощности и коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности (рисунок 3.13). Моделирование производили для начальной стадии плавки при отключенном СТК. На начальной стадии плавки были выделены три интервала времени, в которых были определены средние значения, исследуемых показателей. Из сравнения результатов моделирования и экспериментальных данных (таблица 3.6.) наблюдается хорошее совпадение, что подтверждает адекват-

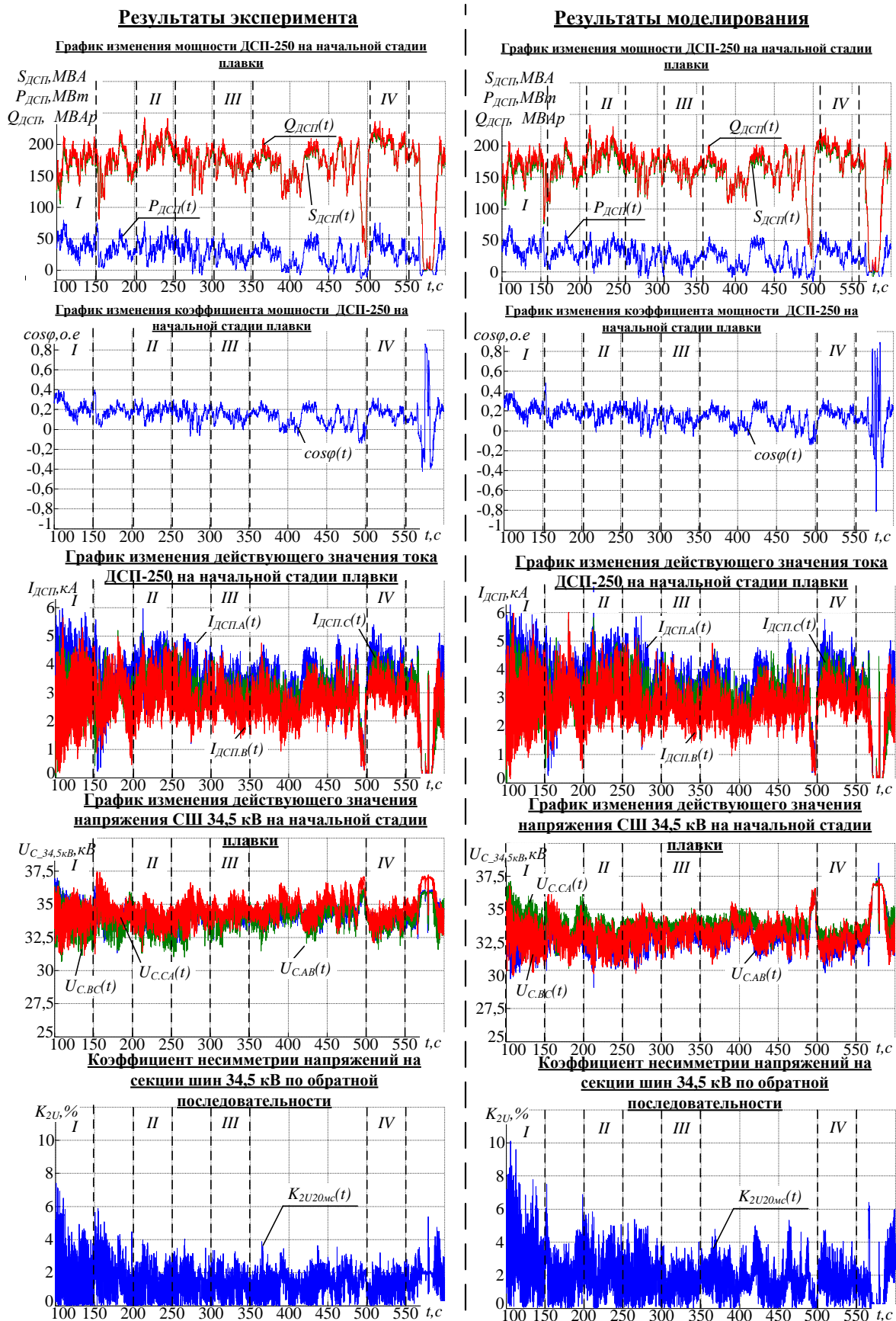


Рисунок 3.13-Сравнительный анализ моделирования и эксперимента основных показатели при работе ДСП-250

ность разработанной имитационной модели ДСП-250.

Таблица 3.6- Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными

Параметр	Источник информации	Исследуемый интервал времени			
		I	II	III	IV
S_{cp} , МВА	Эксперимент	175,81	160,82	157,2	208,9
	Мат.модель	174,75	159,45	156,8	208,2
	От.откл.,%	-0,603	-0,85	-0,14	-0,33
P_{cp} , МВт	Эксперимент	48,53	28,61	27,9	29,9
	Мат.модель	48,14	29,36	26,75	28,75
	От.откл.,%	-0,803	2,62	-4,1	-3,8
Q_{cp} , МВАр	Эксперимент	174,76	158,02	153,8	205,5
	Мат.модель	173,89	156,95	153,2	204,1
	От.откл.,%	-0,49	-0,67	-0,39	-0,68
$\cos\varphi_{cp}$, о.е.	Эксперимент	0,198	0,179	0,162	0,193
	Мат.модель	0,205	0,182	0,159	0,189
	От.откл.,%	3,53	1,67	-1,85	-2,07
$I_{Дсп}$, кА	Эксперимент	3,485	3,745	3,266	3,745
	Мат.модель	3,535	3,82	3,245	3,739
	От.откл.,%	1,43	2,0	-0,64	0,96
$U_{сети.ср}$, кВ	Эксперимент	34,85	34,77	34,82	33,6
	Мат.модель	33,81	34,15	34,15	32,75
	От.откл.,%	-2,98	-1,78	-1,92	-2,53
$K_{2U_{ср}}$, %	Эксперимент	2,25	1,96	1,43	1,46
	Мат.модель	2,29	1,98	1,46	1,49
	От.откл.,%	1,17	1,02	2,09	2,05

Для проверки адекватности имитационной модели ПЧ-АВ, были проведены исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при возникновении в сети 380 кВ однофазного провала напряжения глубиной 13% и длительностью 350 мс. Результаты сравнения переходных процессов, полученных на имитационной модели, с результатами, полученными со специализированного программного обеспечения Drive Window, представлены на рисунке 3.14. Из рисунка 3.14 видно, что раз-

работанная имитационная модель ПЧ-АВ дает хорошее совпадение результатов расчета с экспериментально полученными данными, и может быть использована для проведения исследования возможности параллельной работы прокатного и электросталеплавильного комплексов.

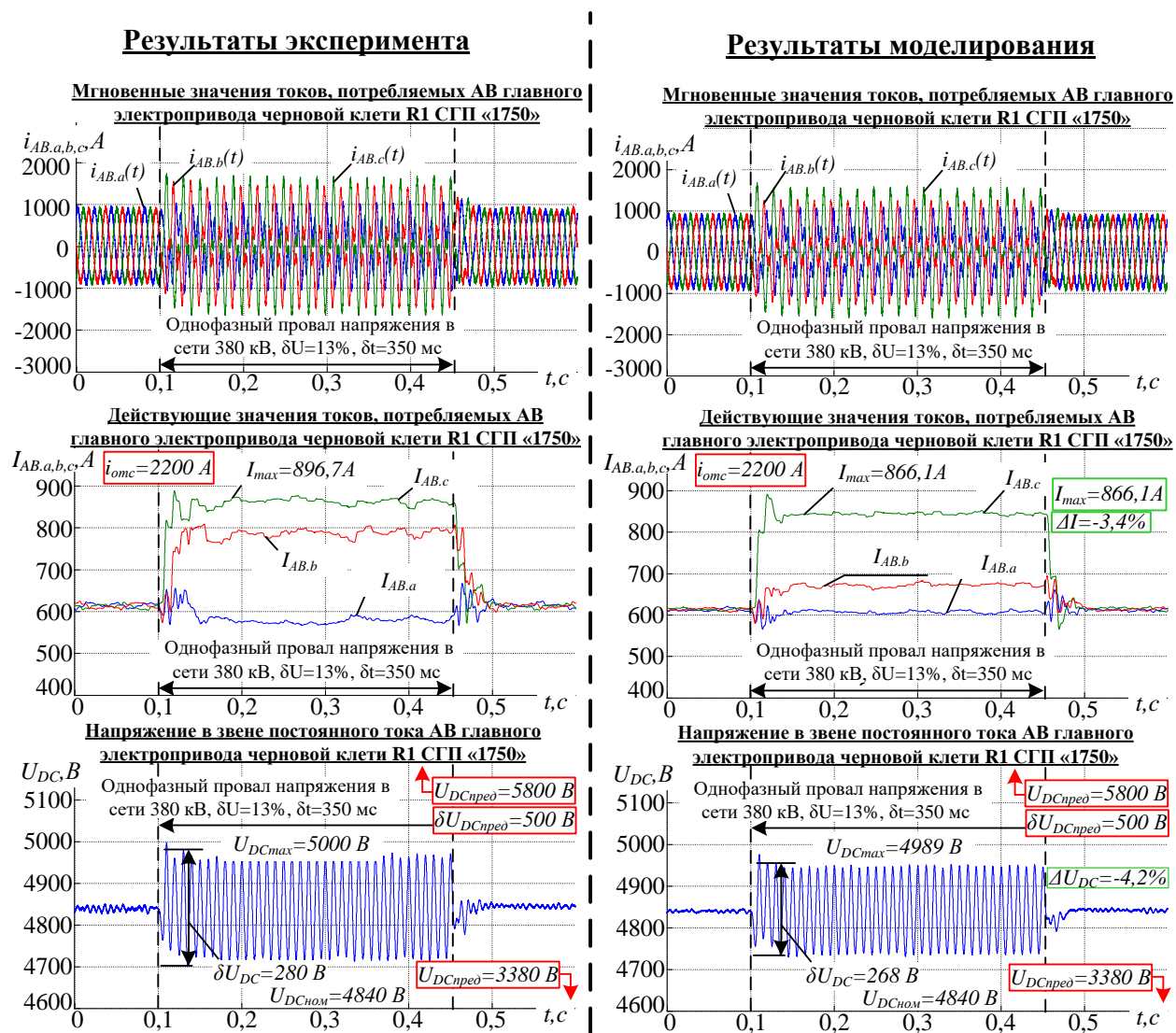


Рисунок 3.14-Сравнительный анализ результатов моделирования и экспериментально полученных данных токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ

3.6 Выводы по главе 3

1. Разработана усовершенствованная имитационная модель электро-технического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», в состав которой входит модель электрической дуги, СТК, ПЧ-АВ, питающая сеть, система управления элект-

трическим режимом работы ДСП, усовершенствованная СУ СТК с возможностью компенсации несимметричных провалов напряжения в питающей сети, СУ АВ с возможностью реализации динамических режимов прокатного стана.

2. В отличие от известных моделей, разработанная усовершенствованная имитационная модель позволяет проводить исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при отклонениях напряжения сети, вызванных внешними провалами напряжения, работой ДСП на различных стадиях плавки, при коммутации основного электротехнического электрооборудования электросталеплавильного комплекса. Позволяет провести оценку эффективности повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при компенсации провалов напряжения в сети за счет резервов реактивной мощности СТК.

3. Проведена проверка адекватности результатов расчета модели. При проверке адекватности модели была проведена оценка токов электрической дуги, мощности дуги и коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности. Выполнено сравнение переходных процессов токов и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 13%. Результаты проверки показали хорошее совпадение результатов расчета с данными, полученными с металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji», расчетные данные не выходят за границы доверительных интервалов с вероятностью 95%.

4. Разработанная усовершенствованная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» будет в дальнейшем использована для проведения оценки возможности параллельной работы главных электроприводов СГП и электросталеплавильного комплекса, а также для исследований, направленных на повышение устойчивости работы ПЧ-АВ при отклонениях напряжения, вызванных работой электросталеплавильного комплекса.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПЧ-АВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ПРОКАТНОГО И ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО КОМПЛЕКСОВ

На основании экспериментальных исследований, представленных во 2-ой главе, а также разработанной усовершенствованной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» необходимо проведение теоретических исследований возможности параллельной работы главных электроприводов СГП «1750» и электросталеплавильного комплекса. Анализ экспериментальных данных показал, что при работе ДСП-250 возникает несимметрия напряжения на шинах 34,5 кВ, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности достигает 7%. При коммутации электротехнического оборудования электросталеплавильного комплекса возникают сильные отклонения напряжения в точке подключения. Отклонения напряжения, вызванные работой электросталеплавильного комплекса, могут оказать негативное влияние на работу системы управления АВ в составе ПЧ-АВ. В связи с этим на разработанной в 3 главе усовершенствованной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» необходимо провести оценку возможности параллельной работы главных электроприводов СГП «1750» и электросталеплавильного комплекса.

Для оценки возможности параллельной работы двух комплексов необходимо провести исследования:

- переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения глубиной 30%, а также при использовании СТК для компенсации провалов напряжения;

- переходных процессов, протекающих в ПЧ-АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу;

- работы ПЧ-АВ при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ в составе СТК;

- переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при работе ДСП-250 на различных стадиях плавки.

4.1 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения

На разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» были проведены исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% и длительностью 200 мс. Однофазный провал напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% и длительностью 200 мс, трансформируясь во внутривзаводскую сеть 34,5 кВ через сетевые трансформаторы с одиннадцатой группой соединения, приводит к несимметрии напряжений в сети 34,5 кВ. Остаточные линейные напряжения U_{ab} и U_{ca} составляют 84% от номинального значения, U_{bc} составляет 96% (рисунок 4.1, а). В связи с этим в сетевом напряжении появляется обратная составляющая напряжений, которая приводит к броску тока, потребляемого АВ в момент возникновения провала напряжения (рисунок 4.1, в), амплитудное значение которого в 2,9 раза больше амплитудного значения тока, потребляемого в симметричном режиме, а также к несимметрии токов. Действующее значение тока, потребляемого АВ одной из фаз, близко к значению уставки срабатывания токовой отсечки АВ, которое сохраняется на всем протяжении провала напряжения (рисунок 4.1, д). Обратная последовательность токов, потребляемых АВ, вызывает колебания напряжения в звене постоянного тока двойной частоты (рисунок 4.1, ж), размах колебаний напряжения составляет 602 В, при предельно допустимом 500 В. Из анализа переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока следует, что однофазный провал напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% и длительностью 200 мс приводит к аварийному отключению ПЧ-АВ защитой по напряжению в звене постоянного тока в связи с недопустимой амплитудой колебания напряжения, либо тепловой защитой по току, потребляемому АВ [21].

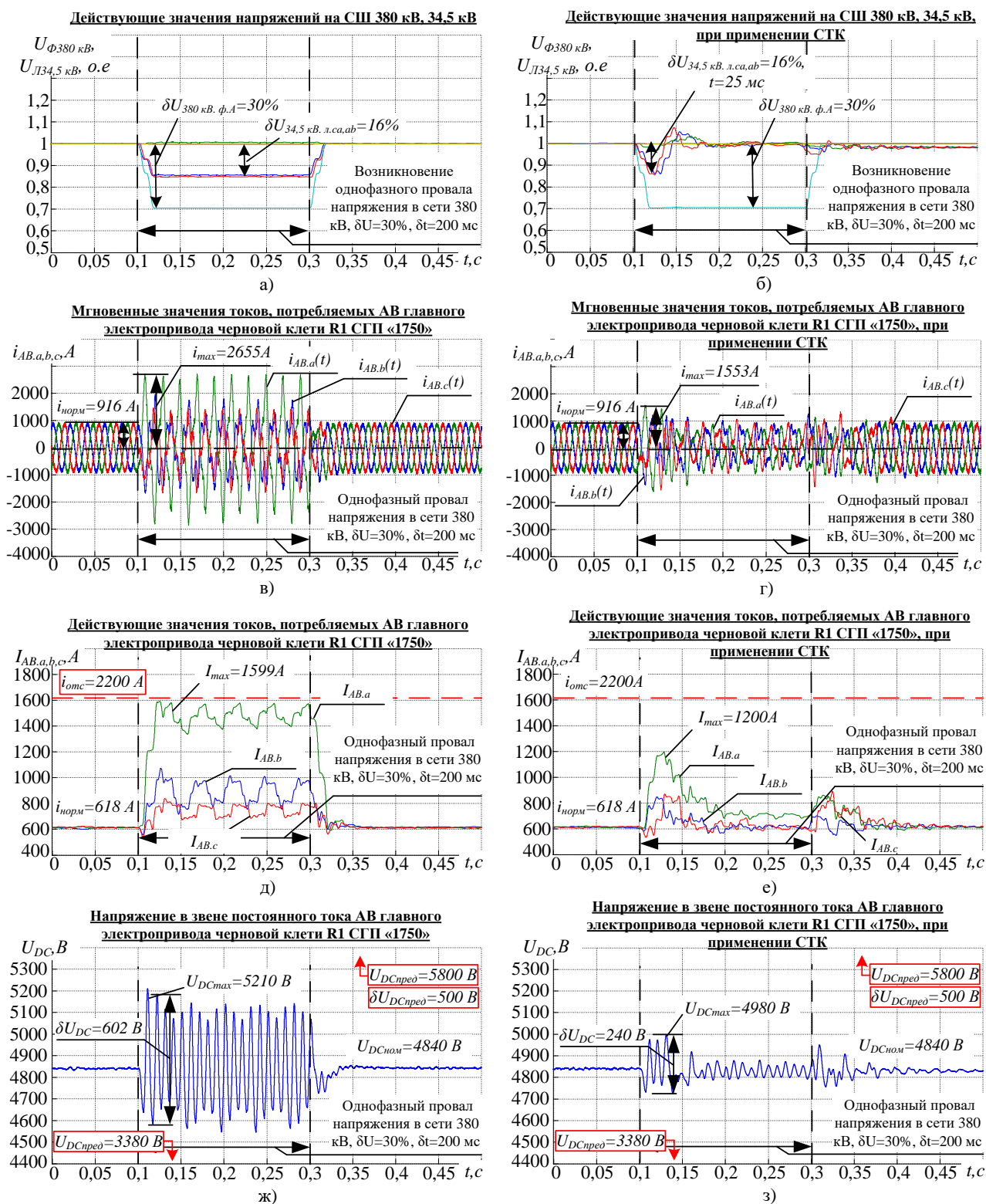


Рисунок 4.1- Графики переходных процессов токов и напряжений при однофазном провале напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс в сети 380 кВ: а, в, д, ж- без компенсации провала напряжения; б, г, е, з- при компенсации провала напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК

При компенсации провалов напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК 330 МВАр, в момент возникновения провала напряжения, остаточные линейные напряжения во внутривоздушной сети U_{ab} и U_{ca} составляют 84% от номинального значения на протяжении 25 мс. Затем усовершенствованная система управления СТК восстанавливает напряжение номинального значения, на протяжении всей длительности провала напряжение поддерживается на номинальном уровне (рисунок 4.1, б). Несимметрия напряжений в сети 34,5 кВ в начальный момент возникновения провала напряжения приводит к увеличению тока, потребляемого АВ, амплитудное значение которого в 1,7 раза больше амплитудного значения тока, потребляемого в симметричном режиме, которое снижается по мере восстановления напряжения сети СУ СТК (рисунок 4.1, г). Действующее значение токов в начальный момент времени увеличилось до 1200 А, затем через 25 мс снизилось практически до номинального значения (рисунок 4.1, е).

Несимметрия сетевого напряжения в начальный момент провала напряжения вызывает колебания напряжения в звене постоянного тока, амплитуда, которых не превышает уставку срабатывания защит АВ (рисунок 4.1, з). После того как СТК восстановил напряжение во внутривоздушной сети напряжение в звене постоянного тока поддерживалось на заданном уровне на протяжении всей длительности провала напряжения в сети 380 кВ.

Из анализа переходных процессов следует, что использование СТК с усовершенствованной системой управления позволяет повысить устойчивость работы ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения в сети 380 кВ, глубиной до 30%.

4.2 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу

Как было отмечено выше, включение печного трансформатора на холостом ходу приводит к броску намагничивающего тока, значение которого во

много раз больше номинального значения [93]. В связи с этим необходимо провести исследования переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при объединении на параллельную работу электросталеплавильного комплекса и главных электроприводов СГП «1750».

Для проведения исследований переходных процессов с учетом реальных напряжений на секции шин 34,5 кВ при включении ПТ на холостом ходу, необходимо в разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» в качестве источника напряжений использовать управляемые источники напряжения из библиотеки *Simulink*. Для управления кими были использованы восстановленные кривые мгновенных значений напряжений при включении ПТ.

В момент включения печного трансформатора на холостом ходу возникает несимметричный провал напряжения, глубина провала линейного напряжения U_{ab} составляет 4,3 кВ, U_{bc} и U_{ca} -1,5 кВ (рисунок 4.2, а). Провал напряжения вызван броском тока намагничивания трансформатора, величина которого составляет 2 номинальных тока (рисунок 4.2, б). По мере затухания тока напряжения на секции шин восстанавливается до номинального значения. Время переходного процесса составляет 2 с.

Как в предыдущем случае, несимметрия напряжения сети приводит к увеличению тока, потребляемого АВ, значение которого составляет 1290 А (рисунок 4.2, в). Появление токов обратной последовательности в токах, потребляемых АВ, вызывает колебания напряжения в звене постоянного тока, удвоенной частоты с амплитудой в момент включения ПТ, равной 310 В, которые носят затухающий характер (рисунок 4.2, г).

Из проведенных исследований видно, что искажения напряжения, вызванные включением печного трансформатора на холостом ходу, приводят к несимметрии токов, потребляемых АВ, и появлению колебаний двойной частоты напряжения в звене постоянного тока, значения которых не превышают уставки срабатывания защит активного выпрямителя.

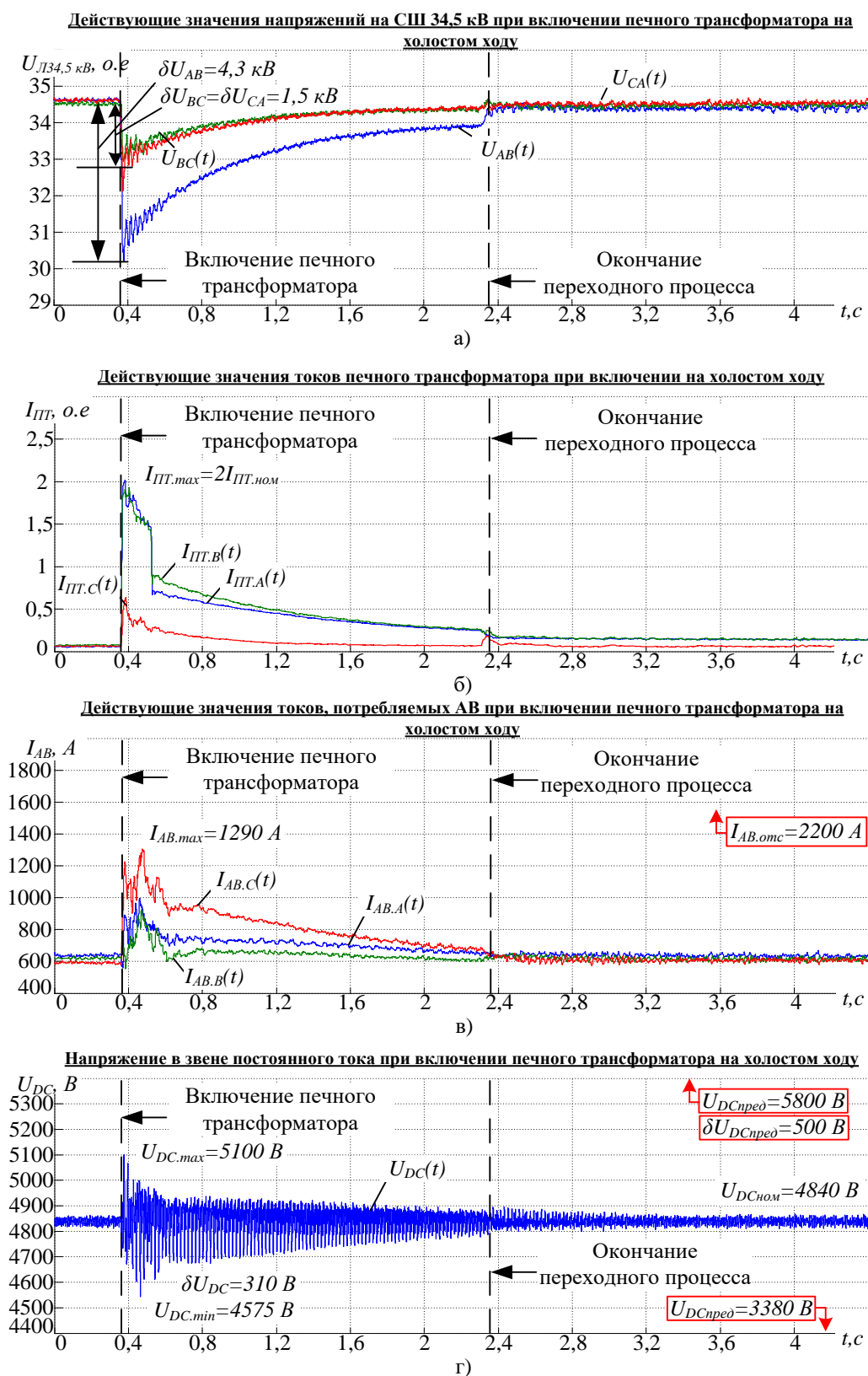


Рисунок 4.2- Графики токов и напряжений при включении печного трансформатора на холостом ходу: а- действующие значения напряжений на СШ 34,5 кВ; б- ток ПТ; в- токи, потребляемые АВ; г- напряжение в звене постоянного тока

4.3 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при включении СТК и фильтрокомпенсирующих цепей

Во второй главе было отмечено, что включение ФКЦ СТК вызывают коммутационные перенапряжения в питающей сети, величина которых может достигать 20-30% от номинального уровня напряжения [94]. Возникающие в сети коммутационные перенапряжения могут оказать негативное влияние на работу ПЧ-АВ при объединении на параллельную работу прокатного и электросталеплавильного комплексов. В связи с этим необходимо на разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» провести исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при включении фильтрокомпенсирующих цепей СТК.

При проведении исследований были использованы восстановленные реальные кривые мгновенных значений напряжений при включении СТК 330 МВАр на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji».

В состав СТК 330 МВАр входят: фильтры 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник, ТРГ. Для снижения величины коммутационных перенапряжений используют поэтапное включение СТК. В начальный момент времени производят включение фильтра 2-ой, 3-ей гармоник и ТРГ. При этом импульсы управления тиристорными ключами ТРГ не подаются. Включение фильтров 2-ой и 3-ей гармоник вызывает перенапряжение в точке подключения СТК. В момент коммутации возникает перенапряжение до 42,2 кВ, затем после окончания переходного процесса установившееся значение напряжения равно 38,6 кВ (рисунок 4.3, а,б). Через 4 секунды после включения фильтров 2-ой и 3-ей гармоник СУ СТК подает импульсы управления на ТРГ, после окончания переходного процесса уровень напряжения в точке подключения СТК равен номинальному значению 34,5 кВ (рисунок 4.3, б). После выдержки времени, равной 4 секунды после включения ТРГ, производят включение фильтров 4-ой, 5-ой гармоник. Уровень коммутационных перенапряжений доходит до 39,2 кВ, затем после

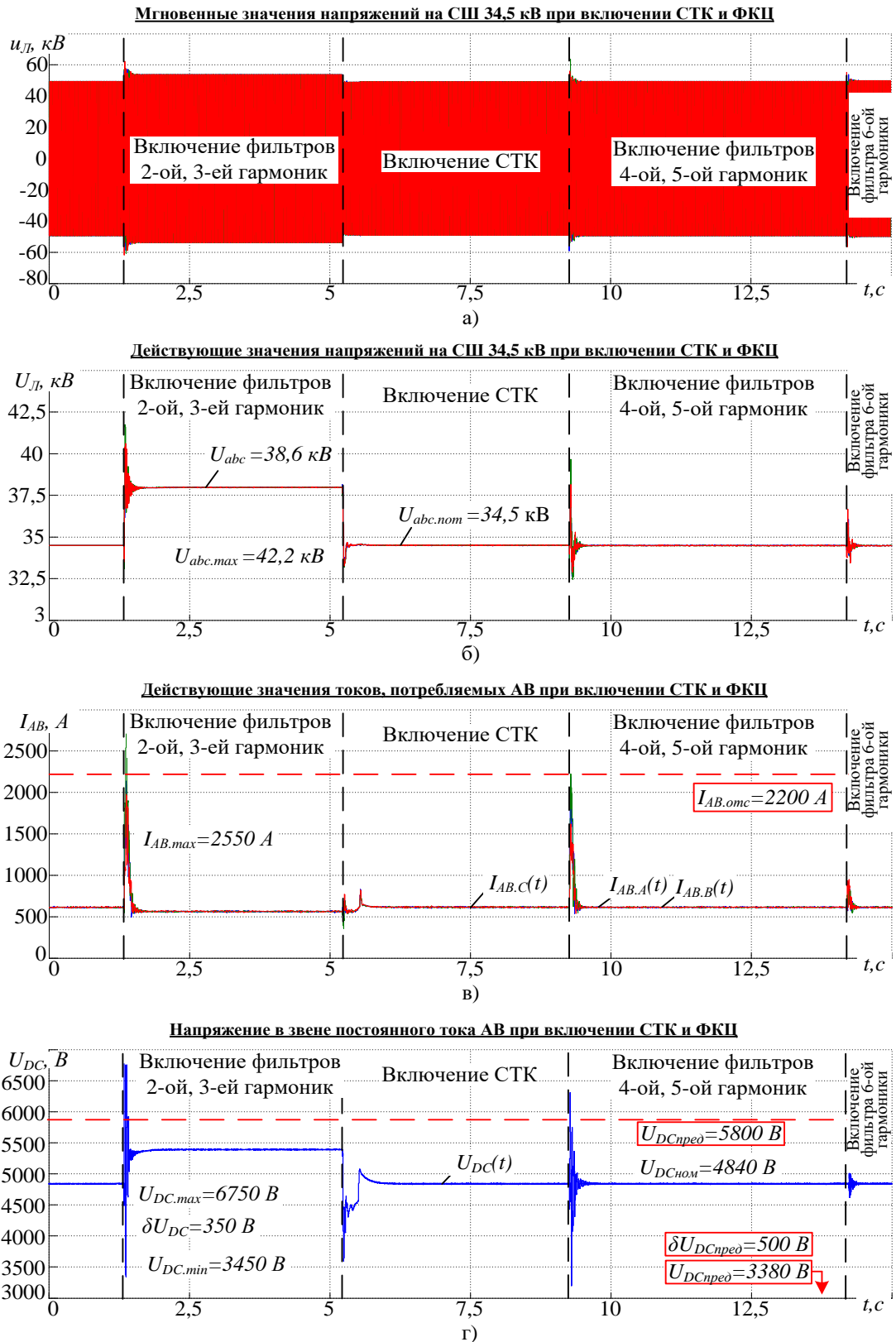


Рисунок 4.3- Графики напряжений и токов при включений СТК: а- мгновенные значения напряжений в точке подключения СТК; б- действующие значения напряжений в точке подключения СТК; в- токи, потребляемые АВ; г- напряжения в звене постоянного тока

окончания переходного процесса включают фильтр 6-ой гармоники, перенапряжение доходит до значения, равного 36,8 кВ (рисунок 4.3, б).

Перенапряжения, вызванные включением фильтров 2-ой, 3-ей, 4-ой и 5-ой гармоник, приводят к броску тока, потребляемого АВ, действующее значение которого больше уставки срабатывания токовой защиты ПЧ-АВ (рисунок 4.3, в). А также в момент включения фильтров 2-ой, 3-ей гармоник возникает перенапряжение в звене постоянного тока до 6400 В. Максимально допустимое значение напряжения в звене постоянного тока не должно превышать 5800 В (рисунок 4.3, г).

Из анализа переходных процессов токов и напряжений в звене постоянного тока при включении СТК следует, что коммутационные перенапряжения вызванные включением фильтров 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой гармоник, приводят к аварийному отключению ПЧ-АВ токовой защитой АВ и защитой по максимальному напряжению в звене постоянного тока. В связи с этим необходима разработка мер по сохранению устойчивой работы АВ при включении СТК.

4.4 Исследование переходных процессов токов и напряжений, протекающих в ПЧ-АВ при параллельной работе прокатного стана с электросталеплавильным комплексом

Для проведения исследований возможности параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП были использованы восстановленные реальные мгновенные значения токов, потребляемых ДСП-250. По ним рассчитывались сигналы управления, для гидропривода перемещения электродов. Исследования были проведены для наиболее тяжелого режима работы ДСП-250 на начальной стадии плавки [93].

В момент зажигания электрической дуги происходит сильное искажение напряжения в точке подключения печи (рисунок 4.4, а), и коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности достигает 7% (рисунок 4.4, в). После проплавления колодцев коэффициент несимметрии снижается до 2% и на протяжении всей плавки находится в диапазоне от 1,5 до 2%.

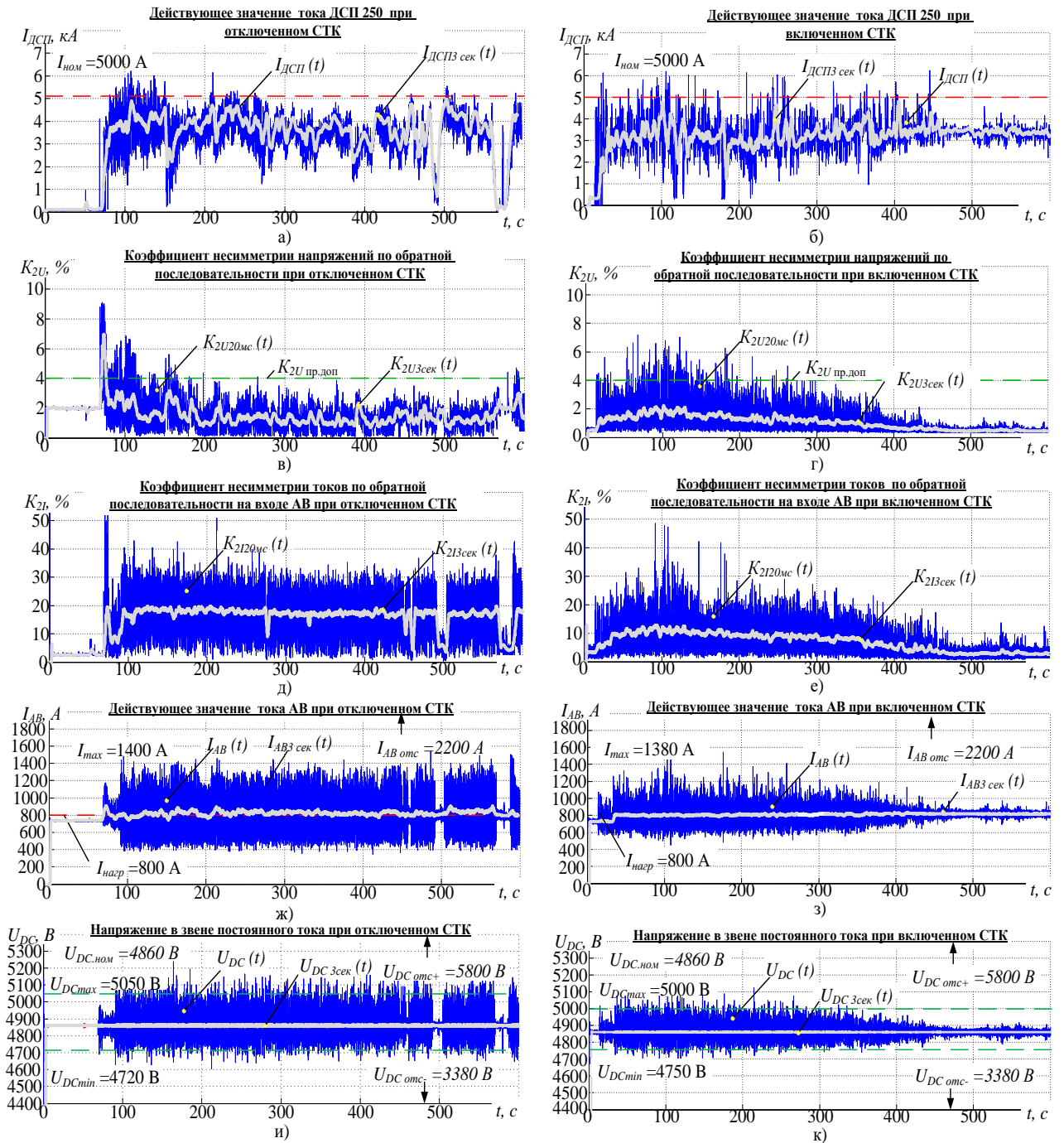


Рисунок 4.4- Основные показатели качества электроэнергии на шинах 34,5 кВ при параллельной работе ПЧ-АВ и комплекса «ДСП-СТК»: а,б- действующее значение тока ДСП при отключенном и включенном СТК; в,г- коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности при отключенном и включенном СТК; д,е- коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности на входе АВ при отключенном и включенном СТК; ж,з- действующее значение тока АВ при отключенном и включенном СТК; и,к- напряжение в звене постоянного тока при отключенном и включенном СТК

Возникновение несимметрии напряжений на секции шин 34,5 кВ приводит к появлению в токах, потребляемых АВ, обратной последовательности, а также несимметрии и увеличению действующего значения до 1400 А (рисунок 4.4, д,ж). Коэффициент несимметрии токов, потребляемых АВ, по обратной последовательности составляет 15% на всем протяжении плавки. Обратная последовательность в токах, потребляемых АВ, приводит к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока, максимальное значение размаха колебаний не превышает максимального значения (рисунок 4.4, и).

Из анализа переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока видно, что при возмущениях в питающем напряжении, вызванных работой печи, возникают несимметрия потребляемых токов АВ, а также увеличение их значений. Несимметрия токов приводит к колебаниям напряжения в звене постоянного тока. Однако увеличенные значения токов и колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышают уставки срабатывания внутренних защит ПЧ-АВ.

Необходимо отметить, что исследования проводились для режима работы когда СТК отключен. Заметное улучшение переходных процессов наблюдается при включенном СТК.

Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности на всем периоде плавки не превышает 2%, а на стадии доводки металла менее 1% (рисунок 4.4, г). В связи с этим коэффициент несимметрии токов, потребляемых АВ, по обратной последовательности не превышает 10%, а на стадии доводки металла менее 5% (рисунок 4.4, е). Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышает 250 В (рисунок 4.4, к).

Из проведенных исследований видно, что при работе ДСП сохраняется устойчивая работа ПЧ-АВ с незначительными ухудшениями качества переходных процессов. Однако для снижения негативных влияний на работу ПЧ-АВ, вызванных работой ДСП, необходимо исключить параллельную работу прокатного и электросталеплавильного комплексов при работе печи без СТК.

4.5 Выводы по главе 4

1. Проведены исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% и длительностью 200 мс. Из анализа полученных результатов видно, что при возникновении однофазного провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 30%, остаточные линейные напряжения в сети 34,5 кВ составляют 84% и 96 % от номинального уровня, а также возникает составляющая обратной последовательности. В связи с этим происходит увеличения токов, потребляемых АВ, амплитуда которых в 2,9 раза больше амплитуды в симметричном режиме работы. В звене постоянного тока возникают колебания удвоенной частоты, которые вызваны появлением обратной составляющей в токах, потребляемых АВ. Размах колебаний напряжения составляет 602 В при предельно допустимом значении 500 В. Преобразователь частоты будет отключен защитой по напряжению в звене постоянного тока либо тепловой защитой АВ, так как действующее значение тока близко к уставке срабатывания токовой отсечки.

2. Улучшение переходных процессов наблюдается при компенсации провала напряжения за счет реактивной мощности СТК. Амплитуда тока в момент возникновения провала напряжения в 1,7 раза больше, чем в симметричном режиме, которая постепенно снижается по мере восстановления напряжения СУ СТК. Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышает 240 В. Исследования показали возможность повышения надежности работы ПЧ-АВ при демпфировании несимметричных провалов напряжений сети с помощью резервов реактивной мощности СТК.

3. Проведены исследования переходных процессов, протекающих в АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу. Из проведенных исследований видно, что искажения напряжения, вызванные включением печного трансформатора на холостом ходу, приводят к несимметрии токов, потребляемых АВ, и появлению колебаний двойной частоты напряжения в звене

постоянного тока, значения которых не превышают уставки срабатывания защиты активного выпрямителя.

4. Проведены исследования переходных процессов, протекающих в ПЧ-АВ при включении ФКЦ СТК. Исследования показали, что коммутационные перенапряжения, возникающие в точке подключения ФКЦ, вызванные включением фильтров, оказывают негативное влияние на работу СУ АВ. В момент включения фильтров происходит перенапряжение в звене постоянного тока, значение которого больше максимально допустимого значения, а также происходит бросок тока, потребляемого АВ, значение которого превышает уставку срабатывания токовой защиты АВ.

5. На разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» проведены исследования возможности параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП. Оценку возможности параллельной работы проводили для наихудшего режима работы ДСП- на начальной стадии плавки при отключенном и при включенном СТК. Из проведенных исследований видно, что возмущения напряжения, вызванные работой ДСП, приводят к незначительным ухудшениям качества напряжения в звене постоянного тока и токов, потребляемых АВ. Улучшение переходных процессов наблюдается при включении СТК.

6. Из полученных результатов моделирования видно, что, несмотря на положительный эффект от использования СТК для компенсации провалов напряжения, объединение на параллельную работу главных электроприводов СГП на базе ПЧ-АВ и электросталеплавильного комплекса без разработки дополнительных мероприятий недопустимо. В связи с этим необходима разработка системы управления АВ, обеспечивающей устойчивую работу ПЧ-АВ при отклонениях напряжения, вызванных работой электросталеплавильного комплекса.

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ УСТОЙЧИВУЮ РАБОТУ ПЧ-АВ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ, ПРИ НЕСИММЕТРИИ ПИТАЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Исследования, проведенные в 4 главе, показали, что при параллельной работе ПЧ-АВ с электросталеплавильным комплексом при включении печного трансформатора на холостом ходу происходит увеличение токов потребляемых АВ, а также возникает несимметрия, токов потребляемых АВ. При включении ФКЦ СТК возникают коммутационные перенапряжения, величина которых достигает 20-30% от номинального уровня, которые приводят к отключениям внутренними защитами АВ.

В связи с этим необходимо разработать технические решения по обеспечению устойчивой работы ПЧ-АВ при включении силового оборудования ЭСПЦ, а также мероприятия по снижению негативного влияния возмущений, вызванных работой ДСП-250.

6.1 Разработка усовершенствованной системы управления АВ, обеспечивающей устойчивую работу при параллельной работе с ДСП

Рассмотрим переходные процессы токов во вращающейся системе координат dq , протекающие в ПЧ-АВ при возникновении несимметрии питающего напряжения на примере однофазного провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 30%.

Однофазный провал напряжения в сети 380 кВ глубиной 30% приводит к несимметрии напряжения во внутривоздушной сети 34,5 кВ, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности составляет 11,3% (рисунок 5.1, а). В токах, потребляемых АВ, возникает составляющая обратной последовательности, коэффициент несимметрии достигает 130% (рисунок 5.1, б). Система управления АВ не рассчитана на протекание токов обратной последо-

вательности, в связи с этим контуре регулирования возникают колебания, амплитуда которых по активной составляющей оси d достигает 680 А, а по реактивной составляющей q 398 А, с периодом 10 мс (рисунок 5.1, в). Колебания токов во внутреннем контуре регулирования СУ вызывают колебания напряжения в звене постоянного тока, которые превышают максимально допустимые значения.

Для анализа причин возникновения колебаний в контурах регулирования тока, разложим токи, потребляемые АВ, на симметричные составляющие. Так как сеть 34,5 кВ работает с изолированной нейтралью, нулевой последовательностью пренебрегаем, так как нет условий для протекания токов нулевой последовательности. Разложение токов на симметричные составляющие выполним в неподвижной двухфазной системе координат $\alpha\beta$, для этого токи из трехфазной системы координат abc преобразуем в двухфазную с помощью уравнения Кларка (5.1):

$$\begin{cases} I_{\alpha} = \frac{2}{3} \cdot (I_a - \frac{1}{2} \cdot I_b - \frac{1}{2} \cdot I_c); \\ I_{\beta} = \frac{2}{3} \cdot (\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_c). \end{cases} \quad (5.1)$$

В неподвижной системе координат $\alpha\beta$ при возникновении несимметрии токи перестают быть ортогональными друг другу и их можно представить как сумму токов прямой и обратной последовательностей (5.2):

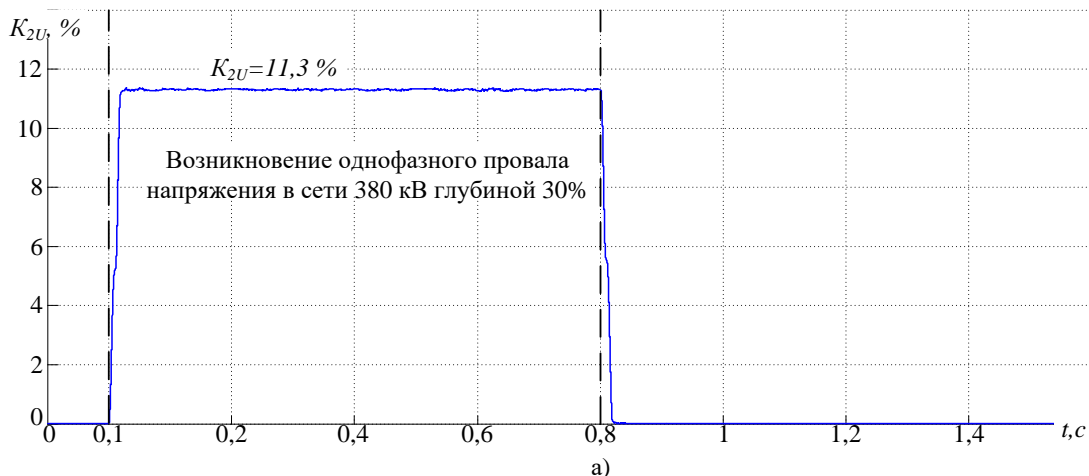
$$\begin{cases} I_{\alpha} = I_{\alpha}^{+} + I_{\alpha}^{-}; \\ I_{\beta} = I_{\beta}^{+} + I_{\beta}^{-}, \end{cases} \quad (5.2)$$

где $I_{\alpha}^{+}, I_{\beta}^{+}$ - составляющие токов прямой последовательности;

$I_{\alpha}^{-}, I_{\beta}^{-}$ - составляющие токов обратной последовательности.

Для расчета токов прямой и обратной последовательностей воспользуемся способом введения временной задержки сигнала на $\Delta t = 5$ мс, предложенным в работе [95]. Токи прямой и обратной последовательностей рассчитываем по уравнениям (5.3):

Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности



Коэффициент несимметрии токов, потребляемых ПЧ с АВ по обратной последовательности



Ток, потребляемый ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq

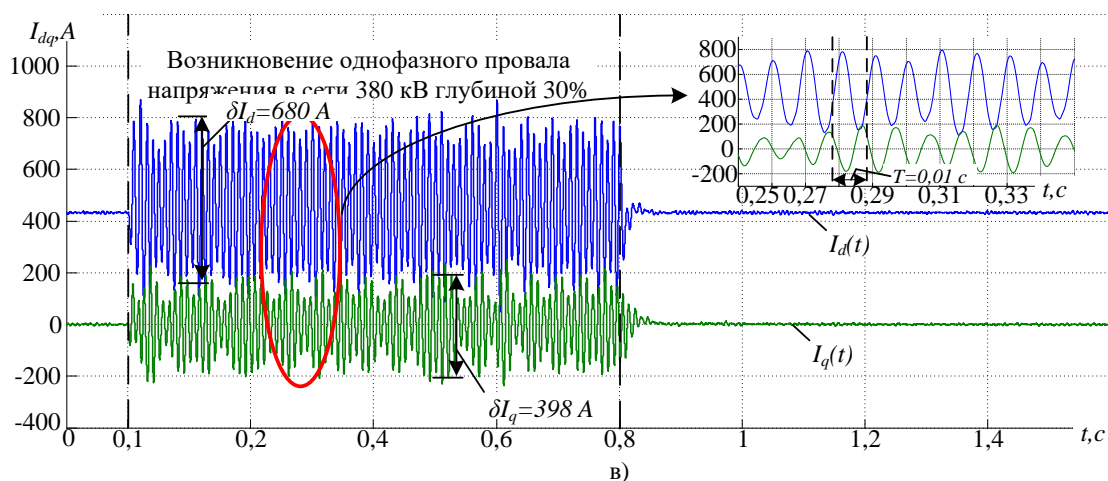


Рисунок 5.1- Графики изменения: а- коэффициента несимметрии напряжения по обратной последовательности в сети 34,5 кВ; б- коэффициента несимметрии токов, потребляемых ПЧ-АВ; в- токов, потребляемых АВ, во вращающейся системе координат dq

$$\begin{cases} I_{\alpha}^{+} = \frac{1}{2} \cdot (I_{\alpha} - I_{\beta} \cdot (t - \Delta t)); \\ I_{\beta}^{+} = \frac{1}{2} \cdot (I_{\beta} + I_{\alpha} \cdot (t - \Delta t)); \\ I_{\alpha}^{-} = \frac{1}{2} \cdot (I_{\alpha} + I_{\beta} \cdot (t - \Delta t)); \\ I_{\beta}^{-} = \frac{1}{2} \cdot (I_{\beta} - I_{\alpha} \cdot (t - \Delta t)). \end{cases} \quad (5.3)$$

Рассчитанные токи прямой и обратной последовательностей в неподвижной системе координат преобразуем во вращающуюся систему координат dq по формуле (5.4):

$$\begin{cases} I_d^{+} = I_{\alpha}^{+} \cdot \sin(\omega t) - I_{\beta}^{+} \cdot \cos(\omega t); \\ I_q^{+} = I_{\alpha}^{+} \cdot \cos(\omega t) + I_{\beta}^{+} \cdot \sin(\omega t); \\ I_d^{-} = I_{\alpha}^{-} \cdot \sin(-\omega t) - I_{\beta}^{-} \cdot \cos(-\omega t); \\ I_q^{-} = I_{\alpha}^{-} \cdot \cos(-\omega t) + I_{\beta}^{-} \cdot \sin(-\omega t). \end{cases} \quad (5.4)$$

Преобразование токов прямой и обратной последовательностей производим с ориентацией по вектору напряжения питающей сети прямой $\dot{\omega}t$ и обратной $-\dot{\omega}t$ последовательностей [96].

На рисунке 5.2 представлены токи прямой и обратной последовательностей, потребляемые ПЧ-АВ при несимметрии питающего напряжения. При возникновении однофазного провала напряжения в сети 380 кВ, в токах, потребляемых АВ, появляется обратная составляющая, которая по активной составляющей оси d в 1,3 раза больше составляющей прямой последовательности. В связи с этим возникают составляющие активной и реактивной мощностей, обусловленные 2-ой гармоникой, которые имеют колебательный характер и приводят к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока.

Таким образом, при возникновении несимметрии питающей сети, необходимо минимизировать влияние обратной последовательности на работу СУ АВ. Известен способ введения предмодулирующего сигнала напряжения об-

ратной последовательности [5]. К выходам регуляторов тока СУ АВ прибавляется

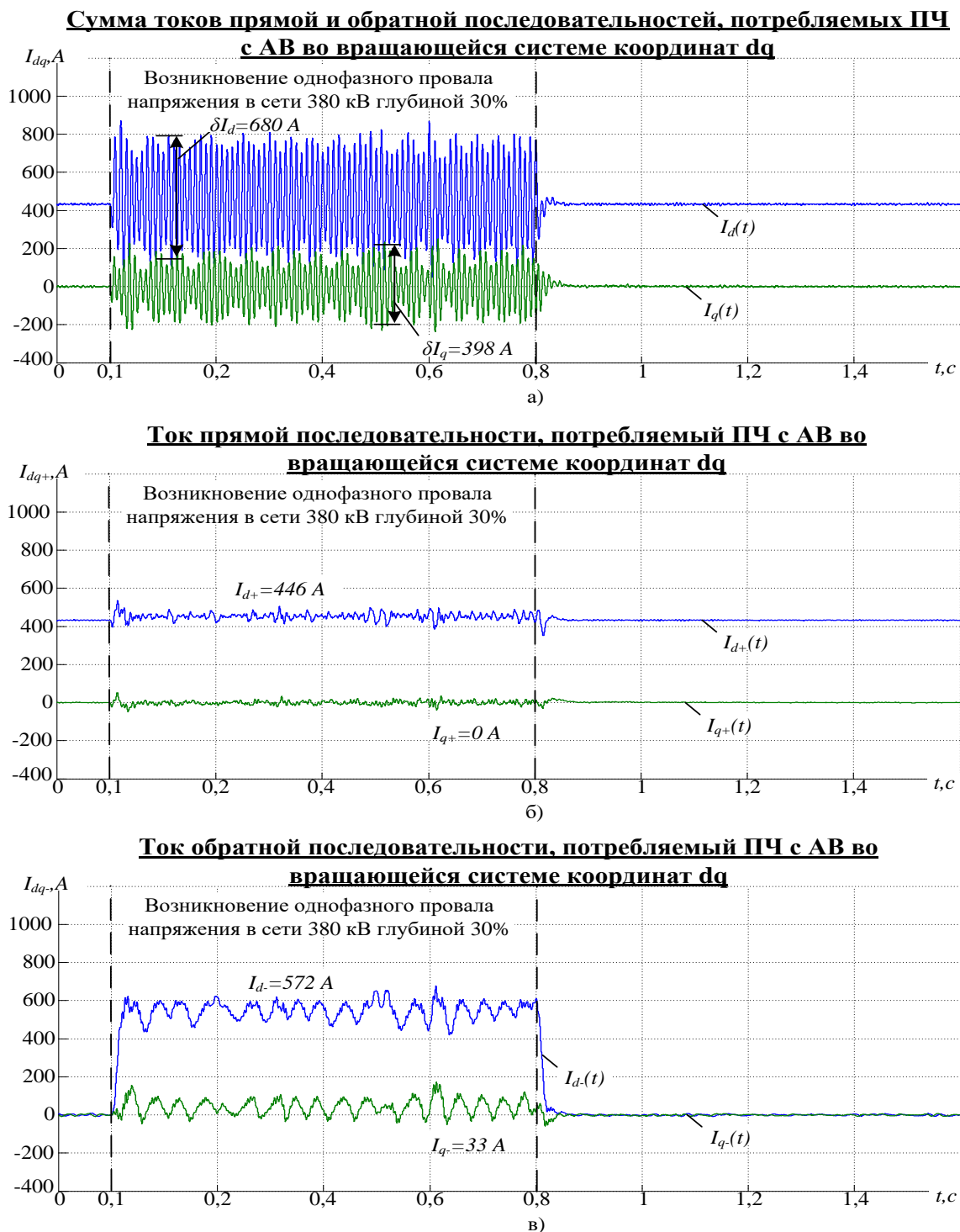


Рисунок 5.2- Ток, потребляемый АВ при несимметрии питающего напряжения во вращающейся системе координат dq: а- сумма токов прямой и обратной последовательностей; б- ток прямой последовательности; в- ток обратной последовательности

составляющая напряжения обратной последовательности.

Разложим напряжение питающей сети на составляющие прямой и обратной последовательностей по формулам (5.1)-(5.4). На рисунке 5.3 представлены составляющие напряжения сети по прямой и обратной последовательностям. Как видно из рисунка 5.3, б в момент возникновения несимметрии напряжений возникают составляющие обратной последовательности по осям dq, которые после фильтра нижних частот поступают в СУ АВ. Таким образом, напряжение на входе АВ формируется с составляющей обратной последовательности, компенсирующей величину токов, обратной последовательности.

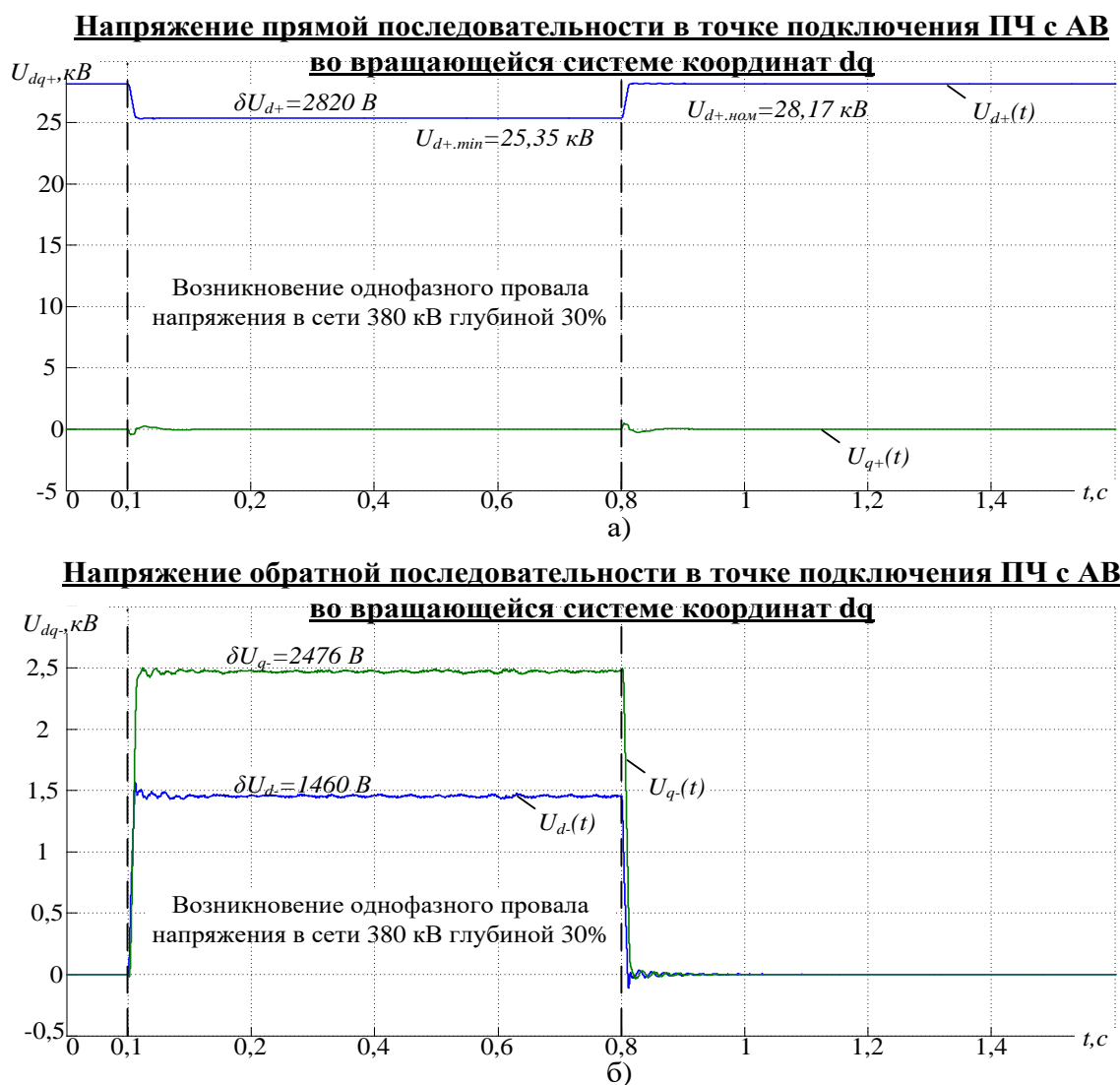


Рисунок 5.3- График изменения составляющих напряжений при несимметрии напряжения сети: а- прямой последовательности; б- обратной последовательности

На рисунке 5.4 представлены результаты моделирования работы АВ с введением предмодулирующего сигнала по напряжению обратной последовательности. Из рисунка 5.4 видно, что введение напряжения обратной последовательности в систему управления АВ приводит к улучшению переходных процессов за счет снижения амплитуды колебания токов (рисунок 5.4, а). Необходимо отметить, что данный способ компенсации влияния несимметрии на работу АВ работает по принципу возмущения, и величина предмодулирующего сигнала не регулируется. В связи с этим составляющая тока по обратной последовательности была перекомпенсирована (рисунок 5.4, в) и составила -275 А. Ток обратной последовательности все равно будет вызывать колебания напряжения в звене постоянного тока, но с меньшей амплитудой, чем при использовании существующей системы управления.

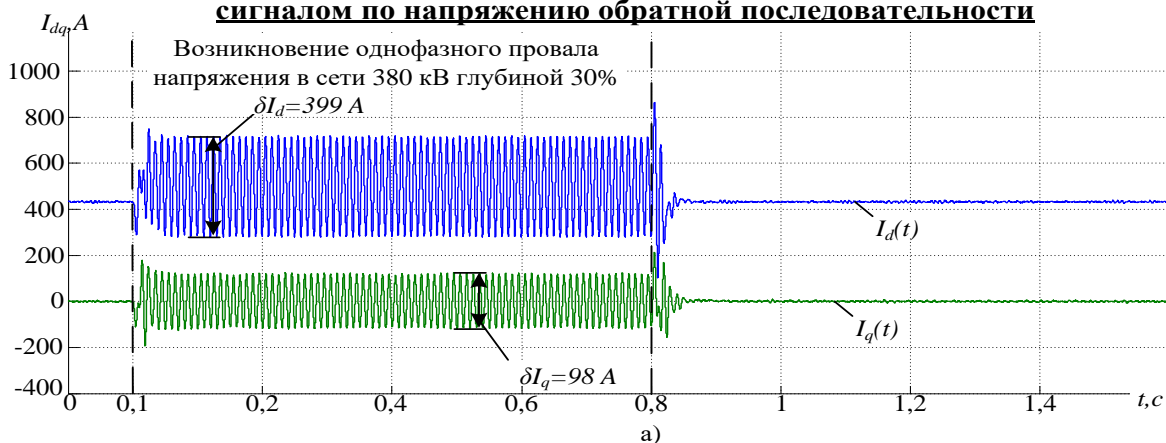
5.1.1 Разработка усовершенствованного контура регулирования токов, потребляемых АВ

Из проведенных исследований следует, что для повышения устойчивости работы АВ при несимметрии питающего напряжения необходимо обеспечить компенсацию активной и реактивной мощностей, обусловленных второй гармоникой. Используя существующую систему управления АВ этого добиться невозможно, так как контур регулирования токов настроен на формирование тока, необходимого для поддержания напряжения в звене постоянного тока на заданном уровне.

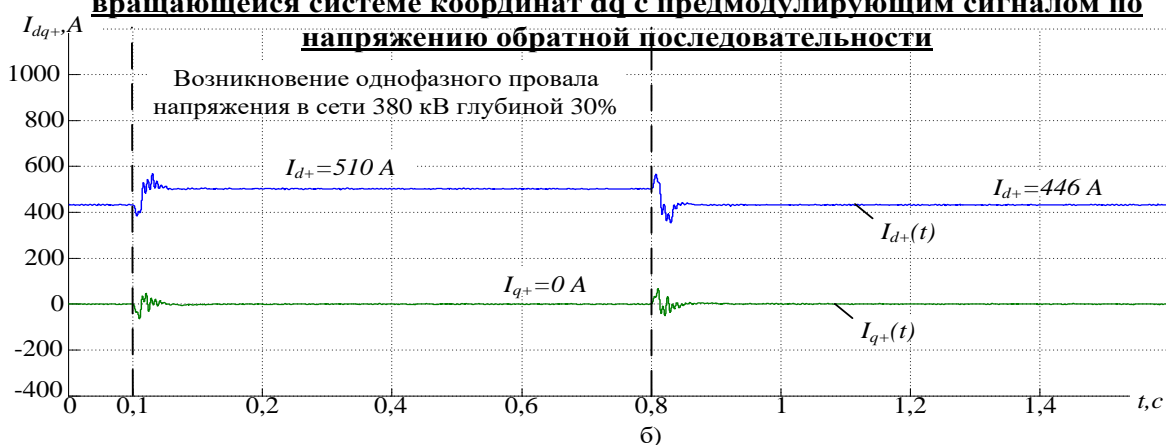
Для поддержания токов обратной последовательности, равными 0, введем дополнительный контур регулирования токов обратной последовательности (рисунок 5.5), т.е. внутренний контур регулирования СУ АВ будет содержать контур регулирования токов прямой последовательности и контур регулирования токов обратной последовательности [95,96].

Система равновесия токов и напряжений во вращающейся системе координат для разработанного контура регулирования токов примет вид (5.5):

Сумма токов прямой и обратной последовательностей, потребляемых ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq с предмодулирующим сигналом по напряжению обратной последовательности



Ток прямой последовательности, потребляемый ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq с предмодулирующим сигналом по напряжению обратной последовательности



Ток обратной последовательности, потребляемый ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq с предмодулирующим сигналом по напряжению обратной последовательности

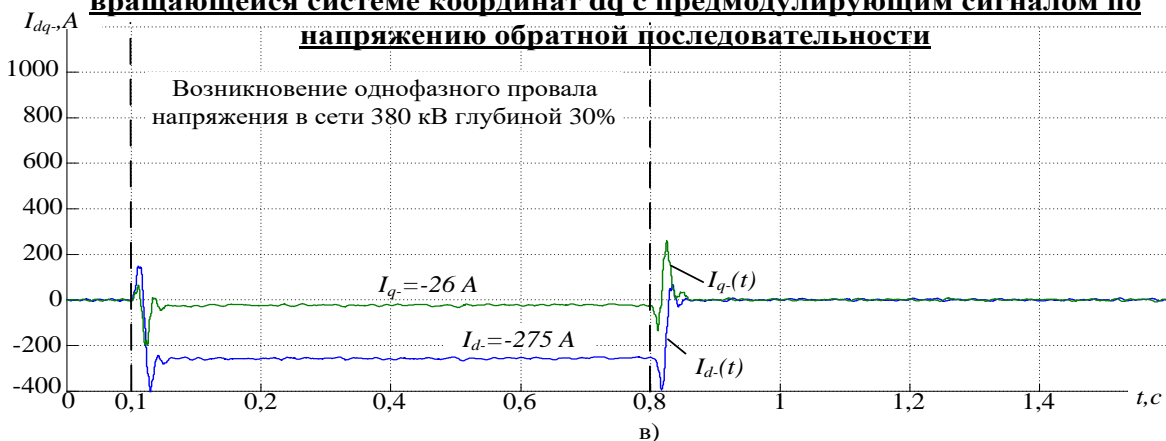


Рисунок 5.4- Ток, потребляемый АВ при несимметрии питающего напряжения во вращающейся системе координат dq с введением предмодулирующего сигнала по напряжению обратной последовательности: а- сумма токов прямой и обратной последовательностей; б- ток прямой последовательности; в- ток обратной последовательности

$$\begin{cases} U_{ds}^+ = U_{dAB}^+ + i_d^+ \cdot R + pL \cdot i_d^+ + \omega \cdot L \cdot i_q^+; \\ U_{qs}^+ = -U_{qAB}^+ + R \cdot i_q^+ + pL \cdot i_q^+ - \omega \cdot L \cdot i_d^+; \\ U_{ds}^- = U_{dAB}^- + i_d^- \cdot R + pL \cdot i_d^- + \omega \cdot L \cdot i_q^-; \\ U_{qs}^- = -U_{qAB}^- + R \cdot i_q^- + pL \cdot i_q^- - \omega \cdot L \cdot i_d^-. \end{cases} \quad (5.5)$$

В разработанном контуре регулирования токов ток задания по активной составляющей прямой последовательности формируется во внешнем контуре регулирования напряжения звена постоянного тока путем сравнения напряжения задания с фактическим. Сигнал рассогласования обрабатывается ПИ- регулятором напряжения, на выходе которого формируется ток задания по активной составляющей прямой последовательности тока. Ток задания по реактивной составляющей прямой последовательности формируется во внешнем контуре регулирования напряжения сети, о котором будет сказано ниже. Токи задания по активной и реактивной составляющим токов принимаются равными 0. Расчет параметров регуляторов выполнен по методу подчиненного регулирования, описанному в работах [8, 102].

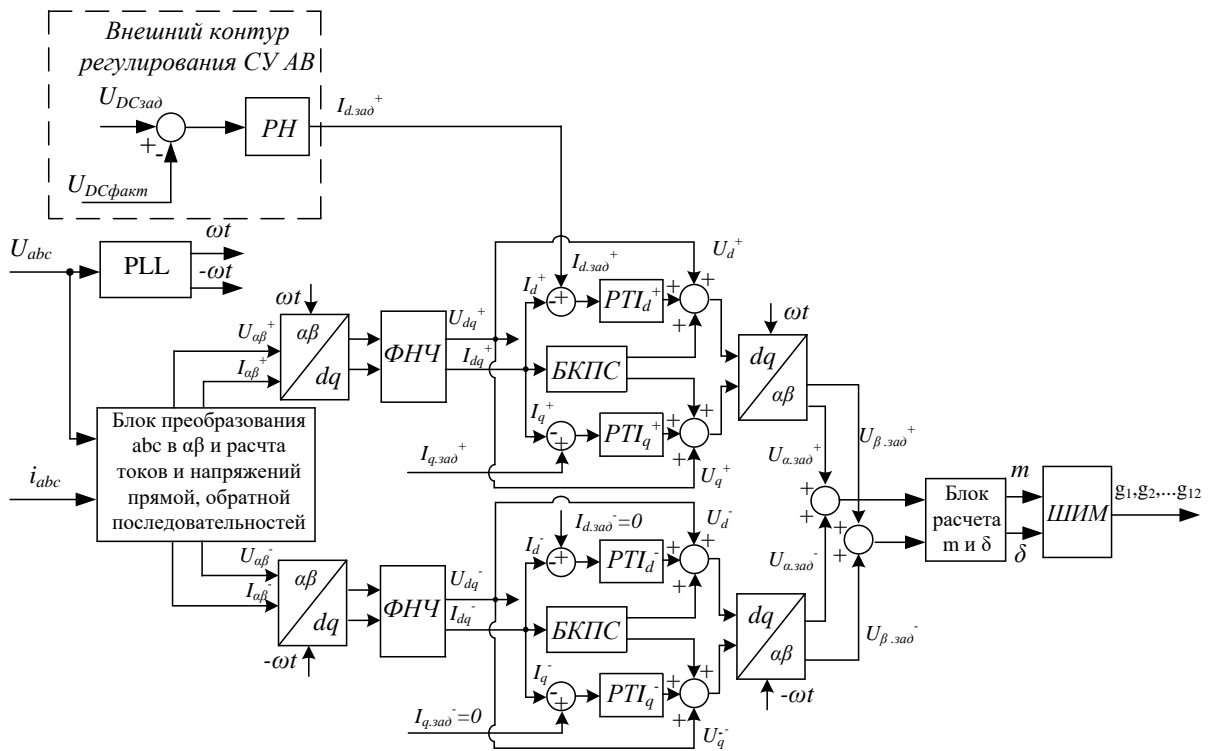


Рисунок 5.5-Структурная схема СУ АВ с контуром регулирования токов обратной последовательности

В систему управления АВ с отдельным регулированием токов прямой и обратной последовательностей поступают измеренные сигналы напряжения сети и токов, потребляемых ПЧ-АВ. Фактические значения токов и напряжений поступают в блок преобразования из трехфазной системы координат abc в неподвижную двухфазную систему $\alpha\beta$ и расчета прямой и обратной последовательностей, в котором по формулам (5.1)-(5.4) происходят преобразование и расчет составляющих токов и напряжений. Рассчитанные составляющие токов и напряжений по прямой и обратной последовательностям преобразовываются во вращающуюся систему координат dq , ориентированную по векторам напряжения сети прямой и обратной последовательностей соответственно. Сигналы токов и напряжений по прямой и обратной последовательностям в системе координат dq проходят фильтрацию через фильтр низких частот (ФНЧ), которая необходима для избегания ложных срабатываний тиристоров АВ, обусловленных наличием высших гармоник в измеренных значениях. Далее сигналы токов и напряжений прямой и обратной последовательностей поступают в контуры регулирования токов прямой и обратной последовательностей.

В контуре регулирования тока прямой последовательности фактические значения токов по осям dq сравниваются с заданными значениями, сформированными во внешних контурах регулирования напряжения в звене постоянного тока и напряжения питающей сети. Сигналы их рассогласований обрабатываются ПИ- регуляторами тока PTI_d^+ и PTI_q^+ . На выходе регуляторов тока формируются напряжения задания по прямой последовательности. Для улучшения работы регуляторов и качества регулирования к выходным сигналам с регуляторов прибавляются сигналы компенсации взаимного влияния активной и реактивной составляющих тока и фактические значения напряжения сети по прямой последовательности. Сформированные напряжения задания по прямой последовательности поступают в блок преобразования координат из вращающейся системы координат dq в неподвижную систему координат $\alpha\beta$. Преобразование производится с ориентацией по вектору напряжения питающей сети $\dot{\omega}t$.

Работа контура регулирования токов обратной последовательности аналогична работе контура прямой последовательности. Различие в том, что токи задания обратной последовательности по активной и реактивной составляющим всегда равны 0, а также преобразование из системы dq в систему координат $\alpha\beta$ производится с ориентацией по вектору напряжения обратной последовательности $-\dot{\omega}t$ [97].

После преобразования сигналы напряжения заданий в системе координат $\alpha\beta$ попарно суммируются и поступают в блок вычисления коэффициента модуляции m и угла сдвига δ . Расчет коэффициента модуляции m и угла сдвига δ производится по формулам (5.6), (5.7):

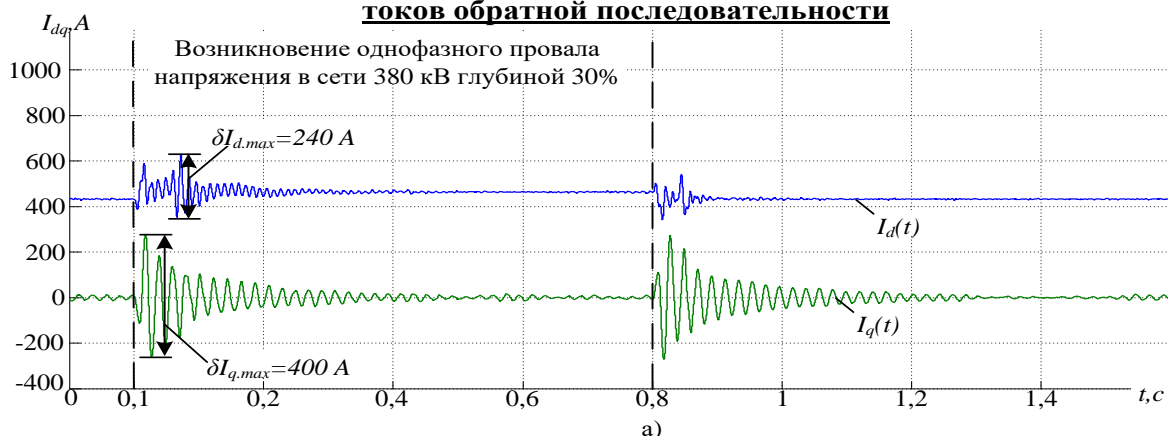
$$m = \frac{\pi \cdot \sqrt{U_{\alpha.}^2 + U_{\beta.}^2}}{2 \cdot U_{DC}}; \quad (5.6)$$

$$\delta = \arctg\left(\frac{U_{\beta.}}{U_{\alpha.}}\right). \quad (5.7)$$

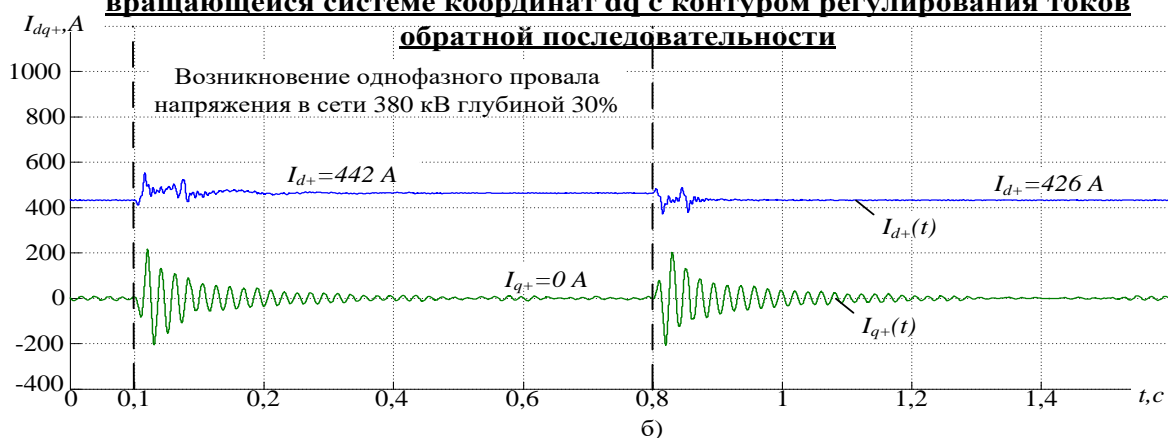
Необходимо отметить, что у исследуемого ПЧ-АВ коэффициент модуляции не должен превышать пределов $0,6 \leq m \leq 1,05$.

На рисунке 5.6 представлены результаты моделирования работы СУ АВ с дополнительным контуром регулирования токов обратной последовательности. В момент возникновения несимметрии питающей сети на входе регуляторов тока обратной последовательности возникает сигнал рассогласования, который обрабатывается ПИ- регуляторами PTI_d^- и PTI_q^- , формируют составляющие обратной последовательности напряжения на входе АВ, которое компенсирует влияние токов обратной последовательности. На всей длительности провала напряжения токи обратной последовательности после окончания переходного процесса поддерживались равными 0 (рисунок 5.6), тем самым снижая влияние мощности, обусловленной 2-ой гармоникой, которая приводит к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока.

Сумма токов прямой и обратной последовательностей, потребляемых ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq с контуром регулирования токов обратной последовательности



Ток прямой последовательности, потребляемый ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq с контуром регулирования токов обратной последовательности



Ток обратной последовательности, потребляемый ПЧ с АВ во вращающейся системе координат dq с предмодулирующим сигналом по напряжению обратной последовательности

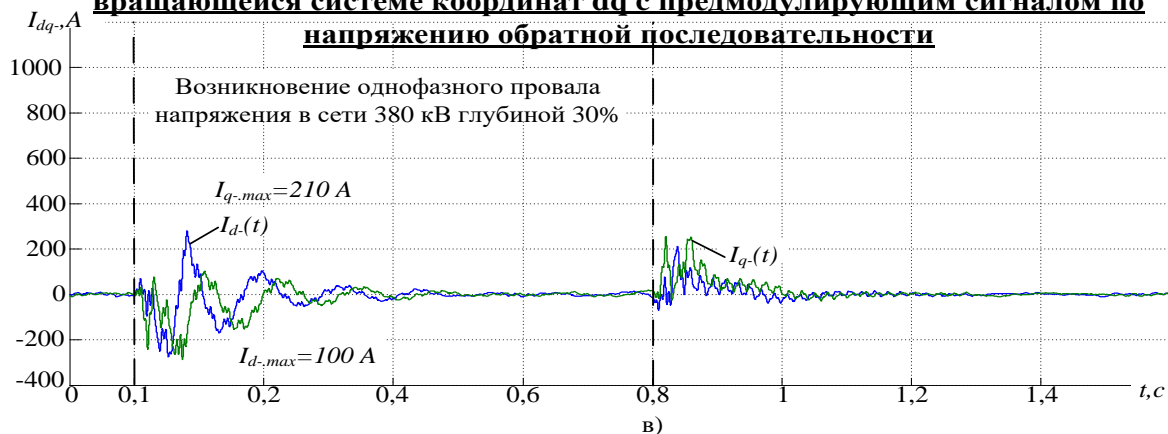


Рисунок 5.6- Ток, потребляемый АВ при несимметрии питающего напряжения во вращающейся системе координат dq с использованием усовершенствованной системы управления АВ: а- сумма токов прямой и обратной последовательностей; б- ток прямой последовательности; в- ток обратной последовательности

5.1.2 Разработка СУ АВ с дополнительным контуром регулирования реактивного тока

Исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при включении ФКЦ СТК, проведенные в 4 главе, показали, что коммутационные перенапряжения приводят к отключения ПЧ-АВ внутренними защитами АВ. Отключения происходит в связи с превышением уставок срабатывания защиты по максимальному напряжению в звене постоянного тока, а также из-за броска тока в момент включения фильтров высших гармоник. В период после включения фильтров 2-ой, 3-ей гармоник и до подачи импульсов управления на тиристоры ТРГ, напряжение в звене постоянного тока было повышено и составляло 5350 В.

Для разработки технических мероприятий, обеспечивающих устойчивую работу ПЧ-АВ при включении ФКЦ СТК, рассмотрим принцип работы АВ на примере однофазной схемы замещения. Упрощенно представим АВ в виде источника ЭДС, подключенного к источнику ЭДС сети через эквивалентное индуктивное сопротивление трансформатора (рисунок 5.7). Активным сопротивлением трансформатора пренебрегаем ввиду его малой величины.

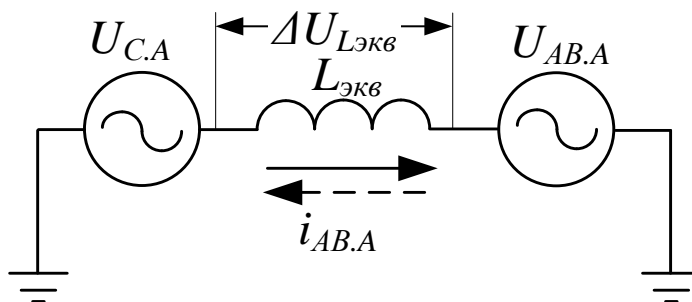


Рисунок 5.7- Упрощенная однофазная схема замещения АВ

Разность ЭДС сети $U_{c.A}$ и ЭДС на входе АВ $U_{AB.A}$ приходится на падение на эквивалентном индуктивном сопротивлении трансформатора $\Delta U_{L_{экв}}$. Как было сказано выше, в нормальном режиме работы АВ работает с коэффициентом мощности равным 1 [98-100]. Вектор тока, потребляемого АВ, совпадает по направлению с вектором напряжения сети $U_{c.A}$. Вектор падения напряжения на

индуктивном сопротивлении $\Delta U_{L_{\text{ЭКВ}}}$ перпендикулярен вектору напряжения сети $U_{c.A}$, тем самым компенсируя падение напряжения на согласующем трансформаторе. Вектор напряжения на входе АВ $U_{AB.A}$ отстает от вектора напряжения сети $U_{c.A}$ на угол δ (рисунок 5.8, а).

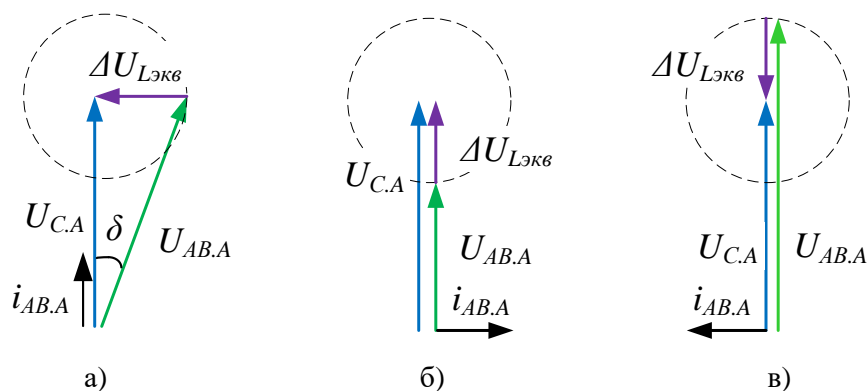


Рисунок 5.8- Векторные диаграммы режимов работы АВ: а- АВ работает с коэффициентом мощности равным 1; б- АВ работает в режиме потребления реактивной мощности; в- АВ работает в режиме генерации реактивной мощности

В режиме потребления реактивной мощности ток, потребляемый АВ, отстает от вектора напряжения сети $U_{c.A}$ на 90 градусов, вектор падения напряжения $\Delta U_{L_{\text{ЭКВ}}}$ совпадает по направлению с вектором напряжения на входе АВ $U_{AB.A}$, компенсируя разность между напряжением сети и напряжением на входе АВ (рисунок 5.8, б) [101].

При генерации реактивной мощности ток опережает вектор напряжения сети $U_{c.A}$ практически на 90 градусов, вектор падения напряжения $\Delta U_{L_{\text{ЭКВ}}}$ направлен в противоположную сторону относительно вектора напряжения на входе АВ $U_{AB.A}$, также компенсируя разность между напряжением сети и напряжением на входе АВ (рисунок 5.8, в).

Из вышесказанного следует, что для устойчивой работы АВ необходимо, чтобы напряжение на входе АВ и напряжение сети были равны с учетом величины падения напряжения на индуктивности.

В момент включения ФКЦ СТК возникает трехфазное перенапряжение, которое нарушает уравнение баланса работы АВ и приводит к его отключению. В связи с этим в момент возникновения перенапряжения необходимо обеспечить компенсацию разницы напряжений за счет вектора падения напряжения на индуктивности согласующего трансформатора $\Delta U_{L_{\text{ЭКВ}}}$, т.е. перевести АВ в режим потребления реактивной мощности. Это позволит обеспечить снижение величины коэффициента модуляции (не превысить максимально допустимое значение 1,05), тем самым сохранить устойчивость работы системы управления АВ. Необходимо отметить, что при трехфазном провале напряжения более 18%, при переходе АВ в режим работы с генерацией реактивной мощности позволит сохранить устойчивую работу СУ АВ, за счет повышения коэффициента модуляции (не превысить минимально допустимое значение 0,6).

Для дальнейшего построения системы управления с дополнительным контуром регулирования реактивной мощности необходимо определить генерирующую способность ПЧ-АВ.

По формулам, приведенным в работах [98-101], определим реактивную мощность АВ относительно сети (5.8):

$$Q = \frac{U_C \cdot U_{AB} \cdot (X_{L_{\text{ЭКВ}}} \cdot \cos \delta - R_{\text{ЭКВ}} \cdot \sin \delta) - U_C^2 \cdot X_{L_{\text{ЭКВ}}}}{R_{\text{ЭКВ}}^2 + X_{L_{\text{ЭКВ}}}^2}, \quad (5.8)$$

где U_C – амплитуда фазного напряжения сети;

U_{AB} – амплитуда фазного напряжения на входе АВ;

$X_{L_{\text{ЭКВ}}}$ – индуктивное сопротивление трансформатора;

$R_{\text{ЭКВ}}$ – активное сопротивление трансформатора.

Система управления АВ выполнена во вращающейся системе координат dq, для удобства преобразуем выражение (5.8):

$$Q = -\frac{3}{2} \cdot U_d \cdot i_q, \quad (5.9)$$

где U_d – напряжение на входе АВ по оси d;

i_q – ток, потребляемый АВ по реактивной составляющей.

Из формулы (5.9) видно, что максимальная генерируемая или потребляемая реактивная мощность АВ зависит от уровня напряжения на входе АВ и тока по реактивной составляющей. В связи с этим необходимо определить максимальную реактивную мощность при работе на холостом ходу и при номинальной нагрузке.

По выражению (5.10) определим ограничение по току реактивной составляющей:

$$i_{q,\max} = \sqrt{i_{\text{ном.АВ}}^2 - i_d^2}, \quad (5.10)$$

где $i_{\text{ном.АВ}}$ – номинальный ток АВ, 750 А;

i_d – ток, потребляемый по активной составляющей.

Напряжение на входе АВ определим по выражению (5.11):

$$U_d = m \cdot U_{dc} \cdot k_{\text{ШИМ}}, \quad (5.11)$$

где U_{DC} – напряжение в звене постоянного тока;

$k_{\text{ШИМ}}$ – коэффициент ШИМ;

m – коэффициент модуляции.

По формулам (5.9), (5.10), (5.11) были определены значения максимальной генерируемой и потребляемой реактивной мощности исследуемого ПЧ-АВ типа ACS6000 на холостом ходу и при работе на номинальную нагрузку. Построены зависимости $Q=f(U_d, I_q)$ для двух режимов работы, относительно АВ (рисунок 5.9). При работе на холостом ходу максимальная генерируемая мощность АВ составляет 30% от полной мощности АВ, а максимальная потребляемая -17% (рисунок 5.9, а) [100,101]. При номинальной нагрузке максимальные значения составляют 18% и 10%, соответственно (рисунок 5.9, б).

График зависимости $Q_{AB} = f(I_{qAB}, U_d)$, при работе активного выпрямителя на холостом ходу

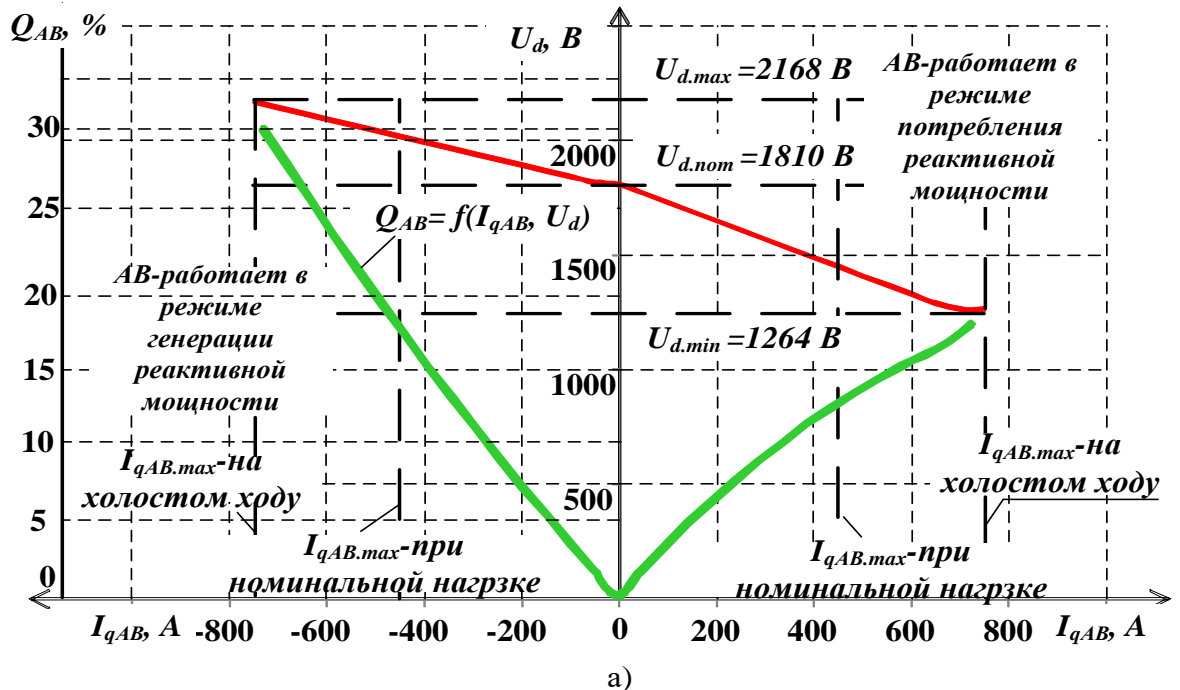


График зависимости $Q_{AB} = f(I_{qAB}, U_d)$, при работе активного выпрямителя при номинальной нагрузке

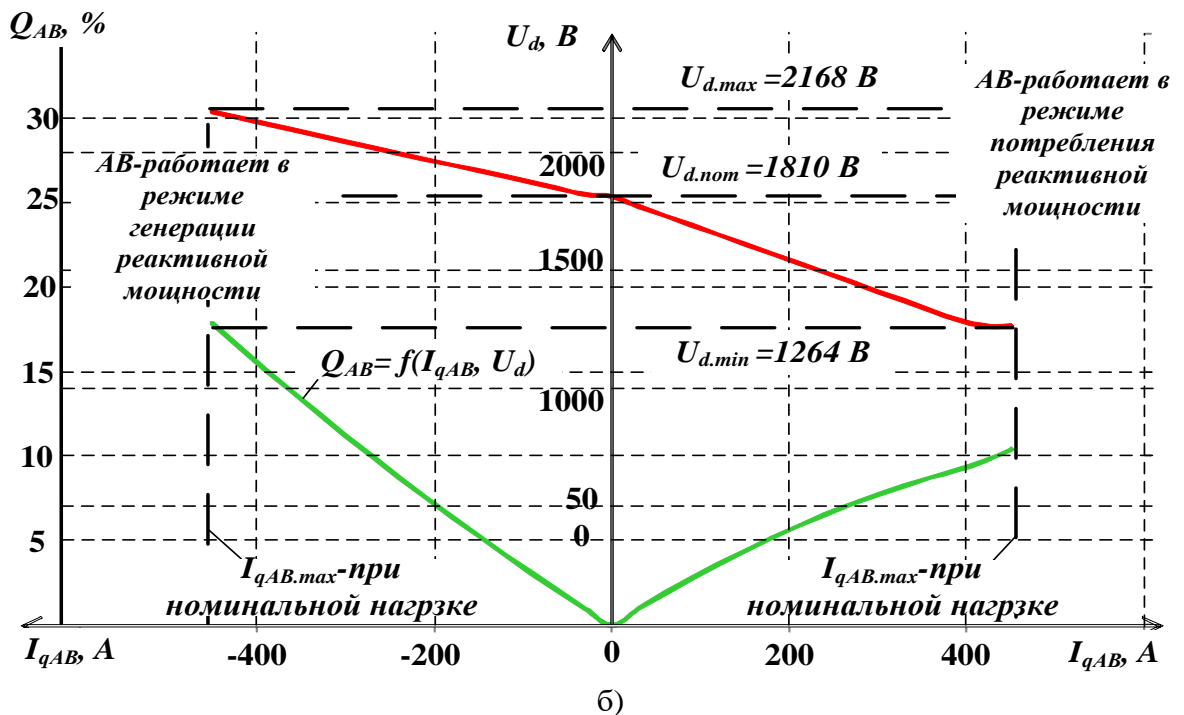


Рисунок 5.9- График зависимости $Q = f(i_q, U_d)$ для режимов работы: а- на холостом ходу; б- при номинальной нагрузке

Падение напряжение на эквивалентном сопротивлении трансформатора определим по формуле (5.12):

$$\Delta U_L = I_q \cdot X_{L_{\text{ЭКВ}}} \quad (5.12)$$

При работе ПЧ-АВ на холостом ходу реактивный ток, протекающий по эквивалентному сопротивлению трансформатора создаст падение напряжения равное 242,2 В (7,6%) от номинального значения на вторичной стороне трансформатора и 406 В (1,2%) на первичной стороне трансформатора. Результаты расчетов приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1- Результаты расчетов генерирующей способности АВ

Режим работы АВ	$I_{q,\text{max}}, \text{A}$	$\Delta U_{L,\text{ВН}}, \text{В}$	$\Delta U_{L,\text{НН}}, \text{В}$	% от $U_{\text{ном.ВН}}$	% от $U_{\text{ном.НН}}$
Холостой ход	700	406	242,2	1,2	7,6
При номинальной нагрузке	450	261,8	155,7	0,75	4,9

По полученным результатам расчетов видно, что компенсации напряжения на вторичной стороне согласующего трансформатора хватит для сохранения устойчивой работы АВ при трехфазном перенапряжении при включении ФКЦ СТК, а также при симметричном провале на напряжения глубиной до 25%.

Для компенсации колебаний напряжения питающей сети в точке подключения АВ, за счет его перевода в режим генерации либо потребления реактивной мощности необходимо модернизировать существующую СУ АВ, добавив блок диагностики напряжения сети, блок ограничения максимального значения реактивной составляющей тока в зависимости от величины тока по активной составляющей.

В блоке диагностики напряжения сети производится сравнение напряжения сети и напряжения на входе АВ во вращающейся системе координат dq по оси d. Сигнал рассогласования напряжений обрабатывается пропорционально-интегральным регулятором напряжений. На его выходе формируется ток задания по реактивной составляющей тока q. Расчет коэффициентов регуляторов

производился по методике, предложенной [103], ориентированной на динамический компенсатор искажения напряжений (ДКИН) по формулам (5.13), (5.14):

$$k_{\Pi} = \sqrt{2} \cdot k_{\text{тр}} \cdot \omega_n \cdot L_{\text{тр}}; \quad (5.13)$$

$$k_{\text{И}} = k_{\text{тр}} \cdot \omega_n^2 \cdot L_{\text{тр}}, \quad (5.14)$$

где $k_{\text{тр}}$ - коэффициент трансформации согласующего трансформатора;

ω_n - незатухающая частота системы;

$L_{\text{тр}}$ - индуктивность согласующего трансформатора.

Рассчитанные коэффициенты регуляторов приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2- Рассчитанные коэффициенты регуляторов контроля напряжения в точке подключения АВ

Параметр	Значение
k_{Π}	0,76
$k_{\text{И}}$	3,21

Рассчитанный ток задания по реактивной составляющей в блоке диагностики напряжения сети поступает в блок ограничения по полному току ПЧ-АВ, в котором реализовано ограничение согласно выше приведенной формуле (5.10) [104-111].

Необходимо отметить, что в нормальном режиме работы напряжение на входе АВ больше напряжения питающей сети, это необходимо для компенсации падения напряжения на элементах сети. В связи с этим в блоке диагностики напряжения сети предусмотрен блок контроля напряжения сети 34,5 кВ, в котором действующие значения линейных напряжений сети 34,5 кВ сравниваются с заданными напряжениями. В случае отклонения всех трех фаз подают разрешающий сигнал на работу блока диагностики сети, в котором формируется задание на генерацию либо потребление реактивной мощности (рисунок 5.10).

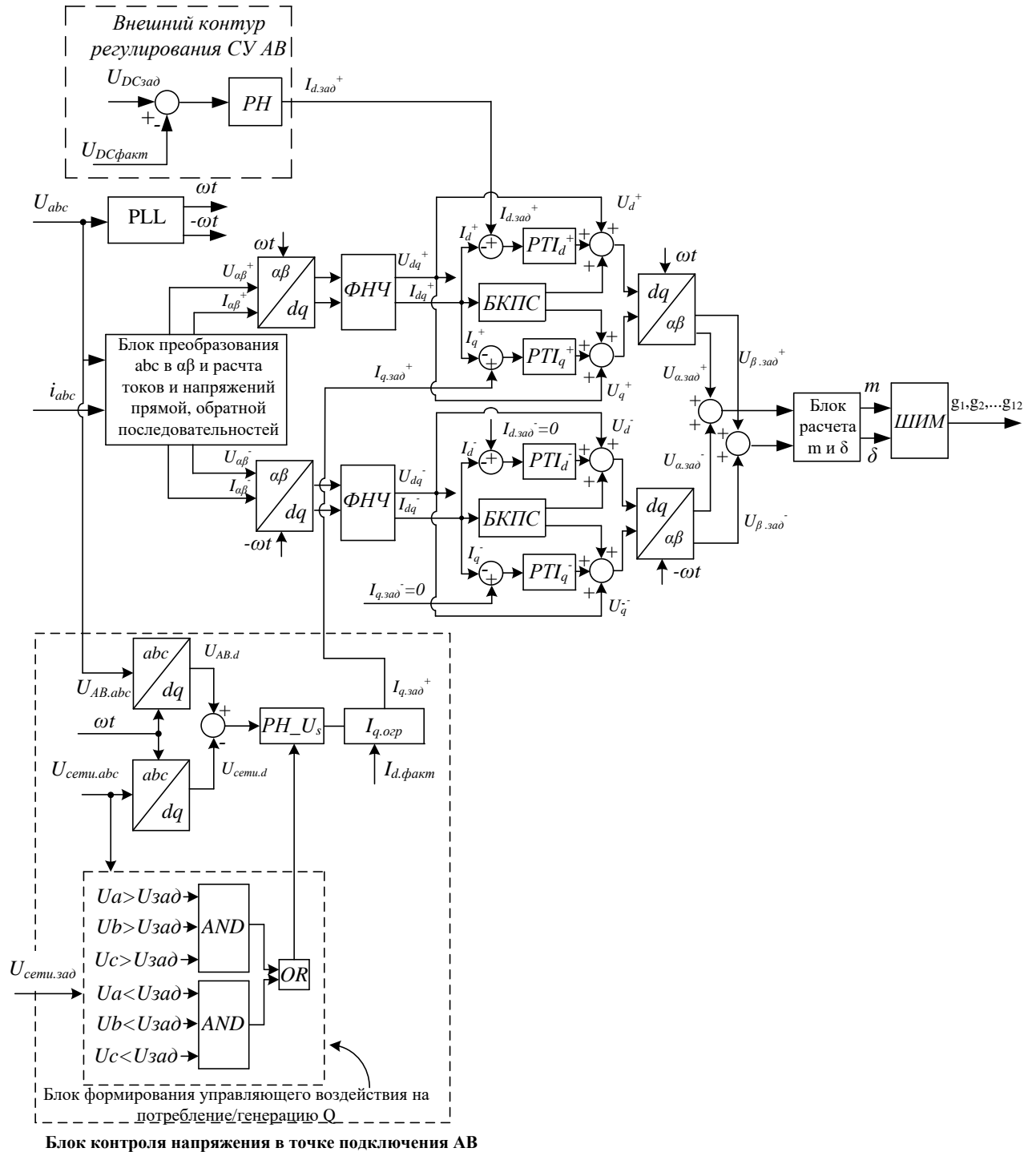


Рисунок 5.10- Структурная схема усовершенствованной СУ АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения сети

5.2 Оценка эффективности разработанной усовершенствованной системы управления ПЧ-АВ

Для оценки эффективности разработанной системы управления ПЧ-АВ проведем исследование переходных процессов токов, потребляемых АВ, и на-

пряжения в звене постоянного тока при наиболее тяжелых режимах работы: при включении печного трансформатора на холостом ходу, при включении ФКЦ СТК, при однофазном провале напряжения.

5.2.1 Оценка эффективности разработанной СУ АВ при включении печного трансформатора

Как и в 4 главе, для проведения исследований переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при включении печного трансформатора на холостом ходу были использованы восстановленные мгновенные значения линейных напряжений на секции шин 34,5 кВ при включении печного трансформатора.

При использовании усовершенствованной СУ АВ бросок тока, потребляемого АВ, составил 1000 А, что на 22,6% меньше чем при использовании существующей системы управления. На протяжении всей длительности переходного процесса токи, потребляемые по фазам, симметричны, их действующие значения не превышают значений номинального тока (рисунок 5.11, б). В связи с тем, что токи по фазам симметричны, через систему управления не протекают токи обратной последовательности, которые создают колебательную мощность, обусловленную второй гармоникой. Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышает 153 В, что на 50 % меньше, чем при использовании существующей СУ. Максимальное значение напряжения в звене постоянного тока в начальный момент переходного процесса составило 4943 В, что на 3,2% меньше чем при существующей СУ (рисунок 5.11, г).

Из проведенных исследований видно, что разработанная СУ АВ [97,110] позволяет повысить устойчивость работы преобразователя частоты с активным выпрямителем при включении печного трансформатора на холостом ходу, а также при несимметрии напряжения, вызванной работой ДСП-250 на секции шин 34,5 кВ.

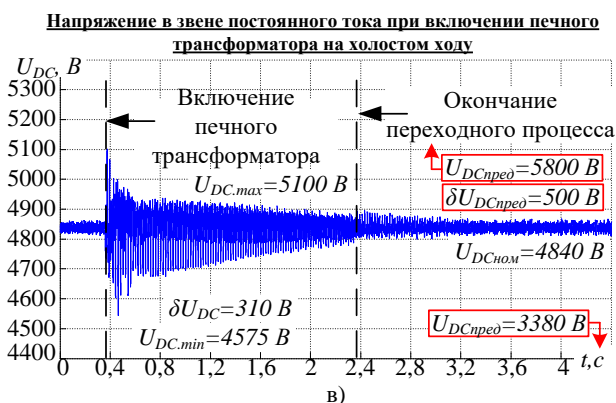
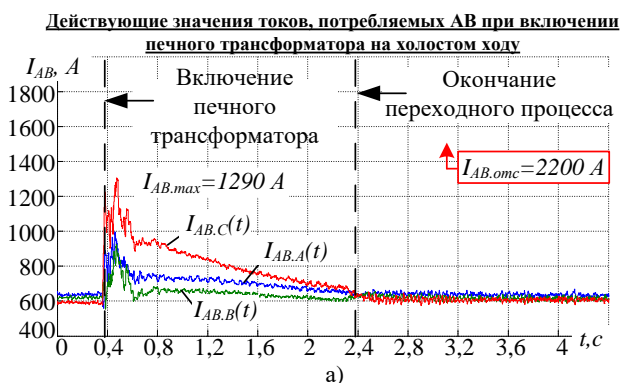
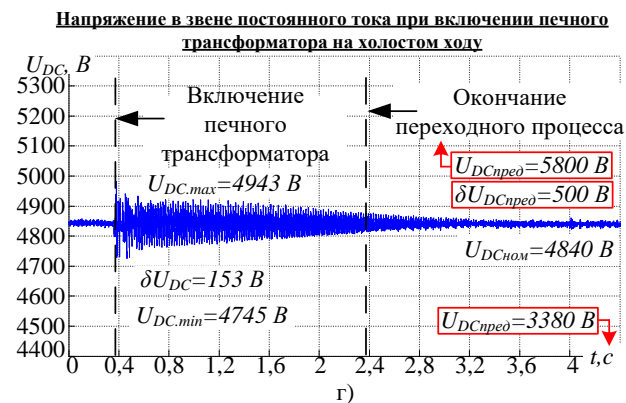
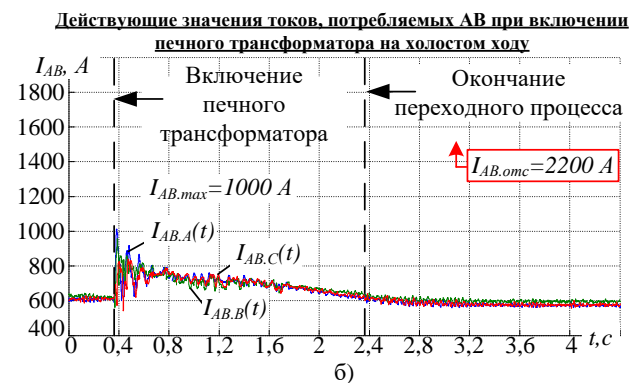
Существующая система управления АВ**Усовершенствованная система управления АВ**

Рисунок 5.11- Переходные процессы токов и напряжения в звене постоянного тока при включении печного трансформатора на холостом ходу: а, в- при использовании существующей СУ; б, г- при использовании усовершенствованной СУ

5.2.2 Оценка эффективности разработанной СУ АВ при включении ФКЦ СТК

Проведенные исследования в 4 главе показали, что при включении ФКЦ СТК на шинах 34,5 кВ возникает перенапряжение от 20 до 30% от номинального уровня, которое вызывает бросок тока, потребляемого АВ. В начальный момент возникновения переходного процесса его величина составляет 2550 А при уставке срабатывания токовой отсечки, равной 2200 А (рисунок 5.12, а). При включении фильтров 2-ой, 3-ей гармоник возникает перенапряжение, значение которого составляет 6750 В при максимально допустимом значении в 5800 В. А также до подачи импульсов управления на тиристоры ТРГ, АВ работает с повышенным уровнем напряжения в звене постоянного тока равным 5350 В (ри-

сунок 5.12, в). При использовании усовершенствованной СУ АВ наблюдается улучшение переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока. Максимальное значение броска тока составило 1850 А, что на 27,5% меньше, чем при использовании существующей СУ, а также нет превышения уставки срабатывания токовой защиты АВ (рисунок 5.12, б). Максимальное значение напряжения в звене постоянного тока не превысило 5650 В, что на 16% меньше, чем при существующей СУ. На протяжении всей длительности переходного процесса напряжение в звене постоянного тока поддерживалось на номинальном уровне 4840 В (рисунок 5.12, г).

Проведенные исследования показали, что при возникновении коммутационных перенапряжений перевод АВ в режим потребления реактивной мощности позволяет избежать аварийного отключения АВ. Необходимо отметить, что потребление тока по реактивной составляющей, не приводит к превышению номинального тока АВ (рисунок 5.12, б) [104-111].

5.2.3 Оценка эффективности разработанной СУ АВ при несимметричных провалах напряжения

Проведем оценку эффективности использования разработанной усовершенствованной СУ АВ при однофазном провале напряжения глубиной 30% в сети 380 кВ в сравнении с существующей системой управления и СУ с введением предмодулирующего сигнала напряжения обратной последовательности.

При использовании существующей СУ АВ однофазный провал напряжения глубиной 30% приводит к возникновению колебаний напряжения в звене постоянного тока, величина которых составляет 602 В, при максимально допустимом 500 В. Коэффициент несимметрии токов обратной последовательности, потребляемых АВ, составил 130%. Действующее значение тока одной из фаз составило 1599 А, что на 158% больше значения тока, потребляемого в нормальном режиме работы (рисунок 5.13, а).

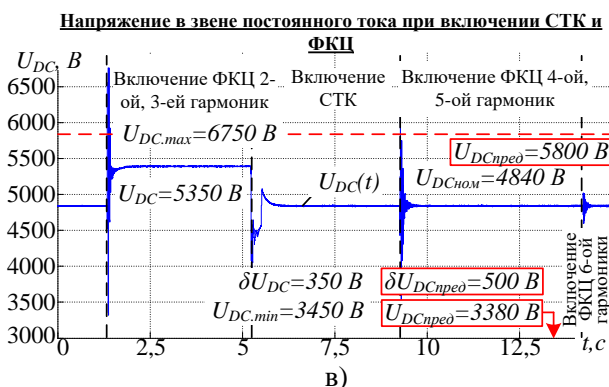
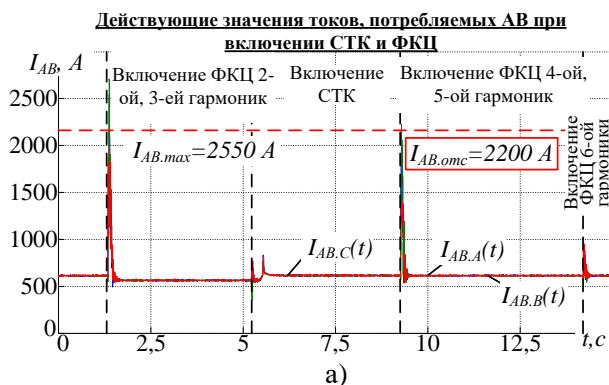
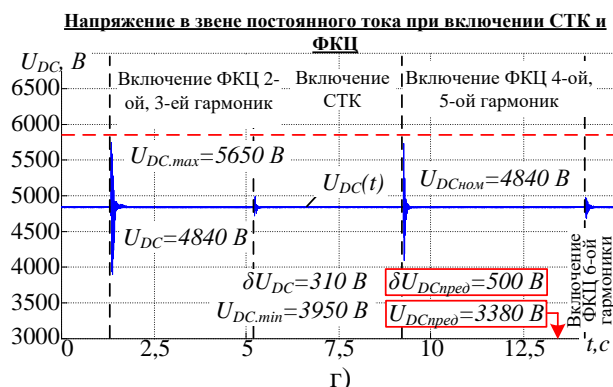
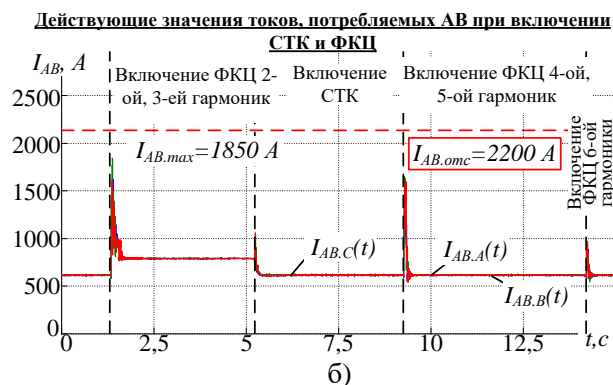
Существующая система управления АВ**Усовершенствованная система управления АВ**

Рисунок 5.12- Переходные процессы токов и напряжения в звене постоянного тока при включении ФКЦ СТК: а, в- при использовании существующей СУ; б, г- при использовании усовершенствованной СУ

Использование предмодулирующего сигнала напряжения обратной последовательности позволяет снизить размах колебаний напряжения в звене постоянного тока до 485 В, что на 19% меньше, чем при использовании существующей СУ. Коэффициент несимметрии токов обратной последовательности, потребляемых АВ не превышает 53%. Действующее значение тока одной из фаз не превышает 1200 А, что на 94% больше значения тока, потребляемого в нормальном режиме работы (рисунок 5.13, б). Необходимо отметить, что в момент восстановления напряжения питающей сети возникает бросок тока, значение которого составило 1403 А.

Заметное улучшение переходных процессов токов и напряжения в звене постоянного тока наблюдается при использовании усовершенствованной СУ. В начальный момент возникновения провала напряжения размах колебаний напряжения не превышал 226 В, что на 62% меньше чем при использовании су-

существующей СУ. После окончания переходного процесса размах колебаний не превышал 25 В. Коэффициент несимметрии токов обратной последовательности не превышал 61%, после отработки контура регулирования токов обратной последовательности коэффициент несимметрии не превышал 0,46% на протяжении всей длительности провала напряжения. В начальный момент возникновения провала напряжения максимальное значение токов составило 1246 А, что на 22% меньше чем при использовании существующей СУ. После окончания переходного процесса токи не превышали 650 А, что на 5% больше значения тока, потребляемого в нормальном режиме работы (рисунок 5.13, в).

Из проведенных исследований видно, что разработанная СУ АВ позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ при однофазном провале напряжения глубиной до 30%.

В связи с этим при большей глубине провалов напряжения необходимо совместное использование СТК и усовершенствованной СУ АВ. Рассмотрим на примере однофазного провала напряжения глубиной 50%, максимальный однофазный провал напряжения, который может быть компенсирован СТК составляет 30% (рисунок 5.14, а). При использовании только СТК, АВ будет отключен максимальной токовой защитой и защитой по размаху колебаний напряжения в звене постоянного тока.

При применении только усовершенствованной СУ АВ со стабилизирующим эффектом, при провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50% сохранить устойчивую работу АВ не удастся, так как размах колебаний напряжения в звене постоянного тока составляет 605 В (рисунок 5.14, б). В связи с увеличением токов, потребляемых АВ по активной составляющей, ток по реактивной составляющей равен 0, а также коэффициент модуляции, формируемый СУ, ниже предельно допустимого значения.

Заметное улучшение переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока наблюдаются при совместном использовании СТК и разработанной СУ АВ.

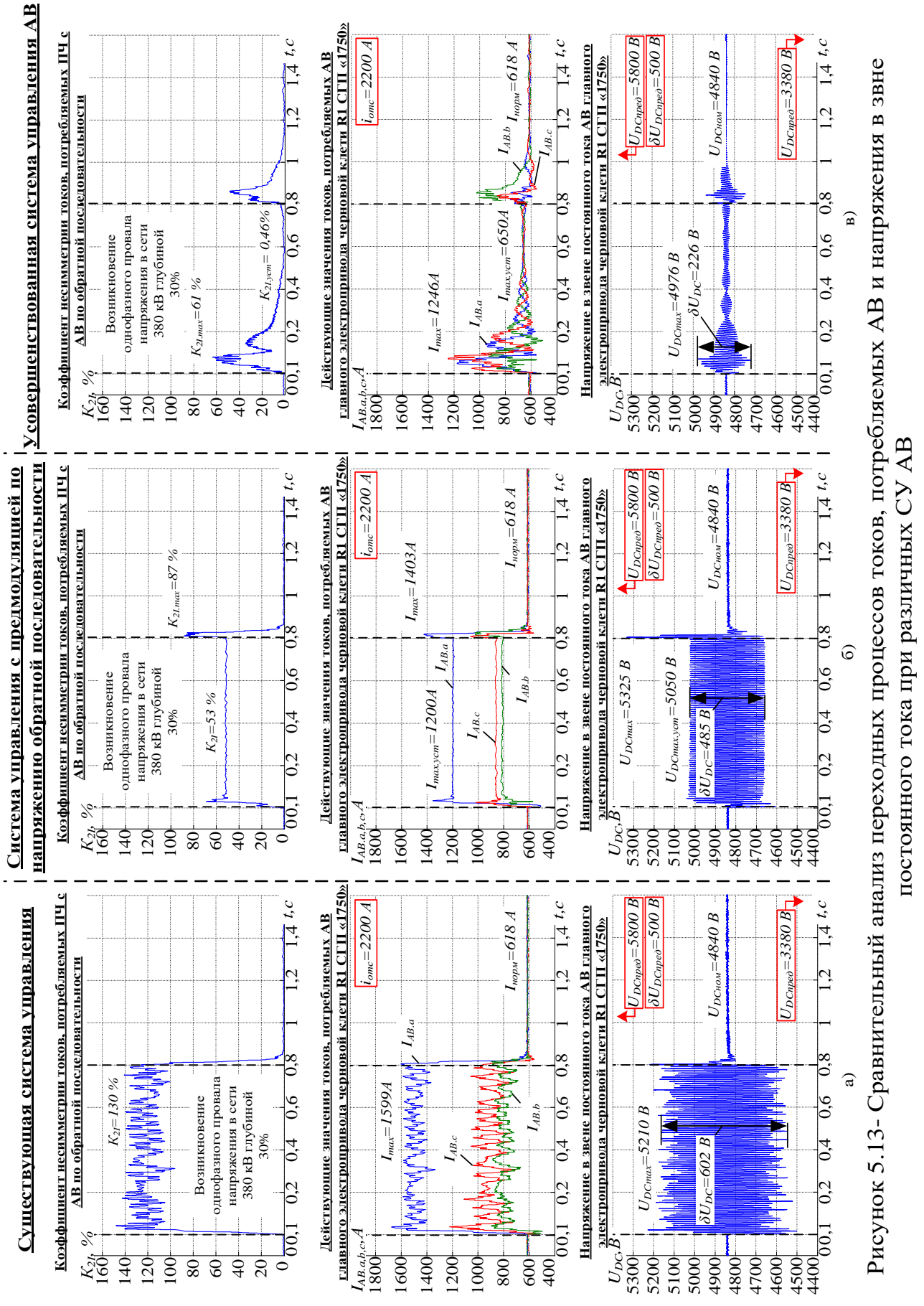


Рисунок 5.13- Сравнительный анализ переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звне постоянного тока при различных СУ АВ

При возникновении провала напряжения глубиной 50% система управления СТК компенсирует минимальное остаточное линейное напряжение до 79% от номинального (рисунок 5.14, в). Далее усовершенствованная СУ АВ переходит в режим генерирования реактивной мощности, тем самым не поддерживая коэффициент модуляции в пределах 0,68-0,72. А также контур регулирования токов по обратной последовательности ослабляет влияние колебательной мощности, обусловленной второй гармоникой, снижая размах колебаний напряжения в звене постоянного тока.

Анализ переходных процессов токов, потребляемых АВ, показал, что при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной до 50%, бросок тока в момент возникновения провала напряжения не превысил значения уставки токовой защиты АВ и составил 1899 А, затем происходит снижение до значения не превышающим номинального тока АВ (рисунок 5.14, в). Максимальное значение напряжения в звене постоянного тока в момент возникновения провала напряжения составило 5425 В, что ниже максимально допустимого значения. Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока не превысило 235 В (рисунок 5.14, в).

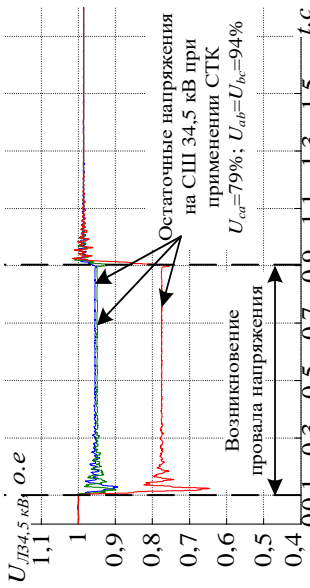
Из проведенных исследований видно, что совместное использование резервов реактивной мощности СТК и разработанной усовершенствованной системы управления АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях питающего напряжения позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ при несимметричных провалах напряжения в сети 380 кВ до 50% любой длительности.

Определим процент провалов напряжения, которые могут быть скомпенсированы при совместном использовании СТК и разработанной усовершенствованной СУ АВ. Для этого из статистических данных, полученных с ГПП завода ЗАО «ММК Metalurji», были выбраны все провалы напряжения, произошедшие за период 2012-2014 гг.

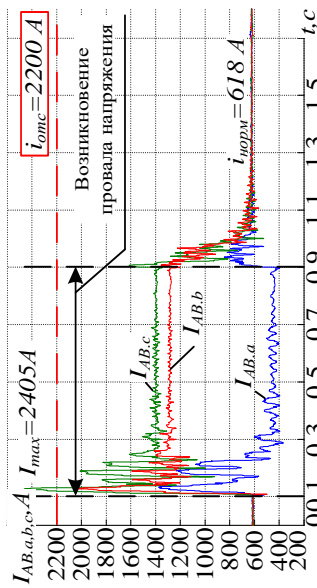
Исследования проводились на разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ». Для проведения исследований в модели питающей

При применении СТК

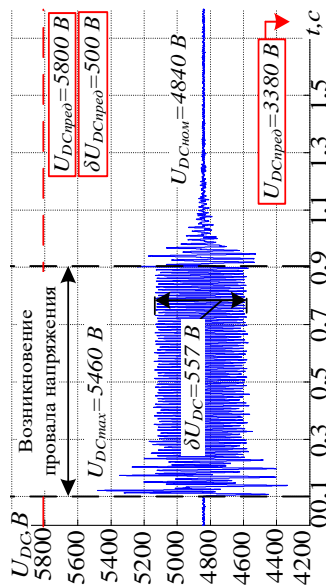
Действующие значения напряжений на СШ 34,5 кВ



Действующие значения токов, потребляемых АВ

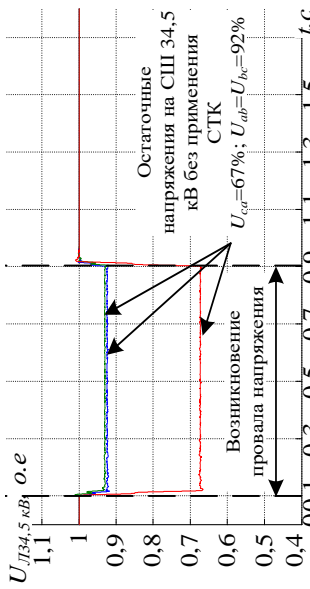


Напряжение в звене постоянного тока АВ

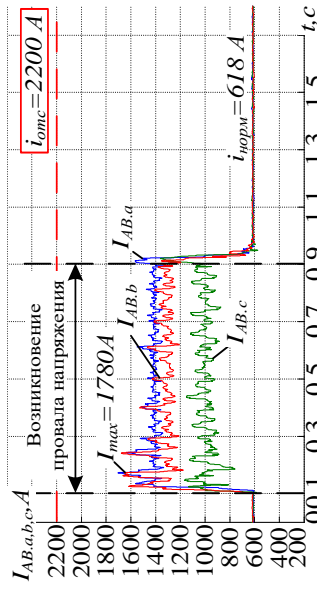


При применении усовершенствованной СУ АВ

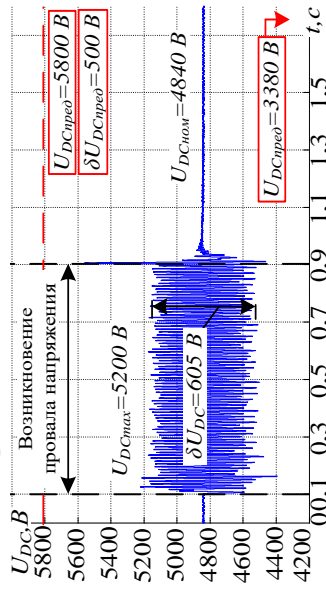
Действующие значения напряжений на СШ 34,5 кВ



Действующие значения токов, потребляемых АВ

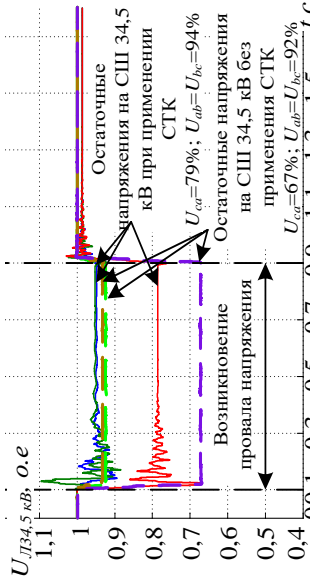


Напряжение в звене постоянного тока АВ

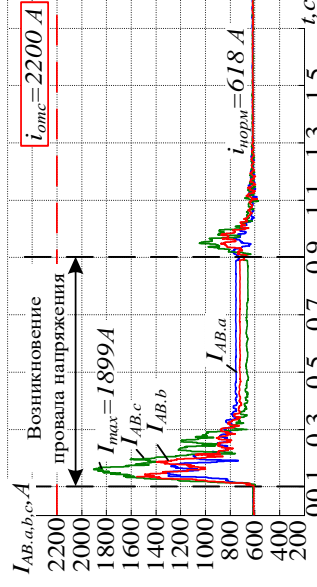


Совместное использование СТК и усовершенствованной СУ АВ

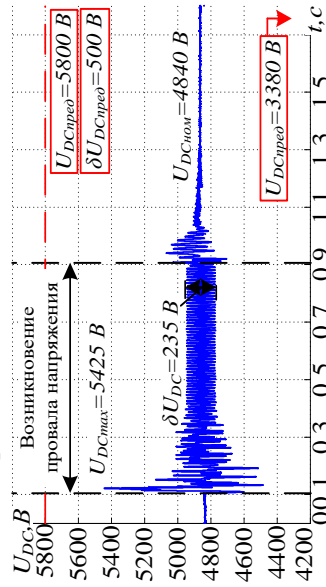
Действующие значения напряжений на СШ 34,5 кВ



Действующие значения токов, потребляемых АВ



Напряжение в звене постоянного тока АВ



а)

б)

Рисунок 5.14- Сравнительный анализ переходных процессов токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50%

сети поочередно задавались глубина и длительность провалов напряжения. Оценку проводили по переходным процессам токов, потребляемых АВ и напряжения в звене постоянного тока. Результаты исследований представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Оценка эффективности разработанной СУ АВ для повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при внешних провалах напряжения в сети

Количество провалов за период 2012-2014 гг	Использование усовершенствованной СУ АВ в составе ПЧ-АВ		Совместное использование СТК и усовершенствованной СУ АВ	
	шт	%	шт	%
Всего провалов	137	100	137	100
Устранено	102	74,5	123	89,8
Не устранено	35	25,5	14	10,2

Исследования показали, что использование разработанной СУ АВ позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ в 74,5% случаев возникновения провалов напряжения. Необходимо отметить, что при совместном использовании СТК и разработанной СУ АВ в составе ПЧ-АВ наблюдается устойчивая работа электроприводов СГП в 90% случаев.

5.3 Выводы по главе 5

1. Разработана усовершенствованная система управления активным выпрямителем со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения питающей сети. Применение усовершенствованной СУ ПЧ-АВ позволяет повысить устойчивость работы АВ при провалах напряжения и несимметрии напряжения, вызванной работой ДСП, благодаря использованию отдельного регулирования токов прямой и обратной последовательностей. А также за счет разработки дополнительного контура регулирования реактивной составляющей тока повысить надежность работы АВ при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК.

2. Проведена оценка эффективности разработанной СУ при включении печного трансформатора на холостом ходу. Применение усовершенствованной СУ АВ позволяет снизить бросок тока, потребляемого АВ при включении печного трансформатора на холостом ходу на 22,6%, а также на протяжении всей длительности переходного процесса токи, потребляемые АВ, симметричны по фазам. Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока снизился на 50%, чем при использовании существующей системы управления. Максимальное перенапряжение в момент включения ПТ на холостом ходу снизилось на 3,2%. Таким образом, использование усовершенствованной СУ АВ при включении ПТ на холостом ходу, а также при несимметрии напряжения в точке подключения АВ, вызванных работой печи позволяет существенно повысить устойчивость работы ПЧ-АВ и избежать аварийных отключений.

3. Применение усовершенствованной СУ позволяет сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК. Максимальное значение броска тока, потребляемого АВ, составило 1850 А, что на 16% меньше уставки срабатывания токовой защиты. Перенапряжение в звене постоянного тока в момент включения ФКЦ составило 5650 В, что на 2,5% меньше максимально допустимого значения. На протяжении всей длительности переходного процесса, вызванного поэтапным включением ФКЦ, напряжение в звене постоянного тока поддерживалось на номинальном уровне.

4. Проведена оценка эффективности усовершенствованной СУ при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ. Исследования показали, что применение разработанной системы управления ПЧ-АВ позволяет сохранить устойчивую работу АВ при провале напряжения до 30%, размах колебаний напряжения в звене постоянного тока в начальный момент провала напряжения не превышал 226 В. После завершения переходного процесса в контуре регулирования токов обратной последовательности размах колебаний напряжения в звене постоянного тока не превышал 25 В. Токи, потребляемые АВ, на протяжении всей длительности провала напряжения были симметричны, бросок тока

в момент возникновения провала напряжения составил 1246 А, что на 22% меньше чем при использовании существующей СУ. Необходимо отметить, что максимальная глубина провала напряжения, при которой АВ сохраняет устойчивую работу, не должна превышать 30%, так при большей глубине провала напряжения для поддержания значения коэффициента модуляции, не превышающего нижнюю границу, необходимо увеличение тока по реактивной составляющей, который ограничен полным током АВ.

5. В связи с этим было предложено совместное использование резервов реактивной мощности СТК и усовершенствованной СУ АВ. Проведены исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при однофазном провале напряжения в сети 380 кВ глубиной 50%. За счет совместного использования СТК и усовершенствованной СУ АВ сохранятся устойчивая работа ПЧ. Бросок тока в момент возникновения провала напряжения 1899 А на 13% меньше уставки срабатывания токовой защиты АВ. После окончания переходного процесса коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности не превышал 2,5%, действующее значение токов составило 750 А, что не превышает номинальный ток ПЧ. Размах колебаний напряжения в звене постоянного тока в установившемся режиме не превышает 235 В, перенапряжение в момент возникновения провала напряжения составило 5425 В, что на 6,5 % меньше максимально допустимого значения. Таким образом, совместное использование резервов реактивной мощности СТК и разработанной усовершенствованной системы управления АВ позволяет обеспечить устойчивую работу АВ при однофазном провале напряжения в питающей сети до 50% от номинального уровня. Таким образом, из статистических данных по провалам напряжения, представленным во 2 главе, видно, что совместное использование СТК и разработанной СУ АВ позволит сохранить устойчивую работу ПЧ-АВ в 90% случаев возникновения провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ, снизить количество брака выпускаемой горячекатаной продукции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих способов снижения негативного влияния несимметрии напряжения питающей сети на работу преобразователей частоты с активными выпрямителями. Большинство способов, направленных на повышение устойчивости работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения питающей сети, основаны на усовершенствовании СУ АВ с помощью введения предмодулирующих сигналов по напряжению обратной последовательности, сигнала напряжения третьей гармоники, напряжения сети, ориентированного по вектору напряжения обратной последовательности. А также перевод АВ в диодный режим работы, при возникновении несимметрии напряжения сети. Необходимо отметить, что предлагаемые способы имеют ряд недостатков: введение предмодулирующих сигналов по напряжению не обеспечивает полной компенсации токов обратной последовательности, в связи с этим амплитуда колебаний напряжения в звене постоянного тока достигает 10%; При переводе АВ в диодный режим работы напряжение в звене постоянного тока значительно снижается, в связи с этим при восстановлении напряжения сети происходит значительный бросок тока, потребляемого АВ. Для оценки возможности предложенного способа повышения устойчивости ПЧ-АВ за счет объединения на параллельную работу главных электроприводов СГП и дуговой сталеплавильной печи, для обеспечения компенсации провалов напряжения во внутризаводской сети за счет резервов реактивной мощности СТК необходимо проведение дополнительных исследований, доказывающих возможность параллельной работы ПЧ-АВ и ДСП.

2. Проведены экспериментальные исследования на действующем оборудовании металлургического завода «ММК Metalurji», г.Дёртйол, Турция. Анализ причин возникновения провалов напряжения показал, что причина возникновения провалов напряжения - короткие замыкания в линии 380 кВ. Провалы напряжения носят сезонный характер. По статистическим данным было установлено, что наиболее часто возникают однофазные провалы напряжения в

сети 380 кВ глубиной 5-50% и длительностью 50-300 мс, они составляют 90% от всех провалов напряжения. Большинство из них приводят к аварийному отключению главных электроприводов СГП «1750». С помощью программного обеспечения Drive Window были получены переходные процессы токов, протекающих в ПЧ-АВ при возникновении однофазного провала напряжения в сети 380 кВ глубиной 13%. Анализ переходных процессов показал, что однофазный провал напряжения приводит к увеличению и несимметрии токов, потребляемых АВ. А также составляющая обратной последовательности токов вызывает колебания напряжения в звене постоянного тока, амплитуда которых составляет 6% от номинального значения. При проведении экспериментальных исследований были получены массивы мгновенных значений напряжений и токов, потребляемых ДСП-250, а также при коммутационных процессах, вызванных включением ПТ на холостом ходу и включением ФКЦ в составе СТК. Анализ экспериментальных данных показал, что при работе печи наблюдается несимметрия напряжения на шинах 34,5 кВ, коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности достигает 7%. При включении ФКЦ СТК возникают перенапряжения, которые достигают 20-30% от номинального уровня.

3. Разработана усовершенствованная имитационная модель комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ», которая позволяет проводить исследования переходных процессов, протекающих в ПЧ-АВ при отклонениях напряжения сети, вызванных: внешними провалами напряжения, работой ДСП, а также при коммутации основного электрооборудования электросталеплавильного комплекса.

4. На разработанной усовершенствованной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК-ПЧ-АВ» доказана возможность повышения устойчивости работы АВ за счет компенсации однофазного провала напряжения глубиной 30% за счет резервов реактивной мощности СТК. Проведены исследования возможности параллельной работы ДСП и ПЧ-АВ при работе печи, включении ПТ на холостом ходу, коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК. Исследования показали, что несимметрия напряжений, вызванная работой печи и включением ПТ, приводит к несимметрии токов, по-

требляемых АВ, и увеличению размаха колебаний напряжения в звене постоянного тока. Включение ФКЦ СТК приводит к аварийному отключению ПЧ внутренними защитами АВ.

5. Разработана усовершенствованная система управления АВ в составе ПЧ-АВ со стабилизирующим эффектом при возмущениях напряжения в точке подключения ПЧ. В системе управления реализован контур регулирования тока по реактивной составляющей, а также контур регулирования ортогональных составляющих тока по прямой и обратной последовательностей. Проведена оценка эффективности разработанной СУ АВ при коммутации основного электротехнического оборудования электросталеплавильного комплекса. Применение усовершенствованной СУ АВ позволяет снизить несимметрию токов, потребляемых АВ, размах колебаний напряжения в звене постоянного тока при работе ДСП-250, включении печного трансформатора. Это позволяет избежать аварийного отключения АВ при коммутационных перенапряжениях, вызванных включением ФКЦ СТК.

6. Проведены исследования переходных процессов токов, потребляемых АВ, и напряжения в звене постоянного тока при совместном использовании резервов реактивной мощности и разработанной усовершенствованной СУ АВ в составе ПЧ-АВ. Исследования показали, что при совместном использовании СТК и разработанной СУ АВ наблюдается устойчивая работа ПЧ-АВ при однофазных провалах напряжения в сети 380 кВ глубиной до 50%. Это позволит сохранить устойчивую работу главных электроприводов клетей СГП «1750» в 90% случаев возникновения провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ, снизить количество брака выпускаемой горячекатаной продукции. Разработанный способ повышения устойчивости работы ПЧ-АВ при несимметрии напряжения сети рекомендован для расширенного применения на компактных металлургических предприятиях, эксплуатирующих электросталеплавильные и прокатные комплексы.

7. Оформлен акт внедрения на использование результатов диссертационного исследования на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмшин Т.Р. Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов и др. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: энергетика. – 2014. - №2. – С.80-87.
2. Храмшин Т.Р. Исследование воздействия активных выпрямителей большой мощности на питающую сеть / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев и др. // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2013. - №1. – С.80-83.
3. Карандаев А.С. Способы повышения устойчивости частотно-регулируемых электроприводов при нарушениях электроснабжения / А.С. Карандаев, Р.Р. Храмшин, Т.Р. Храмшин и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. - №1. - С.62-69.
4. 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.A. Nikolaev, A.S. Maklakov, M.V. Bulanov and et.al. // Energies. – 2023. – Vol.16, No.1.- P.293.
5. Маклаков А.С. Схемы подключения к сети мощных рекуперативных электроприводов клеток прокатных станов / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, А.А. Радионов и др. // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. - №4 (57). – С.42-53.
6. Маклаков А.С. Исследование спектров тока 18-пульсной схемы подключения трехуровневых активных выпрямителей / А.С. Маклаков, Т.А. Лисовская, Т. Цзин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. - №44. – С.25-44.
7. Радионов А.А. Трехуровневый активный двунаправленный преобразователь частоты в составе реверсивных электроприводов среднего напряжения: современное состояние и способы управления/ А.А. Радионов, А.С. Мак-

лаков // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2015. - №6. – С.80-87.

8. 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.

9. Zhou Y. Operation of Grid-Connected DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition / Y. Zhou, P. Bauer, J.A. Ferreira, J. Pierik // IEEE Transactions On Energy Conversion. – 2009. - №1. – pp.240-246.

10. Alepuz S. Control Strategies Based on Symmetrical Components for Grid-Connected Converters Under Voltage Dips / S. Alepuz, S. Busquets-Monge, J. Bordonau et al. // IEEE Transactions On Industrial Electronics. – 2009. - №6. – pp.2162-2173.

11. Федотов А.И. Влияние ДКИН на качество электроэнергии при коротких замыканиях в питающих электрических сетях / А.И. Федотов, Р.В. Кузнецов, Е.А. Федотов и др. // Известия ВУЗ. Проблемы энергетики. – 2015. - № 3-4. – С.36-41.

12. Крубцов Д.С. повышение устойчивости мощных электроприводов на базе активных выпрямителей при провалах напряжения / Д.С. Крубцов, Т.Р. Храмшин, С.Г. Вишняков // Материалы 72-й международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» МГТУ им. Г.И. Носова. – 2014.- Т2. – С.113-118.

13. Храмшин Т.Р. Повышение устойчивости мощных активных выпрямителей при провалах напряжения / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014 Саранск. – 2014. – Т2. – С.334-338.

14. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. - Екатеринбург: УРО РАН. – 2000. – 654 с.

15. Патент РФ на полезную модель №148288, МПК H02M 7/00, H02M 7/5395. Высоковольтный преобразователь частоты большой мощности с активными выпрямителями / Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов //БИПМ – 2014. №33.

16. Патент № 2734554 С1, Российская Федерация, МПК H02M 5/451. Устройство управления трехфазными трехуровневыми активными выпрямителями напряжения: №2020120344: заявл. 19.06.2020: опубл. 20.10.2020 / Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN IPVNU.

17. Патент № 2699374 С1, Российская Федерация, МПК H02M 5/451, H02M 7/483, H02M 7/758. Устройство управления высоковольтным преобразователем частоты: №2018127895: заявл. 31.07.2018: опубл. 05.09.2019 / Т.Р. Храмшин, Р.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». – EDN KTSEVV.

18. Крубцов Д.С. Повышение устойчивости активных выпрямителей электроприводов прокатных станов к несимметрии питающего напряжения // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. - №2 (35). – С.19-24.

19. Храмшин Т.Р. Математическая модель активного выпрямителя в несимметричных режимах работы/ Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1. – № 2. – С. 3-9.

20. Николаев А.А. Повышение надежности работы главных электроприводов реверсивного стана 1750 холодной прокатки ЗАО «ММК Metalurji» за

счет уменьшения влияния провалов напряжения на работу преобразователя частоты / А.А. Николаев, М.В. Буланов, А.С. Денисевич, И.Г. Гилемов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2016. – Т.1. – С.152-154.

21. Ивекеев В.С. Повышение устойчивости работы электроприводов прокатных станов при провалах напряжения за счет применения статического тиристорного компенсатора: дис. ...кан. техн. наук / Ивекеев В.С. - Магнитогорск, 2021. – 150 с.

22. Шпиганович А.Н. Провалы напряжения в высоковольтных электрических сетях / А.Н. Шпиганович, И.А. Черных, И.Г. Шилов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2006. - №1. – С.16-19.

23. Абрамович Б.Н. Методы компенсации провалов напряжения в электрических сетях нефтедобывающих предприятий / Б.Н. Абрамович, Д.А. Устинов, Ю.А. Сычев, А.Я. Шклярский // Нефтяное хозяйство. – 2014. - № 8. – С.110-112.

24. Shklyarskiy A.Y. Voltage dips compensation via boosting transformer cascades / A. Y. Shklyarskiy, V.S. Dobush // International Journal of Applied Engineering Research. – 2016. – Vol.11, No.6. – P.4275-4279.

25. Дыбко М.А. Исследование параллельной работы многоуровневых преобразователей напряжения для систем накопления энергии / М.А. Дыбко, С.В. Брованов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2013. - №4 (53). – С.156-167.

26. Николаев А.А. Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинции Хатай и Адана Турецкой республики / А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. – 2018. - №1. – С.61-70.

27. Николаев А.А. Исследование провалов напряжения металлургического завода ЗАО ММК Metalurji и способы их локализации / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев // Сборник трудов XLIII Международной научно-

практической конференции «ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2013»: - М.: Издательский Дом МЭИ. - 2013. – С.16-18.

28. Корнилов Г.П. Особенности электроснабжения металлургического завода «ММК Metalurji» / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев и др. // Электротехнические системы и комплексы. – 2012.- №20. – С.235-238.

29. Славгородский В.Б. Особенности аварийного электроснабжения металлургического завода «ММК Metalurji» / В.Б. Славгородский, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин и др. // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. - №21. – С.253-257.

30. Николаев А.А. Анализ влияния коротких замыканий в электрической сети 380 кВ на провалы напряжения в системе внутризаводского электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» (г.Дёртйол, Турция) / А.А. Николаев, Е.С. Буксартов, А.С. Даниленко и др. // Сборник трудов 74-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»: - Изд-во: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – 2016. – С.155-158.

31. Корнилов Г.П. Ограничение провалов напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.Ю. Коваленко, А.А. Николаев и др. // Электроэнергетика. – 2014. - №2 (23). – С.44-48.

32. Пупин В.М. Анализ провалов напряжений в питающих сетях предприятий и способы защиты электрооборудования / В.М. Пупин, Д.С. Куфтин, Д.О. Сафонов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. - №4. – С.35-41.

33. Mmkturkey.com.ru: Официальный сайт предприятия ЗАО «ММК Metalurji» [Электронный ресурс]. – Дортйол. – Режим доступа: <http://mmkturkey.com.ru>, свободный.- Загл. с экрана.

34. Ушаков С.Н. Литейно-прокатный комплекс металлургической компании «ММК Metalurji» [Текст]: монография / С.Н. Ушаков, В.А. Бигеев, А.М. Столяров // Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова. - 2013.- 114 с.

35. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. Учебник для электротехнических и энергетических вузов и факультетов . – М.: Энергия. – 1970. – 520 с.
36. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ. – 2014. – 19 с.
37. Корнилов Г.П. Моделирование электротехнических комплексов промышленных предприятий / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин // Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. Гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова. – 2014. – 239 с.
38. O'Brien K. Active rectifier for medium voltage drive systems / K. O'Brien, R. Teichmann, S. Bernet // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE). – 2001. – С.557-562.
39. 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. – Т.3 - №2. – С.29-41.
40. 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. – Т.97. – №11. – С.1786-1817.
41. 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. Hasanin // International Journal of Electronics and Communication Engineering. – 2013. – Т.1. - №1. – С.43-52.
42. 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.
43. Гасияров В.Р. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделен-

ных гармоник / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. - №1 (34). – С.4-9.

44. Маклаков А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения / А.С. Маклаков, В.Р. Гасияров, А.В. Белый // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 1. – № 1. – С. 23-30.

45. 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.

46. Маклаков А.С. Влияние на сеть трёхфазного мостового двухуровневого активного выпрямителя напряжения при различных видах ШИМ / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 40-47.

47. Лукьянов С.И. Разработка математической модели электропривода отводящего рольганга широкополосного стана горячей прокатки / С.И. Лукьянов, Н.В. Швидченко, Р.С. Пишнограев, Д.В. Швидченко // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. - 2011. - № 1-2. – С. 71-76.

48. Храмшин Т.Р. Математическая модель силовой схемы мощного СТАТКОМа / Т.Р. Храмшин, И.Р. Абдулвелеев, Г.П. Корнилов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2. – № 1. – С. 38-46.

49. Маклаков А.С. Имитационное моделирование главного электропривода прокатной клетки толстолистового стана 5000 / А.С. Маклаков // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – № 3. – С. 16-25.

50. Храмшин Т.Р. Методы широтно-импульсной модуляции мощных активных выпрямителей при несимметрии напряжения/ Т.Р. Храмшин, Д.С. Крубцов, Г.П. Корнилов // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.- 2014.-Т.2.- №4.- С.7-13.

51. Lisovskaya T.A. Linearization Small Deviation Model of Active Front End Rectifier / T.A. Lisovskaya, A.S. Maklakov, R.A. Lisovsky, T. Jing // Proceedings – 2020 Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research and Practice, PEAMI 2020, Magnitogorsk. – 2020. – С.133-136. - DOI 10.1109/PEAMI49900.2020.9234369.

52. Маклаков А.С. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.2. - №1. – С.30-37.

53. Охоткин Г.П. Способ векторной широтно-импульсной модуляции в многоуровневом преобразователе напряжения / Г.П. Охоткин, И.И. Иванчин // Вестник Чувашского университета. – 2022. - №1. – С.107-114.

54. Брованов С.В. Влияние небаланса напряжений конденсаторов однофазного трехуровневого преобразователя на пульсационную составляющую их токов / С.В. Брованов, М.А. Дыбко, Е.В. Гришанов // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2014. - №4 (78). – С.153-164. – DOI 10.17212/2307-6879-2014-4-153-164.

55. Шишков А.Н. Сравнительный анализ методов широтно-импульсной модуляции для трехуровневого инвертора напряжения с фиксированной нейтральной точкой / А.Н. Шишков, В.К. Ле, М.М. Дудкин // Наука, техника, педагогика высшей школы. Новые технологии = Science, Engineering, Higher education Pedagogics. New Technologies, Москва, 01-04 марта 2022 года. – 2022. – С.303-313.

56. Маклаков А.С. Математическое описание трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью на базе активного выпрямителя и автономного инвертора напряжения / А.С. Маклаков // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2016. – Т.16. - №4. – С.49-59. – DOI 10.14529/power160407.

57. Брованов С.В. Анализ способов баланса напряжений на конденсаторах звена постоянного тока в однофазном трехуровневом преобразователе /

С.В. Брованов, Е.В. Гришанов // Научный Вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. - №1 (58). – С.213-230. – DOI 10.17212/1814-1196-2015-1-213-230.

58. Саввин Н.Ю. Математическое моделирование преобразователя частоты с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией / Н.Ю. Саввин, Д.Д. Гарбузов // Вестник кибернетики. – 2023. – Т.22. - №2. – С.46-58. – DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-46-58.

59. Патент №2622043 Российская Федерация, МПК H02M 1/08, H02M 7/66, H02M 7/757. Система управления управляемого выпрямителя напряжения: №2015147839: заявл. 06.11.2015: опубл. 09.06.2017 / Г.Е. Кувшинов, Л.А. Наумов, Ю.Г. Себто, М.В. Красковский; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИПМТ ДВО РАН).

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

61. 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.

62. 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. - №№. – С.57.

63. 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.

64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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. – N.18. - №1. – С.642-652.
68. 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.
69. Moeini A. A DC Link sensor-less voltage balancing technique for cascaded H-bridge multilevel converters with asymmetric selective harmonic current mitigation PWM / A. Moeni, S. Wang // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2018. – Т.33. - №9. – С.7571-7581.
70. Zhou K. Optimal selective harmonic control for power harmonics mitigation / K. Zhou, Y. Yang, F. Blaabjerg, D. Wang // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2015. – Т.62. - №2. – С.1220-1230.
71. Абрамов Б.И. Активные выпрямители как универсальное средство повышения качества электроэнергии в системах электроснабжения буровых установок с частотно-регулируемым электроприводом / Б.И. Абрамов, А.И. Коган, В.М. Понамарев и др. // Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016, Пермь, 03-

07 октября 2016 года. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – 2016.- С.372-376.

72. Шевырёв Ю.В. Улучшение формы напряжения в системах электропитания предприятий минерально-сырьевого комплекса с активным выпрямителем / Ю.В. Шевырёв, Н.Ю. Шевырёва // Горный журнал. – 2019. - №1. – С.66-69. – DOI 10.17580/gzh.2019.01.14.

73. Буланов М.В. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электроприводов с активными выпрямителями в системах электроснабжения при наличии резонансных явлений: дис. ...кан. техн. наук / Буланов М.В. – Магнитогорск, 2022. – 152 с.

74. 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.

75. Гилемов И.Г. Повышение качества электроэнергии во внутризаводских распределительных сетях за счет усовершенствованных систем управления активных выпрямителей: дис. ...кан. техн. наук / Гилемов И.Г. - Магнитогорск, 2023. – 160 с.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. Николаев А.А. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривозовского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, и др. // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал.- 2014.-№1.-С.59-69.

80. Nikolaev A.A. Application of Static Var Compensator of Ultra-High Power Electric Arc Furnace for Voltage Drops Compensation in Factory Power Supply Systems of Metallurgical Enterprise / A.A. Nikolaev, G.P. Kornilov, T.R. Khrumshin, I. Akcaay, Y. Gok // Proceedings of IEEE 2014 Electrical Power and Energy Conference. (EPEC 2014). PP. 235-241.

81. Николаев А.А. Разработка математической модели электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь- статический тиристорный компенсатор» [Текст] / А.А. Николаев, В.В. Анохин, П.Г. Тулупов // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. - №4 (33). – С.61-71.

82. Тухватуллин М.М. Анализ современных устройств FACTS, используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России / М.М. Тухватуллин, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин, Ф.Ф. Урманова // Электротехнические системы и комплексы. – 2015. - №3 (28). – С.41-46.

83. Корнилов Г.П. Исследование гармонического состава тока дуговых сталеплавильных печей различной мощности / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев и др. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Сборник трудов 71-ой международной научно-технической конференции. – 2013. – С.62-64.

84. Корнилов Г.П. Особенности моделирования дуговой сталеплавильной печи как электротехнического комплекса: Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова: сб. науч. тр. / Г.П.

Корнилов, А.А. Николаев, Т.Ю. Вахитов, И.А. Якимов. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорского техн. ун-та. – 2013. – С.76-82

85. Николаев А.А. Повышение эффективности работы дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь за счет применения усовершенствованных алгоритмов управления электрическими режимами / А.А. Николаев – Монография. – Магнитогорск: ФГБОУ ВПО «МГТУ», - 2015. – 161 с.

86. Николаев А.А. Сравнительный анализ современных систем управления электрическим режимом дуговых сталеплавильных печей и установок ковш-печь / А.А. Николаев, П.Г. Тулупов, В.С. Ивекеев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2020. – Т.20. - №3. – С.52-64.

87. Николаев А.А. Улучшение динамических показателей статического тиристорного компенсатора мощной дуговой сталеплавильной печи в режиме демпфирования провалов напряжения возникающих во внешней питающей сети / А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин // Сборник трудов XLV Международной научно-практической конференции «ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ-2015»: - М.: Издательский Дом МЭИ. - 2015. – С.198-201.

88. Николаев А.А. Разработка усовершенствованного алгоритма демпфирования колебаний мощности в электроэнергетической системе за счет статических тиристорных компенсаторов электродуговых печей / А.А. Николаев, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев // Сборник трудов XLVIII Международной научно-практической конференции «ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ- 2018»: - М.: Издательский Дом МЭИ. – 2018. – С.205-213.

89. Bhonsle D.C. Design and Analysis of Composite Filter for Power Quality improvement of Electric Arc Furnace / D.C. Bhonsle, R.V. Kelkar // Proceedings of the Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference on Istanbul, Turkey. – 2013. – pp.1-10.

90. Gercek C.O. Design, Implementation and Operation of a New C-Type 2nd Harmonic Filter for Electric Arc and Ladle Furnaces / M. Ermis, A. Ertas, K.N.

Kose, O. Unsar // IEEE Transactions on Industry Applications. – Vol.47, Issue 4. – 2011. – pp.1545-1557.

91. Mehrabah B. SVC Refurbishment for Smart Grid Power Quality Enhancement and Life Extension / B. Mehrabah, D. Reed, R. Gutman, B. Depommier, R. Hariharan, S.R. Mendis, S. Shah // Proceedings of the T&D Conference and Exposition, - IEEE PES. – Chicago. IL. USA. – 2014. – pp.1-8.

92. Долгополов А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы для электрических сетей / А.Г. Долгополов, Д.В. Кондратенко, С.В. Уколов, В.М. Постолатий // Проблемы региональной энергетики. – 2011. - №3. – С.1-20.

93. Николаев А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи: дис. ...кан. техн. наук / Николаев А.А. - Магнитогорск, 2009. – 205 с.

94. Николаев А.А. Разработка способа снижения коммутационных перенапряжений при наличии фильтров высших гармоник статического тиристорного компенсатора / А.А. Николаев, В.В. Анохин, Ф.Ф. Урманова // Электротехника: сетевой электронный научный журнал.-2015.-Т.2.-№4.-С.72-76.

95. Suh Y. Control Scheme in Hybrid Synchronous Stationary Frame for PWM AC/DC Converter Under Generalized Unbalanced Operating Conditions / Y. Suh, T.A. Lipo // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2006. – Vol.42. - №3.- С.825-835.

96. Suh Y. A Comparative Study on Control Algorithm for Active Front-End Rectifier of Large Motor Drives Under Unbalanced Input / Y. Suh, Y. Go, D. Rho // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Vol.47. - №3.- С.1419-1431.

97. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2019664575. Математическая модель системы управления активного выпрямителя с функцией сохранения устойчивости при параллельной работе с электродуговой печью / А.А. Николаев, А.С. Денисевич; №2019663567; заявл. 31.10.2019; опубл. 08.11.2019. 31635 Кб.

98. Маклаков А.С. Энергоэффективное управление двунаправленным преобразователем частоты в составе электропривода ветрогенератора / А.С. Маклаков, А.А. Радионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т.2. - №4. – С.21-26.

99. Радионов А.А. О возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством электропривода на базе AC-DC-AC преобразователя / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Известия высших учебных заведений. электромеханика. – 2014. - №2. – С.72-83.

100. Маклаков А.С, Компенсация реактивной мощности в питающей сети с помощью электропривода на базе четырехквadrантного преобразователя / А.С. Маклаков, Е.А. Карякина // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. – 2014. – Т.2. – С.177-181.

101. Маклаков А.С. Энергосберегающий электропривод на базе двухзвенного преобразователя частоты с активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения / А.С. Маклаков, В.Р. Гасияров, А.В. Белый // Электромеханика: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т1. - №1. – С. 23-30.

102. Радионов А.А. Компенсация реактивной мощности в сети с помощью активного выпрямителя напряжения / А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. - №21. – С.226-231.

103. Barros J.D. Multilevel Optimal Predictive Dynamic Voltage Restorer / J.D. Barros, J.F. Silva // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2010. – Vol.57. - №8.- С.2747-2760.

104. Николаев А.А. Исследование параллельной работы автоматизированных электроприводов прокатного стана и дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, М.В. Буланов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – №3. – С. 59-69.

105. Николаев А.А. Повышение устойчивости работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электросталеплавильного комплекса / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, В.С.

Ивекеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. – №5. – С. 48-58.

106. Николаев А.А. Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, В.А. Лаптова // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. - №3 (48). – С.33-40.

107. Nikolaev A.A. Sustainability of High-Power Frequency Converters with Active Rectifiers Connected in Parallel with “EAF-SVC” Complex / A.A. Nikolaev, A.S. Denisevich, L.I. Antropova // Proceedings 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, 04–05 октября 2019 года. – Magnitogorsk: IEEE, 2019. – P. 127-133. – DOI 10.1109/PEAMI.2019.8915322.

108. Nikolaev A.A. Improvement of Stability of Frequency Converters with Active Rectifiers during Voltage Sags and Parallel Operation with an Electric Arc Furnace / A.A. Nikolaev, A.S. Denisevich, V.A. Laptova // Proceedings 2020 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, 25–26 сентября 2020 года. – Magnitogorsk: IEEE, 2020. – P. 38-43. – DOI 10.1109/PEAMI49900.2020.9234354.

109. Kosmatov V.I. Study of the 34,5 kV Network Voltage Quality During the Parallel Operation of an Electric Arc Furnace and Rolling Mill Electric Drives / V.I. Kosmatov, A.S. Denisevich, V.S. Ivekeev, V.A. Laptova // Proceeding- International Ural Conference on Measurements, UralCon 2021, Magnitogorsk, 24–26 сентября 2021 года. – Magnitogorsk: International Ural Conference on Measurements., 2021. – P. 644-648. – DOI 10.1109/UralCon52005.2021.9559604.

110. Патент на изобретение № 2793193. Устройство управления высоковольтным преобразователем частоты с активным выпрямителем / А.А. Николаев, А.С. Денисевич; №2022132190; заяв. 09.12.2022; опубл. 29.03.2023.

111. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019661091. Программа для анализа параллельной работы комплекса «Дуговая сталеплавильная печь-статический тиристорный компенсатор» и электроприводов прокатного стана / А.А. Николаев, А.С. Денисевич; № 2019619968; заявл. 14.08.2019; опубл. 19.08.2019. 1113 кб.

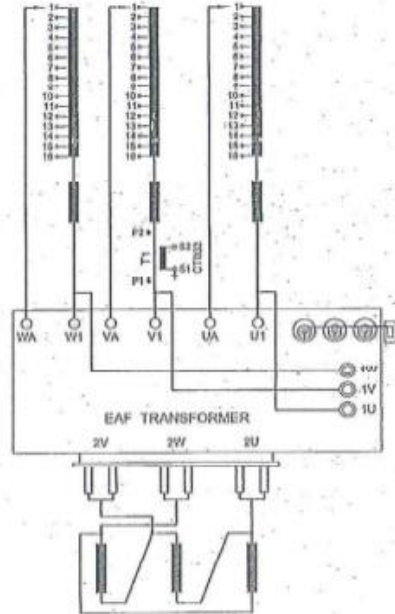
ПРИЛОЖЕНИЕ А

Test Certificates No: 3317247-0			
Customer : MMK - ATAKAŞ / DANIELI	RATING PLATE		Page No : 3 / 20
Rated Power(MVA): 300	Standard : IEC 60076-1 (2000)	Rated Voltage(kV): 34.5 / 1,883....1,119	Serial No.: 317247
			Vector Group: Dd0
			Cooling Type: ODWF



ELECTRIC ARC FURNACE TRANSFORMER									
MANUFACTURER AREVA ENERJİ ENÜŞTRİSİ A.Ş. 43410 GEBZE / KOCAELİ - TÜRKİYE									
NO.	317247	YEAR OF MANUFACTURE	2010	REFERENCE STANDARD	IEC 60076				
RATED POWER	300 MVA	CORRECTION GROUP	0/0	KIND OF TRANSFORMER	FURNACE				
DELIVOL TYPE:	CONTINUOUS		FRIGIDITY	02 Fa	NUMBER OF PHASES	3			
POS.	RATED POWER (kVA)	VOLTAGE (kV)		CURRENT (A)		U _k (%)	SHORT-CIRCUIT CURRENT (kA)		
		HV	LV	HV	LV		HV	LV	
16	200000	34500	1683	$\sqrt{3} \times 2899,8$	$\sqrt{3} \times 69410,3$	12,42	40,42	828,7	
13	200000	34500	1683	$\sqrt{3} \times 2899,8$	$\sqrt{3} \times 69719,1$	14,68	34,20	752,4	
1	214004	01690	1119	$\sqrt{3} \times 2458,2$	$\sqrt{3} \times 42768,1$	23,13	16,49	177,6	
INSULATION LEVEL	11250 AC 45 / LI - AC 10 kV		TOTAL WEIGHT	285 t	TRANSPORT WEIGHT (WITHOUT OIL)	308 t			
WELDING TEMPERATURE RISE	55 K		WEIGHT OF COPPER	48 t	CORE AND COIL ASSEMBLY	169 t			
OIL TEMPERATURE RISE	60 K		DS WEIGHT	76 t	OIL TYPE	AFAR TO 1020 (50 UK)			
COOLING METHOD	ODWF		MAX. TEMPERATURE OF WATER	34 °C	MAX. AMBIENT TEMPERATURE	45 °C			
HEAT EXCHANGER:	WJHD 1000	MADE:	GEA RUMAZAN		WATER FLOWRATE OF COOLER	73,1 m ³ /hour			
OIL / WATER PRESSURE DROP:	350 / 500 mbar	INLET / OUTLET TEMP OF WATER:	24 / 48 °C		INLET / OUTLET TEMP OF OIL:	80 / 70 °C			
TANK, COOLERS AND CONSERVATOR ARE VACUUM PROOF.									
WATER FLOW OF LV COPPER TUBE	1,67 l/s								
OIL LOAD TAP-CHANGER	MR 3 x RI 3003-72.5/0-10160	NOMINAL CURRENT	3000 A	U _m	72,5 kV	SERIAL NO	1077609		
CURRENT TRANSFORMER	TI	RATED POWER	10 VA	RATIO	3600 / 2 A	CLASS	C13		


POS.	TAP-CHANGER CONNECTION	RATED POWER (kVA)	PRIMARY		SECONDARY	
			VOLTAGE (kV)	CURRENT (A)	VOLTAGE (kV)	CURRENT (A)
10	10	300000	34500	$\sqrt{3} \times 2899,8$	1683	$\sqrt{3} \times 69420$
15	15				1043	$\sqrt{3} \times 60970$
14	14				1005	$\sqrt{3} \times 63319$
13	13				1068	
12	12				$\sqrt{3} \times 2834$	1633
11	11				$\sqrt{3} \times 2773$	1600
10	10				$\sqrt{3} \times 2894$	1458
9	9				$\sqrt{3} \times 2821$	1418
8	8				$\sqrt{3} \times 2551$	1380
7	7				$\sqrt{3} \times 2181$	1311
6	6	$\sqrt{3} \times 2432$	1510			
5	5	$\sqrt{3} \times 2347$	1270			
4	4	$\sqrt{3} \times 2277$	1232			
3	3	$\sqrt{3} \times 2212$	1197			
2	2	$\sqrt{3} \times 2432$	1166			
1	1	214004	$\sqrt{3} \times 2008$	1110		



3805573

MADE IN TURKEY

Tested by: A. A. YILMAZ Test Engineer	Checked by: M. UNAL Test Lab. Supervisor	CUSTOMER OR REPRESENTATIVE:
DATE: 05.08.2010	DATE: 05.08.2010	DATE:


Test Certificates No: 3317247-0		
Customer : MMK - ATAKAŞ / DANIELI	MEASUREMENT OF WINDING RESISTANCE	Page No: 6 / 20 Serial No.: 317247
Rated Power(MVA): 300.0	Standard : IEC 60076-1 (2000) § 10.2 Rated Voltage(kV): 34,5 / 1,683....1,119	Vector Group: Dd0 Cooling Type: ODWF


HV Winding resistances (mohm)				LV Winding resistances (mohm)			
Temperature: 29,6 °C				Temperature: 29,6 °C			
Pos.	1U-1V	1V-1W	1W-1U	Pos.	2U - 2V	2V -2W	2W - 2U
1	10,747	10,797	10,868		0,0223	0,0219	0,0218
2	10,235	10,305	10,381				
3	9,8678	9,8763	9,9663				
4	9,3995	9,4473	9,5405				
5	9,0895	9,1077	9,1904				
6	8,6556	8,7056	8,7939				
7	8,4619	8,4755	8,5574				
8	8,1340	8,1850	8,2737				
9	7,9268	7,9524	8,0280				
10	7,8054	7,6678	7,7422				
11	7,4311	7,4571	7,5341				
12	7,1715	7,2203	7,3068				
13	7,0440	7,0735	7,1476				
14	6,7981	6,8443	6,9312				
15	6,6540	6,6984	6,7692				
16	6,4292	6,4698	6,5533				

Measuring instrument :TETTEX TYPE 2292, Serial No :149140
 DIGITAL THERMOMETER TESTO 925 Serial No.:34112

Tested by: A. A. YILMAZ Test Engineer	Checked by: M. ÜNAL Test Lab. Supervisor	CUSTOMER OR REPRESENTATIVE:
DATE: 04.08.2010	DATE: 04.08.2010	DATE:

Test Certificates		Customer :		Three-phase, Electrical Arc Furnace Transformer		Page No : 7 / 20							
No: 3317247-0						Serial No.: 317247							
Rated Power(MVA): 300,0		MMK - ATAKAŞ / DANIELI		Rated Voltage(kV): 34,5 / 1,683....1,119		Vector Group: Dd0							
Rated Frequency(Hz): 50						Cooling Type: ODWF							
Supply: 1U-1V-1W (Pos 16)		Measurement of no-load loss and current (IEC 60076-1(2000) §10.5)				Frequency: 50 Hz							
Exciting factor (%)	Voltage (V)	No-load current				No-load loss							
		phase 1U	phase 1V	phase 1W	Average	Guaranteed (%)	Measured Pm	Corrected Pc (kW)	Guaranteed				
		(A)	(A)	(A)	(A)								
90	31050	2,604	1,907	1,918	2,143	0,043	-	97,76	97,61	-			
100	34500	3,882	3,007	2,885	3,258	0,065	-	133,9	133,4	145,0			
110	37950	13,51	11,48	11,37	12,12	0,241	-	199,1	196,3	-			
Test Date: 04.08.2010													
Supply : 1U - 1V - 1W		Measurement of load-loss and impedance (IEC 60076-1 (2000) §10.4)				Frequency: 50 Hz							
Short circuit : 2U - 2V - 2W													
Tap Position	Current (A)	Voltage (V)	Impedance		Base (MVA)	Load loss	I ² R Loss	Stray Loss	I ² R Loss	Stray Loss	Load Loss	Guar.	
			Meas.	Guar.									Temperature: 29,6 °C
HV	LV	(A)	(V)	(%)	(MVA)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	
1	-	3582,23	7980	23,13	-	214,1	948,5	610,5	338,1	715,2	288,5	1003,8	-
2	-	3702,26	7655	22,19	-	221,2	956,3	614,8	341,5	720,3	291,5	1011,8	-
3	-	3830,6	7336	21,26	-	228,9	968,9	620,2	348,7	726,7	297,6	1024,3	-
4	-	3944,57	7046	20,42	-	235,7	972,5	623,5	348,9	730,5	297,8	1028,3	-
5	-	4065,64	6757	19,58	-	242,9	974,3	628,8	345,4	736,8	294,8	1031,6	-
6	-	4194,33	6479	18,78	-	250,6	977,4	632,7	344,7	741,3	294,2	1035,5	-
7	-	4303,28	6253	18,12	-	257,1	992,6	638,7	353,9	748,3	302,1	1050,4	-
8	-	4417,94	6033	17,49	-	264,0	1000,5	642,6	357,9	752,8	305,5	1058,3	-
9	-	4539,0	5815	16,86	-	271,2	1008,5	648,7	359,8	760,1	307,1	1067,1	-
10	-	4666,84	5605	16,25	-	278,9	1014,5	653,0	361,5	765,0	308,6	1073,6	-
11	-	4802,11	5406	15,67	-	287,0	1023,5	661,1	362,3	774,5	309,3	1083,8	-
12	-	4908,81	5233	15,17	-	293,3	1029,7	664,2	365,5	778,1	312,0	1090,1	-
13	-	5020,52	5065	14,68	-	300,0	1043,8	670,7	373,2	785,7	318,5	1104,3	-
14	-	5020,52	4789	13,88	-	300,0	992,3	643,6	348,7	754,0	297,7	1051,7	-
15	-	5020,52	4527	13,12	-	300,0	948,3	620,3	328,0	726,8	279,9	1006,7	-
16	-	5020,52	4284	12,42	11,60	300,0	905,4	594,7	310,8	698,7	265,3	962,0	933,0
Test Date: 05.08.2010													
Lowfrequency Voltage Withstand Tests													
Temperature: (28 ±2) °C			Humidity: (62 ±5) %			Pressure: (728 ±25) mmHg							
Separate source AC withstand voltage test (IEC 60070-3 (2000) §11)					Short-circuit induced AC withstand voltage test (IEC 60070-3 (2000) §12.0)								
Applied winding	Applied voltage (kV)	Frequency (Hz)	Duration (Sec.)	Result	Induced winding	Test voltage (kV)	Frequency (Hz)	Duration (Sec.)	Result				
HV	95	50	60	Satisfactory	HV	69	100	60	Satisfactory				
LV	10	50	60	Satisfactory									
Measuring instrument : POWER ANALYZER NORMA D6100, Serial No: D329133 EC													
PEAK-VOLTMETER HAEFELY TRENCH, Serial No: 080197-1													
DIGITAL THERMOMETER TESTO 925 Serial No.:34112													
Remarks: 1. Transformer oil APAR TO 1020(GO UX) .													
Tested by: A. A. YILMAZ Test Engineer			Checked by: M. ÜNAL Test Lab. Supervisor			CUSTOMER OR REPRESENTATIVE:							
DATE: 05.08.2010			DATE: 05.08.2010			DATE:							


Test Certificates No: 3317249-0			
Customer : DANIELI / MMK - ATAKAŞ		RATING PLATE	
Rated Power(MVAR): 35,3		Rated Voltage(kV): 34,5	
Page No : 3 / 14		Serial No.: 317249	
Standard : IEC 60076-6 (2007)		Vector Group: YN	
Cooling Type: OFWF			




FURNACE REACTOR							
MANUFACTURER AREVA ENERJİ A.Ş. 41410 GEBZE / KOCAELİ - TÜRKİYE							
SERIAL NO.	317249	YEAR OF MANUFACTURE	2010	NUMBER OF PHASES	3	REFERENCE STANDARD	IEC60076
RATED POWER	35266,7 MVA	COOLING METHOD	OFWF	INSULATION LEVEL	LI 250 AC 05 kV		
CONNECTION GROUP	III (A)		SERVICE	CONTINUOUS		FREQUENCY	50 Hz



POS	OLTC TAPS	POWER		VOLTAGE DROP. (V / Phase)	CURRENT (A)	REACTANCE (Ω / Phase)	
		%	(MVA)				
12	12	100	35267	4055	2000	1,411	
11	11	80	31758	3652		1,261	
10	10	80	28230	3248		1,120	0,509
9	9	70	24701	2841		0,852	0,725
8	8	60	21172	2435		0,570	0,425
7	7	50	17644	2029		0,297	0,160
6	6	40	14115	1623		0,071	
5	5	30	10586	1217			
4	4	20	7057	812			
3	3	11	3852	448			
2	2	4,8	1694	195			
1	1	0	0	0			

MAX. AMBIENT TEMPERATURE	45°C	TOTAL WEIGHT	83 t	CORE AND COIL ASSEMBLY	12 t
GUARANTEED MAXIMUM WINDING TEMPERATURE RISE	55 K	WEIGHT OF COPPER	27 t	TRANSPORT WEIGHT (WITHOUT OIL)	45 t
GUARANTEED MAXIMUM OIL TEMPERATURE RISE	50 K	OIL WEIGHT	35 t	OIL TYPE	APAR TO 1020 (GO U/X)
MAXIMUM COOLING WATER INLET TEMPERATURE	34 °C	WATER FLOW OF COOLER	28,04 m ³ /hour		
HEAT EXCHANGER	WGDH 315 DBH	MADE :	GEA RENZMAN		
OIL / WATER PRESSURE DROP	350 / 200 mbar	INLET / OUTLET TEMP OF WATER	34 / 42 °C	INLET / OUTLET TEMP OF OIL	68 / 60 °C
TANK AND CONSERVATOR ARE VACUUM PROOF.					
OLTC TYPE	5 x R 5001 - 72.5°C 12/120	RATED CURRENT	5000 A	Um	72,5 kV
SERIAL NO :	1003717				
CURRENT TRANSFORMERS	T1	BURDEN	10 VA	TURN RATIO	3000 / 2 A
				CLASS	CL3

3805672
MADE IN TURKEY


Tested by: D.YONEY Test Engineer	Checked by: M.ÜNAL Test Lab. Supervisor	CUSTOMER OR REPRESENTATIVE: 
DATE: 18.06.2010	DATE: 18.06.2010	DATE:

All the rights are reserved by AREVA T&D Enerji Endüstri A.Ş. This report is only valid for the Serial No. specified above. Uncomplete reproduction is forbidden without permission.

Test Certificates No: 3317249-0										 AREVA							
Customer : DANIELI / MMK - ATAKAŞ					MEASUREMENT OF REACTANCE AND LOSS										Page No : 6/14		
Rated Power(MVA): 35,267															Serial No.: 317249		
Rated Frequency(Hz): 50					Rated Voltage(kV): 34,5										Vector Group: YN		
Cooling Type: OFWF																	
Supply : RW1 - RV1 - RU1					Measurement of Reactance (IEC 60076-6 (2007))										Frequency: 50 Hz		
Short circuit : RUA - RVA - RWA																	
Tap	Voltage			Current			Reactances (X)			Inductances (L)			Reactance		Inductance		
Position	(V)			(A)			(Ω /phase)			(mH/phase)			(Ω /phase)		(mH/phase)		
	V_{RU1}	V_{RV1}	V_{RW1}	I_{RU1}	I_{RV1}	I_{RW1}	X_{RU1}	X_{RV1}	X_{RW1}	L_{RU1}	L_{RV1}	L_{RW1}	X_{ave}	X_{calc}	L_{ave}	L_{calc}	
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2	93,0	95,3	94,7	1308,7	1337,6	1319,6	0,071	0,071	0,072	0,226	0,227	0,228	0,071	0,067	0,227	0,214	
3	218,3	221,7	220,6	1365,5	1385,9	1373,5	0,160	0,160	0,161	0,509	0,509	0,511	0,160	0,154	0,510	0,490	
4	442,5	445,4	445,8	1543,9	1553,1	1549,6	0,287	0,287	0,288	0,912	0,913	0,916	0,287	0,280	0,914	0,891	
5	623,6	641,4	659,4	1503,5	1511,8	1509,0	0,415	0,424	0,437	1,320	1,350	1,391	0,425	0,420	1,354	1,337	
6	834,9	851,8	855,0	1483,1	1491,0	1485,7	0,563	0,571	0,575	1,792	1,818	1,832	0,570	0,560	1,814	1,783	
7	1058,1	1073,0	1077,4	1469,1	1476,4	1471,2	0,720	0,727	0,732	2,293	2,313	2,331	0,726	0,700	2,312	2,220	
8	1272,5	1285,3	1292,0	1503,7	1511,3	1505,9	0,846	0,850	0,858	2,694	2,707	2,731	0,852	0,840	2,711	2,674	
9	1509,3	1520,9	1512,7	1527,6	1535,8	1528,5	0,988	0,990	0,990	3,145	3,152	3,150	0,989	0,980	3,149	3,119	
10	1505,7	1514,9	1505,6	1344,5	1351,8	1345,3	1,120	1,121	1,119	3,565	3,567	3,562	1,120	1,120	3,565	3,565	
11	1514,9	1520,4	1511,3	1199,6	1206,3	1200,2	1,263	1,260	1,259	4,020	4,012	4,008	1,261	1,260	4,013	4,011	
12	2112,2	2114,2	2109,9	1493,5	1500,5	1496,0	1,414	1,409	1,410	4,502	4,485	4,489	1,411	1,400	4,492	4,456	
Test Date:																	
Supply : RW1 - RV1 - RU1																	
Short circuit : RUA - RVA - RWA																	
Measurement of loss (IEC 60076-6(2007)§8.9.7)										Frequency: 50 Hz							
Tap	Current	Voltage		Reactance		Base	Load loss	I^2R Loss	Stray Loss	I^2R Loss	Stray Loss	Load Loss	Guar.				
Position	(A)	(V)		ohm/phase		(MVA)	Temperature: 28,5 °C				Temperature: 75 °C						
12	2898,6	4089,9		1,411	1,400	35,287	171,2	146,9	24,29	172,8	20,65	193,4	190,0				
Measuring instrument : POWER ANALYZER NORMA D6100, Serial No: D329133 EC POWER ANALYZER NORMA D6100, Serial No: E655207KF PEAK-VOLTMETER HAEFELY TRENCH, Serial No: 080197-1 DIGITAL THERMOMETER TESTO 925 Serial No.:34112																	
Remarks: 1. Reactor oil APAR TO 1020 (GO UX)																	
Tested by: D. YONEY Test Engineer					Checked by: M. UNAL Test Lab. Supervisor					CUSTOMER OR REPRESENTATIVE: 							
DATE: 18.06.2010					DATE: 18.06.2010					DATE:							

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ABB Oy

Test report
ABB, Transformers14.6.2010
1/4

CUSTOMER:	Test object:	3-Phase Transformer
ABB OY	Type:	KTMU 36 NC 4800
	Power:	4800 kVA
	Primary voltage:	17250±2x2.5 % V
	Secondary voltage:	3160 V
	Rated HV current:	160,7 A
Customer reference:	Rated LV current:	877,0 A
8206028 OE	BIL (HV):	70 kV
	BIL (LV):	10 kV
	Connection:	Illy0
	Frequency:	50 Hz
	Cooling condition(s)	ONAN
	Serial No.:	1LFI 423615
	TAG No.:	=ND11E10PTR01
ABB Reference:		
Project No.:	423615	
Drawing No.:	14 KTMU 36 N 62167	
Code:	40250220	
Performed and Approved Tests:		Applied Standard(s):
Test date:	31.5.2010	IEC 60076
Voltage Ratio		
Winding Resistance		
No Load Loss		
Load losses and impedance voltage		
Separate source withstand test		
Induced overvoltage withstand test		
Auxiliary wiring		
		Witnessed by:
		<i>[Handwritten signatures]</i>
		<i>[Handwritten signature]</i>
		Comments:
		2 units 423615 and 423616 with different connections must be series connected
		REVIEWED
ABB Oy, Transformers Strömbergin puistotie 15 65101 Vaasa, Finland		Test Department
	Approved by:	Date of Issue:
	<i>[Handwritten signature]</i>	14.6.2010
	H.Kantola	

KTMU 36 NC 4800
1LFI 423615
Test date: 31.5.2010

Summary:

	Measured	Guaranteed	Tolerance	Deviation [%]
<u>No Load Losses Po [W]:</u>	3652	4000	(+15%)	-9,529

Reference power : 4800 kVA

Reference temperature: 75 °C

	Measured	Guaranteed	Tolerance	Deviation [%]
<u>Load Loss Pk [W]:</u>	Tapping			
	1	34745	40000	
	3	35872	41000	(+15%)
	5	37511	42000	-14,29

<u>Total losses Ptot [W]</u>	39524	45000	(+10%)	-13,85
-------------------------------------	-------	-------	--------	--------

	Measured	Guaranteed	Tolerance	Deviation [%]
<u>Impedance voltage Zk [%]:</u>	Tapping			
	1	7,86	8,00	
	3	7,97	8,00	(±10%)
	5	8,14	8,00	-0,38

Results:

KTMU 36 NC 4800

1LFI 423615

Test date: 31.5.2010

Voltage RatioPhase Displacement: llly0

Tap position	<u>A-B</u> a-b	<u>B-C</u> b-c	<u>C-A</u> c-a
1	5,732	5,731	5,731
2	5,598	5,598	5,598
3	5,464	5,464	5,464
4	5,329	5,329	5,329
5	5,195	5,195	5,195

Winding Resistance

Average oil temp. 23,5 °C

Tap positions	Resistance between terminals [mOhm]			Average
	A-B	B-C	A-C	
1	446,013	445,902	446,328	446,081
2	435,828	435,598	436,093	435,840
3	425,787	425,619	426,106	425,837
4	415,096	415,020	415,394	415,170
5	404,670	404,461	405,030	404,720

a-b	b-c	a-c	Average
8,674	8,676	8,710	8,687

No Load Loss

	A - B	B - C	C - A
Voltage [V]:	3170	3170	3170
Current [A]:	1,604	1,217	1,427
Losses Po [W]:	3652		
Power So [VA]:	7775		

Load losses and impedance voltages

Reference power: 4800 kVA Reference temperature: 75 °C
 Supplied terminal: A-B-C Shorted terminals: a-b-c

Tap positions	Pt [W]	Pi [W]	Pk [W]	Xk [%]	Rk [%]	Zk [%]
1	30803	3942	34745	7,82	0,72	7,86
3	31789	4084	35872	7,93	0,75	7,97
5	32838	4672	37511	8,10	0,78	8,14

KTMU 36 NC 4800
1LFI 423615

Test date: 31.5.2010

AC Tests**Separate source withstand test:**

Terminals	Voltage [kV]	Duration [s]	Freq. [Hz]
HV	70	60	50
LV	10	60	50

Induced overvoltage withstand test:

Voltage/kV	Duration/s	Freq./Hz
2xUn	40	150

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор
 ЗАО «ММК Metalurji»
 STEEL
 ММК МЕТАЛОРДІВ./
 METALURJİ TİCARET VE LİMAN İŞLT. A.Ş.
 Ozenli Mh. Alparslan Türkeş Bulvarı No:342/01
 DÖRTYOL - HATAY
 «27» 2024 г.
 Tel: (324) 770 10 00 Fax: (324) 718 02 00
 Dört Yol V.D: 095 005 5541 Tic.Sic.No:4292

АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
Денисевича Александра Сергеевича
 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 Денисевича А.В., проведенных в период с 2014 г. по 2024 г. на ЗАО «ММК Metalurji» в рамках договора о сотрудничестве между предприятием и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

За указанный период времени Денисевичем А.С. была разработана усовершенствованная система управления активным выпрямителем для повышения устойчивости работы преобразователей частоты ACS6000 при отклонениях напряжения питающей сети, вызванных внешними провалами напряжения, работой ДСП-250, коммутацией основного электротехнического оборудования электросталеплавильного комплекса.

Главные электроприводы стана горячей прокатки «1750» выполнены на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями (ПЧ-АВ). Системы управления АВ не адаптированы к несимметрии питающего напряжения, возникающие во внешней сети 380 кВ несимметричные провалы напряжения глубиной 20-50% приводят к аварийным отключениям главных электроприводов стана горячей прокатки (СГП) «1750». В связи с этим ранее было предложено объединить на параллельную работу секции шин 34,5 кВ питающих главные электроприводы СГП и ЭСПЦ, для компенсации провалов напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК. Для объединения на параллельную работу двух комплексов необходимо было провести исследования возможности их параллельной работы.

В связи с этим Денисевичем А.С. на основании реальных осциллограмм токов и напряжений, полученных на ГПП металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» проведены исследования возможности параллельной работы ДСП и главных электроприводов СГП «1750». Определено, что при работе печи на начальной стадии плавки и включении печного трансформатора, возникает несимметрия напряжения, которая вызывает несимметрию токов, потребляемых преобразователем частоты и увеличение колебаний напряжения в звене постоянного тока. А также коммутационные перенапряжения, вызванные включением фильтрокомпенсирующих цепей СТК приводят к аварийному отключению главных электроприводов СГП «1750».


Для обеспечения устойчивой параллельной работы Денисевичем А.С. разработана усовершенствованная система управления АВ с дополнительными регулирование тока по реактивной составляющей и контурами регулирования ортогональных составляющих токов по прямой обратной последовательности. Разработанная СУ АВ позволяет сохранить устойчивую работу главных электроприводов СГП «1750» при возмущениях вызванных работой электросталеплавильного комплекса. Проведены теоретические исследования, доказывающие эффективность совместного использования СТК и разработанной системы управления АВ в составе ПЧ-АВ для повышения устойчивости работы электроприводов СГП «1750» при однофазных провалах напряжения в сети 380 кВ глубиной до 50%.

Для обеспечения надежной работы электроприводов клеток непрерывного листового стана горячей прокатки 1750 Денисевичем А.С. было предложено совместное использование СТК и усовершенствованной системы управления активными выпрямителями для снижения аварийных отключений главных электроприводов СГП из-за несимметричных провалов напряжения во внутривозвратной сети 34,5 кВ глубиной до 50%.

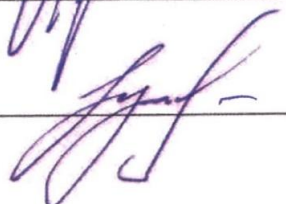
Технический эффект от внедрения результатов научных исследований заключается в уменьшении количества аварийных отключений стана горячей прокатки «1750», а также в снижении количества брака выпускаемой горячекатаной продукции. Вероятность компенсации всех провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети 380 кВ составляет 90%.

Согласовано:

Начальник отделения сервисного обслуживания электрического и электронного оборудования горячего комплекса


/ Угюр Чейлан /

Ведущий специалист по электрооборудованию


/ А.А. Бунин /