

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

На правах рукописи



**Ивекеев Владимир Сергеевич**

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ  
ПРИМЕНЕНИЯ СТАТИЧЕСКОГО ТИРИСТОРНОГО КОМПЕНСАТОРА**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Научный руководитель  
кандидат технических наук, доцент  
Николаев Александр Аркадьевич

Магнитогорск – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. ТИПЫ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ .....	12
1.1. Анализ существующих устройств компенсации реактивной мощности для электросталеплавильных комплексов .....	13
1.2. Анализ существующих конфигураций систем электроснабжения металлургических заводов с электросталеплавильными и прокатными комплексами .....	19
1.2.1. Схема электроснабжения ПАО «Ашинский метзавод», (г. Аша, Челябинская область, Россия) .....	20
1.2.2. Схема электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Саратовская область, Россия) .....	21
1.3. Способы ограничения негативных влияний провалов напряжения на работу главных электроприводов прокатных станов .....	23
1.3.1. Применение кинетического буферирования .....	25
1.3.2. Применение систем управления АВ с адаптацией к несимметрии напряжения .....	27
1.3.3. Обеспечение равенства коэффициентов модуляции .....	28
1.4 Выводы по главе .....	30
ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА РАБОТУ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ .....	31

2.1. Анализ конфигурации системы внутриводского электроснабжения металлургического завода ЗАО ММК «Metalurji».....	32
2.2. Анализ распределения провалов напряжения во внутриводской сети металлургического завода ЗАО ММК «Metalurji».....	36
2.3. Исследование процессов, протекающих в преобразователях частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения.....	41
2.4 Выводы по главе.....	45
<b>ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТК И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗЕРВОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ .....</b>	<b>47</b>
3.1. Разработка имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» .....	47
3.1.1. Имитационная модель электрической дуги ДСП-250.....	52
3.1.2. Имитационная модель электрического контура ДСП-250.....	55
3.1.3. Имитационная модель СТК 330 МВАр.....	59
3.1.4. Математическая модель системы управления электрическим режимом СТК 330 МВАр.....	68
3.1.5. Математическая модель системы управления электрическим режимом ДСП-250.....	71
3.2. Анализ генерирующей способности СТК 330 МВАр .....	75
3.3. Разработка усовершенствованной системы управления СТК 330 МВАр для функционирования в условиях провалов напряжения .....	76
3.4. Проверка адекватности имитационной модели.....	97
3.5. Выводы по главе.....	97
<b>ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА СТК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ И ПРОКАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ФУНКЦИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>98</b>
4.1. Влияние конфигурации схемы электроснабжения предприятия на характер однофазных провалов напряжений .....	100

4.2. Разработка методики выбора мощности СТК для выполнения дополнительных функций по демпфированию провалов напряжения.....	102
4.3. Выводы по главе.....	111
ГЛАВА 5. ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ .....	112
5.1. Оценка требуемой мощности СТК для снижения числа аварийных отключений электроприводов стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» при провалах напряжения.....	113
5.2. Оценка демпфирующей способности статического тиристорного компенсатора с учетом фактического времени работы ДСП-250 .....	114
5.3. Проверка возможности параллельной работы ДСП-250 и главных электроприводов прокатного стана 1750.....	118
5.4. Выводы по главе.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....	149

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Обеспечение высокого уровня надежности работы электроприемников является наиболее важным требованием, предъявляемым к системам электроснабжения, находящимся как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации. Надежность при этом характеризуется безотказностью, ремонтпригодностью и долговечностью всех элементов самой энергосистемы [1]. Особенно остро данный вопрос стоит перед энергоемкими производствами, такими как предприятия черной и цветной металлургии, поскольку в данном случае речь идет о рисках, связанных с нарушением непрерывного процесса производства, получением брака выпускаемой продукции, снижением уровня безопасности проведения работ и возникновением крупных экономических убытков.

Согласно статистическим данным World Steel Association (WSA), приведенным в аналитической справке ФГБУ ВНИИ Труда, на момент 2017 года Россия занимает первое место среди мировых экспортеров металла. Конечной продукцией металлургического производства являются сталь и чугун, которые впоследствии применяются при прокатке сортовой, листовой, трубной и других видов продукции [2]. Из всего годового объема стали, производимой на территории Российской Федерации ( $\approx 71\,000$  тыс. т.), порядка 30 % производится в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) функционирующих в комплексе с устройствами компенсации реактивной мощности, которые обеспечивают их электромагнитную совместимость с внешней питающей сетью. Более 80% стали производимой на предприятиях черной и цветной металлургии подвергается пластической деформации валками прокатных станов. Стоит отметить, что прокатка на сегодняшний день является самым распространенным видом обработки металла из-за непрерывности процесса производства, высокой производительности и качества продукции, получаемой на выходе. Помимо этого, она является завершающим звеном всего производственного цикла [3].

За последние 30 лет большую популярность получило строительство компактных металлургических предприятий. В своем составе они имеют дуговые сталеплавильные печи высокой производительности, машины для высокоскоростной разливки стали и агрегаты для прокатки и обработки полосы. На сегодняшний день доля производства стали в таких заводах составляет порядка 16-20 % от общего объема. По всему миру их насчитывается более 1000. Наиболее крупными представителями таких предприятий, функционирующих на территории Российской Федерации, являются АО «НЛМК-Урал», ПАО «Ашинский металлургический завод», ЗАО «Волга-ФЭСТ», ООО «Новоросметалл» и т.д. Лидером по строительству минизаводов и производству металлургического оборудования является итальянская компания Danieli (Италия), имеющая в своем составе 8 дочерних предприятий, Планируется, что в дальнейшем значительный экономический потенциал компактных заводов приведет к увеличению их численности по всему миру и составит конкуренцию крупным металлургическим гигантам [4].

В условиях современного промышленного производства на металлургических заводах электроприводы прокатных клетей в большинстве случаев состоят из мощных синхронных или асинхронных двигателей (АД и СД), регулирование которых происходит с помощью преобразователей преобразователями частоты (ПЧ) и активных выпрямителей (АВ). Особенностью работы данных систем является то, что они неустойчивы к возмущениям, происходящим во внешней питающей сети. В этой связи надежность и работоспособность таких электроприводов напрямую зависят от показателей качества электроэнергии (ПКЭ). Нормы качества электроэнергии в точках общего подключения определяют надежность электроснабжения, и регламентируются нормами ГОСТ 32144-2013 [5].

Одним из наиболее значимых показателей является провал напряжения, способный вызывать аварийные режимы работы систем электроснабжения промышленных предприятий и привести к возникновению отказов в работе основных и вспомогательных технологических агрегатов [6]. Например,

однофазный провал напряжения, возникший во внешней питающей сети глубиной 30%, способен вызвать отключение системы ПЧ-АВ вследствие бросков тока, превышающих уставку срабатывания защиты. Помимо этого, в звене постоянного тока происходит уменьшение уровня напряжения.

Стоит отметить, что на сегодняшний день среди научных работ отечественных и зарубежных ученых, тема компенсации провалов напряжения и анализа причин их возникновения является мало изученной. В частности, отсутствуют исследования, посвященные поиску технических решений, направленных на поддержание заданного уровня напряжения в нормальных и аварийных режимах работы сети, заложенных в проект строительства завода ещё на стадии разработки внутрицехового электроснабжения. Поиск решения данной проблемы является актуальным для многих компактных металлургических предприятий. Яркий этому пример – завод ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция), в котором управление главными электроприводами стана 1750 горячей прокатки выполнено на базе многоуровневых ПЧ и АВ.

На сегодняшний день существуют способы защиты ответственных электроприемников от провалов напряжения, смысл которых заключается в покупке дорогостоящего электрооборудования, способного во время протекания провала напряжения перевести питание чувствительных потребителей на резервный источник. Данное решение представленной проблемы экономически не целесообразно, поскольку предусматривает получение затрат, связанных с покупкой дополнительного оборудования. Помимо этого, существуют способы повышения надежности работы ПЧ и АВ за счет применения усовершенствованной системы управления с предупреждением по сетевому напряжению, обеспечивающей устойчивую работу главных приводов прокатных клеток при несимметричных провалах напряжения. Предложенный способ рассчитан на применении АВ с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) и не обеспечивает компенсацию напряжения на уровне главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия.

Таким образом, проблема повышения устойчивости работы электроприводов прокатных станов является актуальной как для действующих компактных металлургических предприятий, так и для вновь строящихся. Решение вопросов компенсации провалов напряжения позволит значительно сократить риски возникновения аварийных режимов работы внутризаводских сетей, снизить время внеплановых простоев основного и вспомогательного металлургического оборудования и тем самым сократить вероятность возникновения связанных с этих экономических потерь.

**Степень разработанности.** Исследования эффективного применения компенсирующих устройств отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых таких как: Г.Я. Вагин, В.М. Пупин, Г.М. Михеев, В.В. Черепанов, А.Н. Шпиганович, А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, А.С. Маклаков, В.А. Кузьменко, В.В. Тропин, А.В. Фомин, В.С. Фишман, Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi.

Представленная задача оказывается весьма сложной и неоднозначной, так как в данных исследованиях не учитываются первопричины возникновения провалов напряжения и не рассматриваются особенности их распространения в пределах внутризаводской сети. Поэтому данная проблема далека от решения и требует более детальной проработки.

**Целью диссертационной работы** является снижение влияния провалов напряжения, возникающих во внешней системе электроснабжения предприятия, на устойчивость работы чувствительных электроприемников, таких как преобразователи частоты с активными выпрямителями, за счет разработки научно обоснованных технических решений, предусматривающих использование мощных статических тиристорных компенсаторов (СТК) дуговых сталеплавильных печей.

**Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:**

1. Анализ влияния провалов напряжения в системах внутризаводского электроснабжения на работу мощных электроприемников металлургического предприятия.



2. Разработка усовершенствованной системы управления электрическим режимом СТК с учетом функций демпфирования провалов напряжения и быстродействующей диагностики их возникновения.

3. Разработка новой методики оценки установленной мощности СТК, с учетом функции демпфирования провалов напряжения.

4. Разработка рекомендаций по усовершенствованию систем внутриводского электроснабжения компактных металлургических предприятий.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Установлены новые качественные зависимости между погодными условиями в районной электроэнергетической системе (ЭЭС) и частотой возникновения провалов напряжения, показывающие наличие фактора сезонности, влияющего на вероятность возникновения коротких замыканий в высоковольтных линиях электропередач.

2. Разработана усовершенствованная система управления статическим тиристорным компенсатором дуговой сталеплавильной печи, обеспечивающая демпфирование провалов напряжения в системе внутриводского электроснабжения, отличающаяся от известных тем, что она снабжена контурами регулирования напряжения, имеющими в своём составе пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы (ПИД-регуляторы), и контуром диагностики провалов напряжения.

3. Разработана инженерная методика выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом новых дополнительных функций демпфирования провалов напряжения, отличающаяся от известных тем, что она позволяет определить требуемое количество реактивной мощности, необходимой для компенсации провалов напряжения.

4. Разработаны новые режимы работы систем внутриводского электроснабжения компактных металлургических заводов, отличающиеся от известного объединения секций шин среднего напряжения электросталеплавильного и прокатного комплексов, учитывающих их

параллельную работу для реализации функций демпфирования напряжения с помощью СТК.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, могут применяться для компактных металлургических предприятий, в состав которых входят дуговые сталеплавильные печи высокой производительности, машины для высокоскоростной разливки стали и агрегаты для прокатки и обработки полосы. Исходя из этого, практическая и теоретическая значимость работы заключаются в следующем:

1. Разработанная усовершенствованная система управления СТК дуговой сталеплавильной печи обеспечивает демпфирование провалов напряжения в системе внутризаводского электроснабжения глубиной  $\delta U_t = 10 - 30\%$  и отличается от существующих тем, что она снабжена контуром диагностики провалов напряжения во внешней питающей сети, а также контуром регулирования напряжения, имеющим в своём составе ПИД регуляторы.

2. Разработанная методика выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов позволяет на стадии расчета параметров компенсирующего устройства заложить в СТК необходимый запас реактивной мощности (РМ), обеспечивая тем самым функции стабилизации напряжения при возникновении внешних провалов. Необходимые исходные данные для определения резерва РМ могут быть получены путем статистического анализа погодных условий и частоты возникновения провалов напряжения в данном регионе.

3. Предложенные рекомендации по построению систем внутризаводского электроснабжения компактных металлургических предприятий являются значимыми для теории электроснабжения, т.к. позволяют повысить устойчивость работы систем автоматизированного электропривода в условиях возникновения провалов напряжения.

**Методология и методы исследования.** 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) и Mathcad. Экспериментальные данные для исследований получены на действующем металлургическом предприятии ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция), имеющем в своем составе ДСП-250 (с номинальной мощностью печного трансформатора 300 МВА), установку «ковш-печь» (УКП) (с номинальной мощностью печного трансформатора 53 МВА) и стан 1750 горячей прокатки с электроприводами суммарной мощностью 50,4 МВт.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты качественного анализа исследования влияния погодных условий на частоту возникновения провалов напряжения в районной ЭЭС.

2. Усовершенствованная система управления СТК, включающая в себя функции демпфирования провалов напряжения во внутренней распределительной сети предприятия.

3. Инженерная методика выбора параметров СТК для промышленных предприятий, позволяющая на основе имеющихся статистических данных о провалах напряжения, параметров электрических нагрузок и параметров системы электроснабжения определить величину мощности компенсатора с учетом дополнительных функций по демпфированию провалов напряжения.

4. Режимы работы систем внутривозовского электроснабжения компактных металлургических заводов, заключающиеся в объединении шин среднего напряжения прокатного и электросталеплавильного комплексов.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждаются достоверностью исходных понятий, основанных на глубоком анализе и детальной проработке экспериментальных данных, полученных на металлургических заводах, относящихся к типу компактных предприятий, а также их соответствием результатам, опубликованным в научной литературе, корректным применением математических методов моделирования, экспериментальными исследованиями на действующих комплексах ДСП-250, СТК 330 МВАр и стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция).

# ГЛАВА 1. ТИПЫ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ. СУЩЕСТВУЮЩИЕ СПОСОБЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ

На сегодняшний день существует большой выбор компенсирующих и помехозащитных устройств, предназначенных для решения различных задач от нерегулируемой компенсации реактивной мощности до быстродействующей регулируемой компенсации, с комплексным улучшением качества электроэнергии практически по всем показателям.

Основными видами компенсирующих устройств, которые получили широкое применение в промышленных системах электроснабжения, являются: конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, фильтрокомпенсирующие цепи, статические тиристорные компенсаторы и быстродействующие статические компенсаторы [7-22].

Рассмотрим данные виды устройств подробнее (Рисунок 1.1).

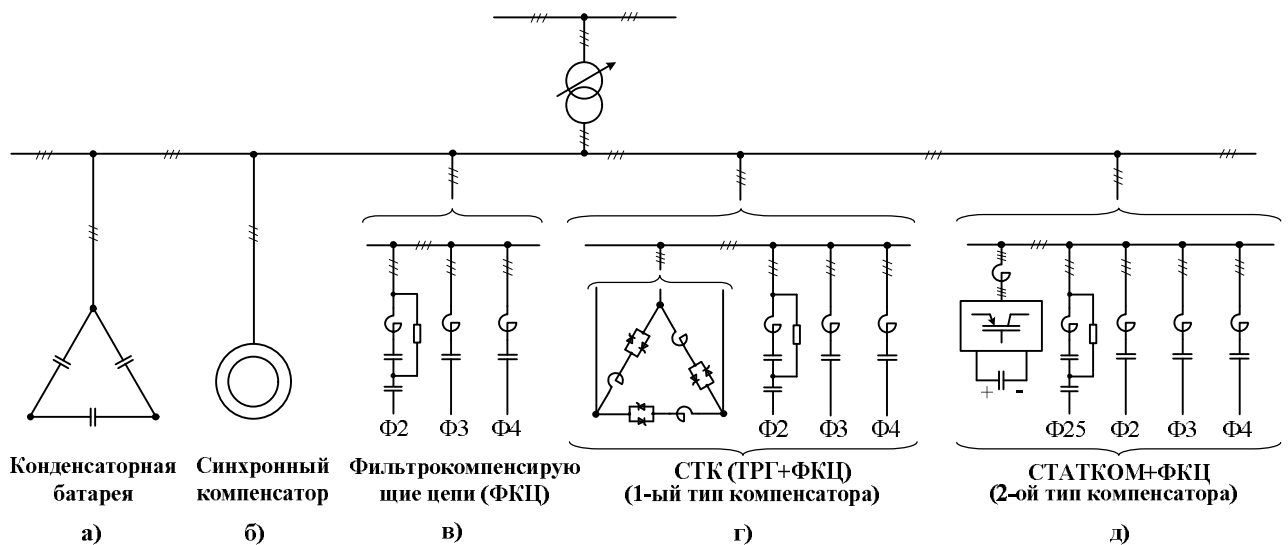


Рисунок 1.1 – Однолинейные схемы основных типов  
компенсирующих устройств

## **1.1. Анализ существующих устройств компенсации реактивной мощности для электросталеплавильных комплексов**

Наиболее простым решением для компенсации реактивной мощности в системе внутризаводского электроснабжения является установка конденсаторных батарей (КБ) (Рисунок 1.1 – а). Достоинством данных устройств является возможность организации индивидуальной, групповой или централизованной компенсации, т.к. КБ имеют относительно невысокую стоимость и малые габариты. Реактивная мощность, генерируемая конденсаторными батареями, не регулируется. В период снижения нагрузки часть реактивной мощности от КБ, которая ранее потреблялась электроприёмниками, отправляется в сеть, вызывая дополнительные потери активной мощности и электроэнергии в элементах сети, поэтому при индивидуальной компенсации конденсаторные батареи отключаются вместе с приёмником. Мощные КБ, предназначенные для групповой или централизованной компенсации, собраны из набора конденсаторных банок с фиксированными параметрами, что позволяет осуществить дискретное регулирование мощности установки путём коммутации отдельных элементов. Шаг регулирования мощности зависит от количества конденсаторных банок в регулируемой части КБ, с увеличением их числа и усложнением схемы соединения, а также снабжением установки устройствами измерения и автоматики стоимость компенсатора повышается. К недостаткам относятся дискретное регулирование мощности, которое не позволяет осуществить точное управление потоками реактивной мощности в электрической сети, а также отрицательный регулирующий эффект. Генерируемая КБ реактивная мощность прямо зависит от квадрата напряжения в точке подключения, в случае снижения уровня напряжения в сети из-за дефицита реактивной мощности, конденсаторные батареи снизят выработку реактивной мощности, что приведёт к дальнейшему понижению напряжения. Также следует отметить, что коммутация конденсаторных банок в КБ, укомплектованных в специальных шкафах, обычно производится вакуумными выключателями, механический и коммутационный ресурс которых ограничен.

Положительным регулирующим эффектом и возможностью плавного управления реактивной мощностью обладают синхронные компенсаторы (СК) – синхронные двигатели, работающие в режиме холостого хода без нагрузки на валу (Рисунок 1.1 – б). Также к достоинствам СК относится возможность их работы, как в режиме генерации, так и в режиме потребления реактивной мощности. Синхронные компенсаторы используются только для централизованной компенсации реактивной мощности. Однако СК не получили широкого применения из-за их высокой стоимости, больших удельных потерь активной мощности, сложностей в обслуживании (наличие движущихся частей, большая занимаемая площадь и шум при работе) по сравнению с КБ, а по сравнению с другими регулирующими компенсирующими устройствами – из-за значительно меньшего быстродействия [23].

В сетях с большой долей нелинейных электроприёмников установка КБ не рекомендуется из-за возможности её перегрузки токами высших гармоник. В этом случае конденсаторные батареи устанавливаются за реакторами, а их параметры подбираются таким образом, чтобы сопротивление LC-цепи было минимальным для токов определённых частот (Рисунок 1.1 – в). Такие цепи называют пассивными фильтрами, которые совмещают в себе функции генерации реактивной мощности и подавления высших гармонических составляющих напряжения. В зависимости от конструкции фильтра он может быть настроен на одну частоту (узкополосный фильтр), на две частоты или на диапазон частот (широкополосный фильтр). Пассивные фильтры высших гармоник обладают теми же достоинствами и недостатками, что и конденсаторные батареи [24].

Рассмотренные компенсирующие устройства, устанавливаемые в системе электроснабжения промышленных предприятий, предназначены для генерации реактивной мощности, т.к. большинство электроприёмников имеют активно-индуктивный характер нагрузки. В электрических сетях, в особенности на протяжённых высоковольтных линиях, может возникнуть режим, при котором для соблюдения баланса необходимо потребить дополнительную реактивную мощность. С целью компенсации зарядной мощности недогруженных линий

электропередачи (ЛЭП) устанавливают шунтирующие реакторы (ШР). Зарядная мощность, протекая по линии, создаёт дополнительные потери активной мощности и повышает напряжение на приёмном конце из-за обратного падения напряжения на индуктивном сопротивлении ЛЭП. На практике применяют нерегулируемые и регулируемые (управляемые) шунтирующие реакторы. Нерегулируемые по аналогии с КБ могут изменять свою мощность ступенчато за счёт включения или отключения части реакторов. Наибольшее распространение получил управляемый шунтирующий реактор трансформаторного типа (УШРТ). Плавное регулирование потреблением реактивной мощности осуществляется за счёт насыщения стали магнитопровода постоянным потоком, создаваемым выпрямленным током тиристорного преобразователя. Величина данного тока определяется углом отпирания тиристоров [25]. Мощность, передаваемая по линии, может изменяться в широких пределах. Для поддержания напряжения в контролируемых точках сети на номинальном уровне может потребоваться как дополнительное потребление реактивной мощности в период минимальных нагрузок, так и генерация реактивной мощности в часы максимальных нагрузок. Поэтому вместе с ШР могут устанавливаться фильтрокомпенсирующие цепи (группа пассивных фильтров). Мощности шунтирующего реактора и фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) выбирают из соображений режима работы линии. Для коммутации фильтрокомпенсирующих цепей в случае необходимости при значительном повышении или снижении потребления реактивной мощности вместо вакуумных выключателей могут быть использованы тиристорные ключи. Шунтирующие реакторы по сравнению с другими компенсирующими устройствами, управляемая часть которых выполнена с использованием полупроводниковых элементов, обладает меньшим быстродействием. Поэтому наряду с ШР в качестве регулируемого элемента вместе с ФКЦ на узловых подстанциях устанавливают тиристорно-реакторные группы (ТРГ) или автономные инверторы напряжения (АИН). В первом случае компенсирующее устройство называется статическим тиристорным компенсатором, во втором - быстродействующим статическим компенсатором

(СТАТКОМ). Тиристорно-реакторная группа СТК (рисунок 1.1 – г) включает в себя вентильную группу, составленную из тиристорov или симисторов, и реакторов, фазы ТРГ соединены в треугольник для снижения тока тиристорov  $\sqrt{3}$  раз. Пофазное регулирование реактивной мощностью ТРГ осуществляется заданием углов отпирания тиристорov, величины которых определяются в системе управления СТК на основе электрических параметров сети и в зависимости от принятого режима регулирования. В отличие от ТРГ, которая предназначена только для потребления реактивной мощности, автономный инвертор напряжения способен генерировать реактивную мощность ёмкостного или индуктивного характера. Это стало возможным за счёт применения в силовой схеме инвертора полностью управляемых полупроводниковых ключей (IGBT-транзисторов), у которых задаются моменты открытия и закрытия [26-33]. У тиристорov задаётся только момент отпирания, а закрытие происходит в момент естественного прохождения тока через ноль. В результате этого СТАТКОМ обладает меньшей установленной мощностью по сравнению с СТК, т.к. его управляемая часть является одновременно как источником, так и потребителем реактивной мощности [34] (Рисунок 1.1, д).

В электрических сетях помимо устройств поперечной компенсации, подключаемых параллельно нагрузке, применяют устройства продольной компенсации (УПК). Устройства продольной компенсации предназначены для уменьшения реактивного сопротивления ЛЭП путём последовательного включения конденсаторов. Для плавного регулирования сопротивления УПК и подавления колебаний напряжения в точке подключения установки параллельно конденсаторной батарее включают реакторы, управляемые тиристорами. Данная цепь представляет собой управляемую индуктивность, величина которой регулируется за счёт изменения угла открытия тиристорov.

Компенсирующие устройства также делятся на установки прямой и косвенной компенсации. Устройства прямой компенсации содержат в своём составе реактивные элементы, предназначенные только для генерации или потребления реактивной мощности (конденсаторные батареи, шунтирующие



реакторы), а устройства косвенной компенсации включают одновременно как минимум два элемента, которые представляют соответственно ёмкостную и индуктивную нагрузку (СТК и СТАТКОМ). Помимо компенсации реактивной мощности описанные устройства косвенной компенсации в электрических сетях служат для повышения статической и динамической устойчивости ЛЭП, и, как следствие, увеличения её пропускной способности, а в системах внутривозовского электроснабжения выполняют функции помехозащитных устройств. К помехозащитным устройствам также относятся пассивные фильтры высших частот и симметрирующие устройства, собранные по различным схемам. Данные установки используются при необходимости улучшения одного из показателей качества электроэнергии – несинусоидальности и несимметрии напряжений. При работе мощных нелинейных приёмников с резкопеременным характером нагрузки, например, дуговых сталеплавильных печей или прокатных станов с главными приводами постоянного тока, качество электроэнергии ухудшается по всем параметрам. Применение нескольких устройств для улучшения каждого показателя качества электроэнергии в отдельности нецелесообразно из-за высокой стоимости оборудования. Для комплексного улучшения качества электроэнергии и динамической компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения электросталеплавильных печей высокой и сверхвысокой мощности устанавливают статические тиристорные компенсаторы и быстродействующие статические компенсаторы. Активная мощность дуговой печи прямо зависит от квадрата питающего напряжения, поэтому установка компенсирующего устройства на шинах электросталеплавильного комплекса необходима не только из соображений обеспечения электромагнитной совместимости ДСП с другими приёмниками и соблюдения нормативного коэффициента мощности на границе балансовой принадлежности, но и для повышения мощности самой печи до проектных значений. Ухудшение качества электроэнергии (в первую очередь отклонение напряжения) не оказывает существенного влияния на производительность электроприёмников постоянного тока, получающих питание от тиристорных преобразователей, в результате этого

сложные и дорогостоящие компенсирующие устройства значительно реже устанавливаются с главными приводами постоянного тока прокатных станов, чем с дуговыми печами.

Быстродействующий статический компенсатор СТАТКОМ обладает рядом достоинств по сравнению с СТК: установленная мощность в 2 раза ниже, большее быстродействие и эффект по улучшению качества электроэнергии, удаление гармоник за счёт применения широтно-импульсной модуляции и др. Однако очень высокая стоимость СТАТКОМа, которая в 3 раза выше, чем у СТК, делает его использование с мощными дуговыми печами малопривлекательным. По этой же причине активные и гибридные фильтры, которые являются модификациями быстродействующего статического компенсатора, также практически не применяются с мощными высоковольтными нагрузками. Для питания мощных и сверхмощных дуговых сталеплавильных печей на территории предприятия сооружают подстанции глубокого ввода (ПГВ). Такие подстанции располагаются, как можно ближе к нагрузке, и получают питание на высоком напряжении 110-220 кВ по линии, проложенной по территории предприятия, где преобладают сети среднего напряжения (6-35 кВ). К шинам электросталеплавильного комплекса ГПП подключают только электросталеплавильные агрегаты. Понижение напряжения с 110-220 кВ до среднего уровня 6-35 кВ, на котором обычно получают питание электросталеплавильные агрегаты, осуществляется сетевыми трансформаторами ГПП. При таком разделении резкопеременной и спокойной нагрузки, чувствительной к колебаниям напряжения и фликеру, установка дорогостоящего СТАТКОМа не является оправданной. Статические тиристорные компенсаторы, обладая достаточным быстродействием, хорошо справляются с задачами компенсации реактивной мощности резкопеременных нагрузок, стабилизации напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса и комплексного улучшения качества электроэнергии. Незначительное нарушение отдельных показателей качества электроэнергии в точке общего подключения СТК и ДСП не является критическим, т.к. искажения напряжения из-за работы

комплекса «ДСП-СТК» на первичной стороне сетевого трансформатора (в сети высокого напряжения) будут значительно ниже.

Таким образом, в настоящее время доля СТК среди всех компенсирующих устройств, установленных в системах электроснабжения дуговых печей высокой и сверхвысокой мощности, составляет 90% [35, 36]. К функциям СТК дуговых сталеплавильных печей относятся: 1) динамическая компенсация реактивной мощности ДСП; 2) стабилизация напряжения на номинальном уровне; 3) снижение колебаний напряжения в точке общего подключения ДСП и СТК; 4) устранение несимметрии напряжений; 5) подавление высших гармонических составляющих напряжения. Обзор научной литературы показал, что системы автоматического управления СТК, имея различную структуру и особенности работы, в большинстве случаев реализуют алгоритмы, направленные на поддержание заданного потребления суммарной реактивной мощности комплекса «ДСП-СТК» или стабилизации напряжения на некотором уровне. Данные режимы работы СТК в первую очередь предназначены для улучшения качества электроэнергии и соблюдения нормативного коэффициента реактивной мощности на границе балансовой принадлежности предприятия и электроснабжающей организации. Улучшение электрических характеристик ДСП является сопутствующим результатом компенсации реактивной мощности.

## **1.2. Анализ существующих конфигураций систем электроснабжения металлургических заводов с электросталеплавильными и прокатными комплексами**

Поскольку СТК соответствуют как техническим, так и экономическим требованиям, предъявляемым к системам электроснабжения металлургических предприятий, то они получили широкое распространение среди существующих конфигураций систем электроснабжения электросталеплавильных производств. Для проведения детального анализа условий работы статических тиристорных компенсаторов и разработки эффективных способов демпфирования провалов напряжения рассмотрим некоторые виды конфигураций систем электроснабжения известных металлургических предприятий.

### **1.2.1. Схема электроснабжения ПАО «Ашинский метзавод», (г. Аша, Челябинская область, Россия)**

Предприятие ПАО «Ашинский метзавод» относится к типу компактных металлургических заводов, включающих себя электросталеплавильный и прокатный комплексы. Основным видом выпускаемой продукции являются толстолистовой прокат из углеродистых, низколегированных, конструкционных и легированных марок сталей.

Около 80% продукции выпускаемой на данном предприятии реализуется на внутреннем рынке России. Основными потребителями готовой продукции завода являются оборонный комплекс, нефтегазовая, химическая, атомная, авиационная и космическая отрасли промышленности.

Электросталеплавильный комплекс «ДСП-120-СТК», расположенный на промышленной площадке ПАО «Ашинский метзавод», получает питание от отдельного сетевого трансформатора 220/35 кВ, оборудованного устройством регулирования напряжения под нагрузкой (РПН). Передача электроэнергии до шин распределительного устройства электросталеплавильного комплекса осуществляется по воздушной кабельной линии.

К общим шинам распределительного устройства (РУ) напряжением 35 кВ подключены дуговая сталеплавильная печь с непрерывной конвейерной загрузкой металлошихты, мощностью 1 млн. т. стали в год, и статический тиристорный компенсатор СТК-100 МВАр, выполняющий классические функции направленные на компенсацию реактивной мощности и стабилизацию напряжения в точке общего подключения. Номинальная мощность печного трансформатора составляет 90 МВА. Реактор и печной трансформатор ДСП-120 расположены в одном баке. Реактор имеет фиксированные параметры. Фильтрокомпенсирующие цепи СТК состоят из широкополосного фильтра 2-ой гармоники и двух узкополосных фильтров 3-ей и 4-ой гармоник.

Упрощенная схема электроснабжения электросталеплавильного комплекса «ДСП-СТК» предприятия ПАО «Ашинский метзавод» представлена на Рисунке 1.2.

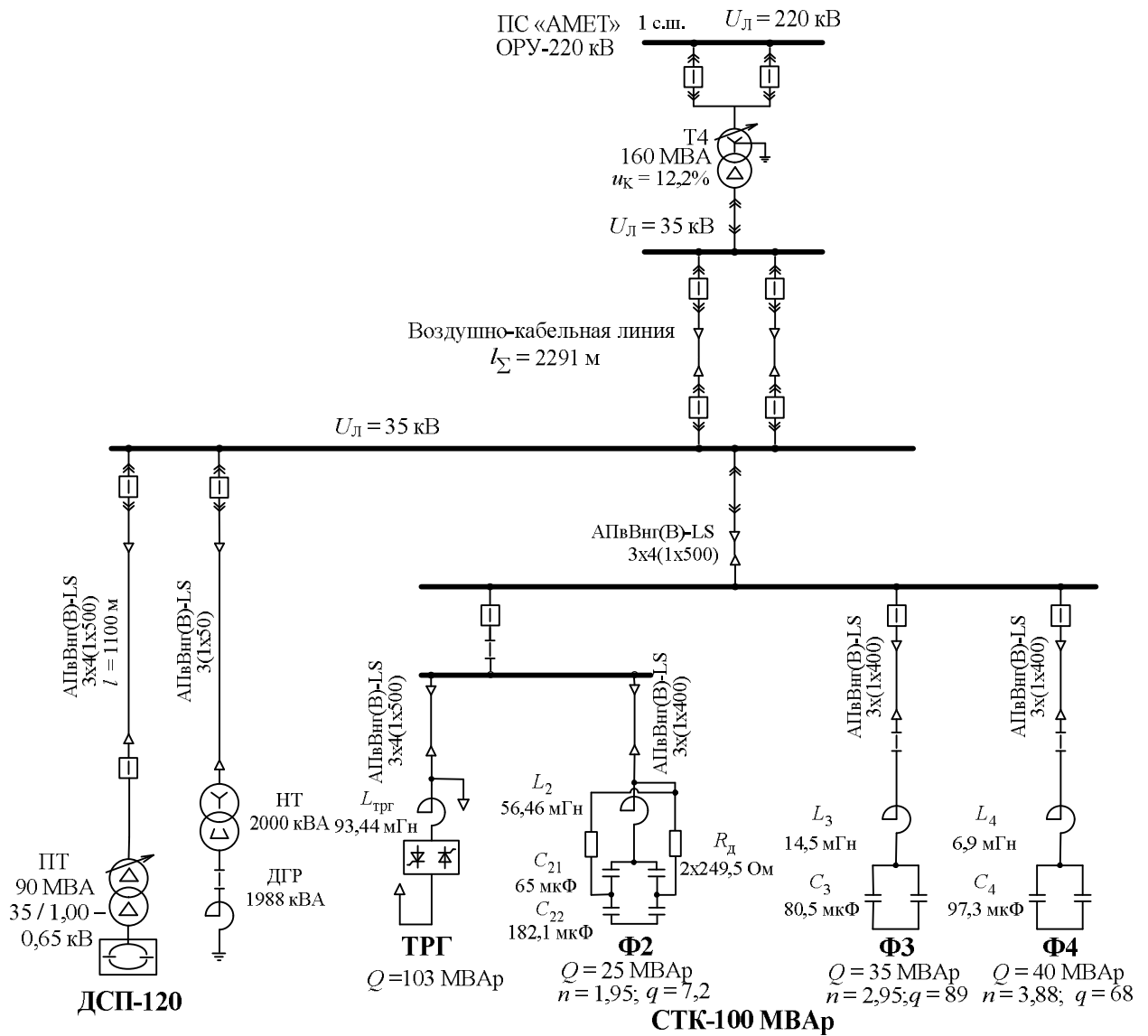


Рисунок 1.2 – Упрощённая схема электроснабжения ДСП-120 ЭСПЦ-2 ПАО «Ашинский метзавод», (г. Аша, Челябинская область, Россия)

### 1.2.2. Схема электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Саратовская область, Россия)

Данное предприятие занимает одно из лидирующих мест в металлургической отрасли на территории Российской Федерации среди компактных заводов. Территориально завод располагается в Саратовской области Российской Федерации. Основной выпускаемой продукцией является арматурный прокат гладкого, периодического и квадратного профиля, уголок, швеллер и горячекатаная полоса. Ежегодный объем производимой продукции составляет более 1 млн. т. сортового проката. Рассмотрим схему электроснабжения АО «Металлургический завод Балаково» подробнее на Рисунке 1.3.

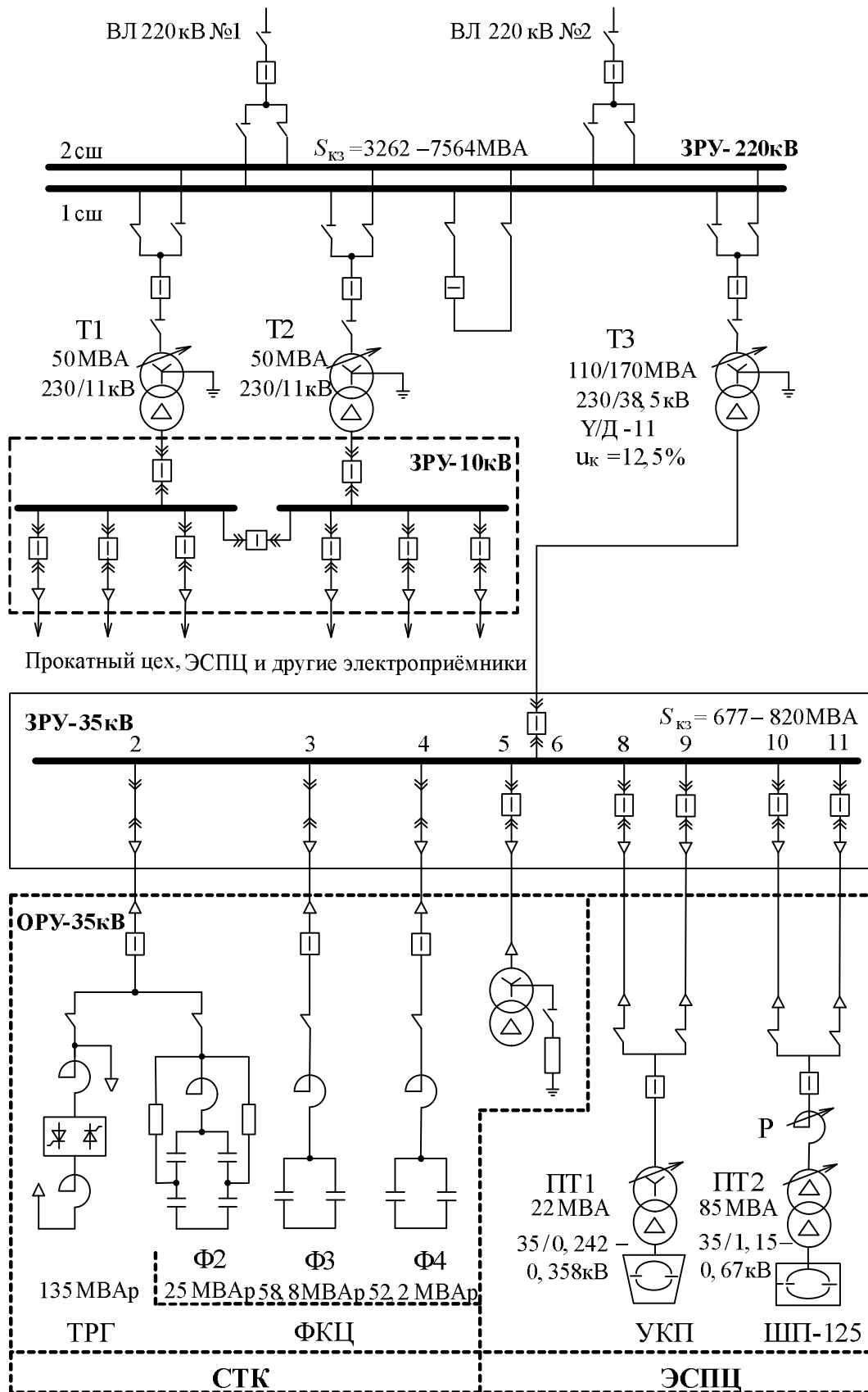


Рисунок 1.3 – Упрощённая схема электроснабжения комплекса «ШП-УКП-СТК»  
 АО «Металлургический завод Балаково» (г. Балаково, Саратовская область,  
 Россия)

В состав электросталеплавильного комплекса «шахтная печь – установка ковш-печь – статический тиристорный компенсатор» (ШП-УКП-СТК) АО «Металлургический завод Балаково» входит СТК-135 МВАр, установка «ковш-печь» с мощностью печного трансформатора 22 МВА и дуговая сталеплавильная печь шахтного типа ШП-125. На главной понизительной подстанции установлено три сетевых трансформатора: 2 - 220/10 кВ и 1 - 220/35 кВ. Электросталеплавильный комплекс подключен к шинам закрытого распределительного устройства (ЗРУ) 35 кВ и получает питание от трансформатора Т3. Остальные электроприемники вспомогательных технологических агрегатов, подключены к шинам ЗРУ 10 кВ (трансформаторы Т1 и Т2). Номинальная мощность печного трансформатора ШП-125 составляет 85 МВА. СТК-135 МВАр производства фирмы АО «Ансальдо-ВЭИ» (АО «Нидек АСИ ВЭИ») работает в режиме поддержания нулевой реактивной мощности комплекса. В своем составе оно имеет 3 фильтра мощностью 25, 58,8 и 52,2 МВАр соответственно.

### **1.3. Способы ограничения негативных влияний провалов напряжения на работу главных электроприводов прокатных станов**

В настоящее время широкое распространение среди электроприводов прокатных станов получили схемы электроснабжения с активными выпрямителями и автономными инверторами напряжения. Силовая схема АВ и АИН включает в себя полностью управляемые полупроводниковые ключи (IGCT тиристоры или IGBT транзисторы). Рассмотрим данную схему на примере прокатного стана 1750 металлургического завода ЗАО «ММК METALURJI» (г. Искендерун, Турция) (Рисунок 1.4).

Главные электроприводы клетей стана 1750 получают питание от трехуровневых преобразователей частоты соединенных параллельно. Каждый преобразователь включает в себя АВ и АИН, построенных на базе IGCT тиристоров. На практике для реализации двенадцатипульсной схемы выпрямления первичные обмотки трансформаторов Т1 и Т2 соединяются последовательно. Преимущество данной схемы состоит в том, что она повышает

качество выпрямленного напряжения и улучшает гармонический состав тока, потребляемого из сети. Звено постоянного тока состоит из двух последовательно включенных емкостей. Напряжение на каждом конденсаторе составляет 2420 В.

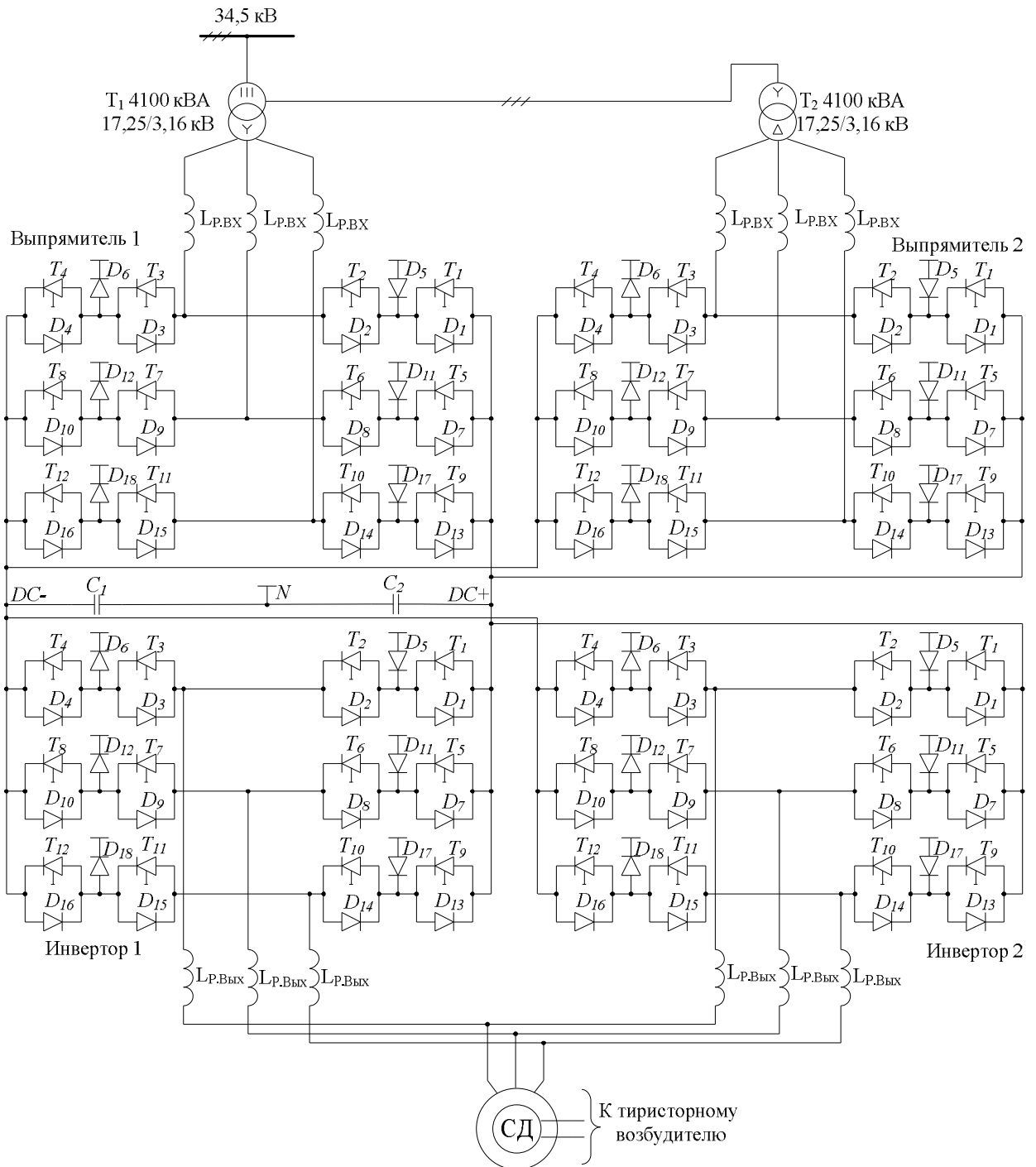


Рисунок 1.4 – Упрощённая принципиальная схема преобразователя частоты в составе электропривода одной из клеток прокатного стана 1750 горячей прокатки металлургического завода ЗАО «ММК METALURJI» (г. Искендерун, Турция)

Как следует из опыта эксплуатации данных преобразователей частоты их системы управления не адаптированы к несимметричным провалам напряжения.



При возникновении провала напряжения во внешней питающей сети глубиной 30 % и длительностью 200 мс наблюдается выход за пределы допустимых границ действующего значения тока на входе АВ ( $I_{гр} = 1500 \text{ A}$ ) и напряжения в звене постоянного тока ( $U_{гр\min} = 4600 \text{ В}$ ;  $U_{гр\max} = 5100 \text{ В}$ ) (Рисунок 1.5) [37].

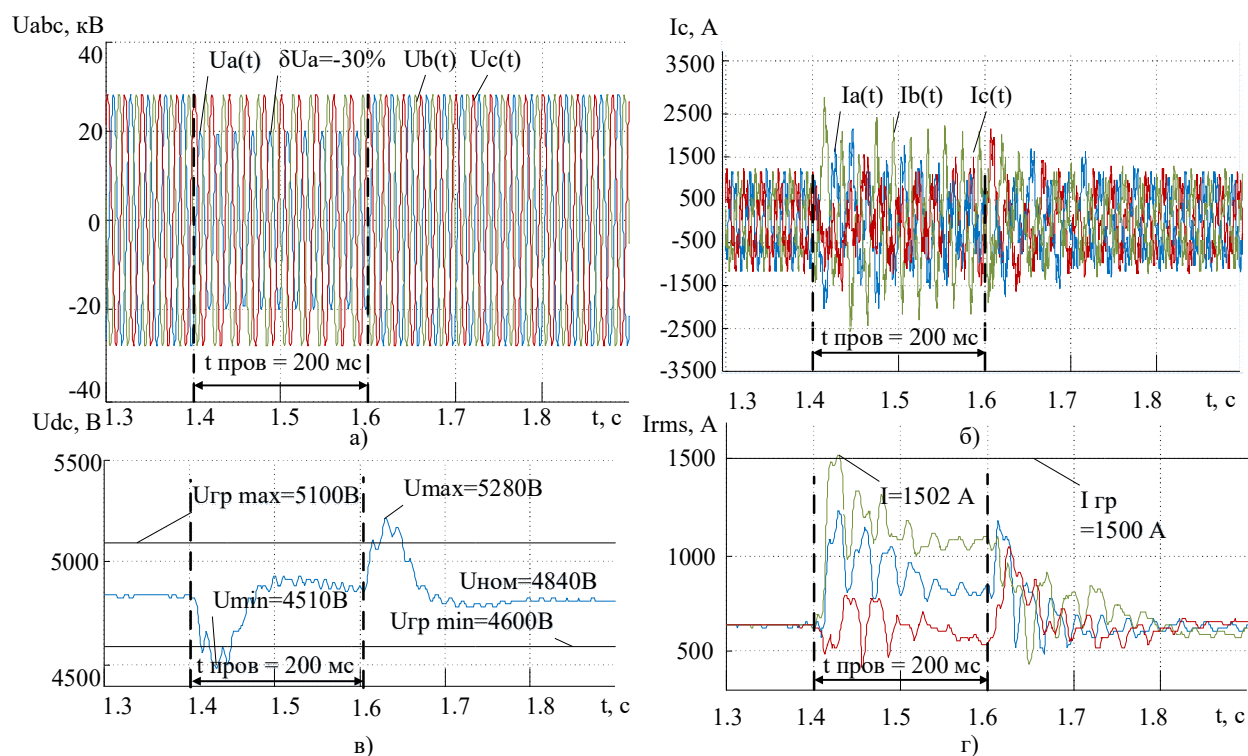


Рисунок 1.5 – Графики, иллюстрирующие работу ПЧ с АВ, при провалах напряжения а) фазные напряжения на стороне 380 кВ; б) фазные токи на входе преобразователя частоты; в) напряжение в звене постоянного тока; г) действующие значения значений токов на входе преобразователя частоты

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал [38, 39], что на сегодняшний день существуют несколько способов повышения надежности работы ПЧ с АВ при кратковременных несимметричных провалах напряжения, создаваемых короткими замыканиями во внешней питающей сети высокого напряжения.

### 1.3.1. Применение кинетического буферирования

В некоторых моделях мощных ПЧ с АВ (например, в преобразователях серии Sinamics S120 и G120 фирмы Siemens) реализована функция кинетического буферирования, смысл которой заключается в поддержании требуемого уровня напряжения в звене постоянного тока за счет кратковременного перевода

двигателя в режим торможения с заданным темпом. За счет этого можно уменьшить уровень изменения данного напряжения и снизить броски тока на входе АВ ниже уставок защиты. Команда на поддержание напряжения в звене постоянного тока появляется при достижении некоторого его минимального значения. В преобразователях частоты 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 математической модели ПЧ с АВ ACS6000 от ABB в системе прямого управления моментом (Direct Torque Control) была реализована функция изменения задания на скорость двигателя в периоды возникновения и исчезновения провала напряжения (Рисунок 1.6) [37].

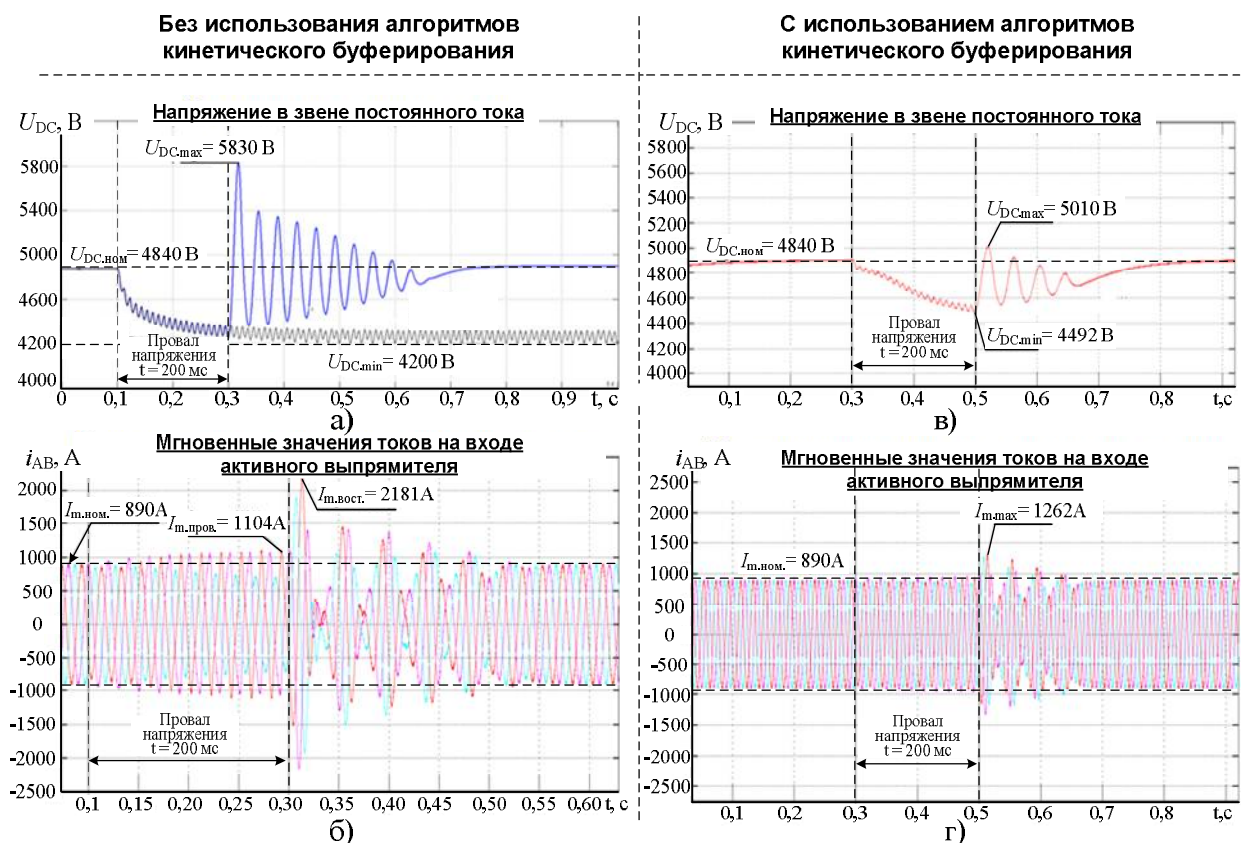


Рисунок 1.6 – Переходные процессы напряжений и токов в звене постоянного тока и на входе активного выпрямителя при возникновении провала напряжения с глубиной  $\delta U = 30\%$  и временем  $t_{пров.} = 200 мс$ , а, б – без использования кинетического буферирования; в, г – с использованием кинетического буферирования

Подобная работа была проведена на главных электроприводах листового стана холодной прокатки ЛПЦ-11 ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», где на базе ПЧ с АВ серии ACS6000 фирмы АВВ были реализованы алгоритмы кинетического буферирования, что позволило сократить число аварийных отключений при провалах напряжения [38].

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. В данном случае необходимо реализовать функции быстродействующей диагностики провала напряжения и формирования отрицательного сигнала задания на момент двигателя для его перевода в режим торможения.

### **1.3.2. Применение систем управления АВ с адаптацией к несимметрии напряжения**

Еще одним способом, описанным в научной литературе и позволяющим добиться повышения устойчивости главных приводов прокатных клетей к провалам напряжения, возникающим во внешней питающей сети, является использование систем управления активными выпрямителями с адаптацией к несимметрии напряжения. При использовании данного способа происходит разложение напряжения питающей сети на прямую и обратную последовательности [40].

Полученное напряжение обратной последовательности используется в качестве корректирующего сигнала предупреждения при формировании фазных напряжений на входе активного выпрямителя, что позволяет снизить величину тока обратной последовательности АВ. Из основных недостатков данного способа стоит выделить неравенство фазных напряжений на стороне переменного тока АВ, что может привести к выходу коэффициента модуляции на ограничение

рабочего диапазона  $\mu = 0,65 - 0,9$  с последующим размыканием контуров регулирования d-q составляющих тока АВ и потерей управляемости активного выпрямителя.

### **1.3.3. Обеспечение равенства коэффициентов модуляции**

Также известным способом ограничения негативного влияния провалов напряжения на устойчивую работу АВ является обеспечение равенства коэффициентов модуляции по фазам в первый момент изменения напряжения. В исследованиях [37] показано, что помимо напряжений прямой и обратной последовательностей, в систему управления АВ необходимо подавать дополнительный корректирующий сигнал, который будет одинаковым для всех трех фаз, и по своей сути являться напряжением нулевой последовательности. Необходимо отметить, что для реализации данного способа нужно выполнять расчет оптимальных значений коэффициентов модуляции для различной глубины и характера провалов напряжения (однофазные, двухфазные и т.д.). Основной сложностью здесь является реализация быстросействующей идентификации характера провала напряжения по измеряемым мгновенным значениям напряжений на стороне переменного тока АВ в рамках существующей системы управления активного выпрямителя.

Помимо этого существует ряд организационных мероприятий по обеспечению надежной работы ПЧ с АВ, такие как: 1) использование автономных источников питания, для силовых преобразователей, функционирующих в режиме раздельной работы с сетью; в качестве таких источников могут выступать, например, заводские газотурбинные электростанции, как это реализовано на предприятии ЗАО «ММК Metalurji»; 2) дифференциация замкнутых сетей внутривозовского электроснабжения 110 кВ на независимые контуры, с сохранением связи между ними на уровне напряжения 220 и 500 кВ на уровне внешней энергосистемы. В результате реализации данного мероприятия 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 внутриводского 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 40 МВт).

В рамках существующих компактных заводов с производительностью до 2,5 млн. тонн стали в год и не имеющих полный металлургический цикл данное решение также не является реализуемым. Например, на исследуемом заводе ЗАО «ММК Metalurji», где функционирует газотурбинная установка (ГТУ) с мощностью генератора 17 МВА, предназначенного в первую очередь для питания электроприемников первой категории надежности, мощности генератора не достаточно для организации автономного питания электроприводов стана 1750 горячей прокатки.

Следует отметить, что способы повышения надежности работы электроприводов прокатного стана за счет применения специальных алгоритмов управления ПЧ с АВ не всегда могут быть реализованы на действующих электроприводах из-за закрытой структуры систем управления силовых преобразователей. Не все фирмы-производители ПЧ с 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 клеток, но и ответственные вспомогательные механизмы прокатного стана, силовые преобразователи которых могут не иметь встроенной защиты от несимметрии питающего напряжения. По этой причине актуальной задачей является разработка способов компенсации провалов напряжения с использованием уже имеющихся на предприятии резервов реактивной мощности.

#### 1.4 Выводы по главе

1. Произведен обзор существующих устройств компенсации реактивной мощности, применяемых в электросталеплавильных комплексах, таких как: конденсаторные батареи, синхронные компенсаторы, фильтрокомпенсирующие цепи, статические тиристорные компенсаторы и быстродействующие статические компенсаторы. Проанализированы преимущества и недостатки каждого из устройств. Сформулированы основные требования, предъявляемые к СТК.

2. Рассмотрены некоторые виды существующих конфигураций схем электроснабжения действующих металлургических заводов. Проведено исследование структуры силового электрооборудования электротехнических комплексов «ДСП-СТК» для различных предприятий. Показано, что в структуре каждого завода присутствует электросталеплавильный комплекс, включающий в себя статический тиристорный компенсатор, работа которого направлена на выполнение условий электромагнитной совместимости и обеспечение заданной производительности при изменении технологических и электрических параметров ДСП.

3. На примере стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» представлено влияние провалов напряжения на работу ПЧ с АВ. Показано, что системы управления главных электроприводов стана горячей прокатки не адаптированы к несимметричным провалам напряжения, и при превышении критических значений  $\delta U_t$ , отключаются из-за снижения напряжения в звене постоянного тока, а также из-за увеличения токов, потребляемых из сети. Произведен обзор наиболее известных способов ограничения влияния провалов на работу электроприводов стана. Для каждого способа проведен сравнительный анализ, выделены достоинства и недостатки.

4. Рассмотрены существующие способы ограничения негативных влияний провалов напряжения на работу главных электроприводов прокатных станов. Предложен способ повышения надежности работы электроприводов прокатных станов за счет использования резервов реактивной мощности СТК, входящих в состав электросталеплавильных комплексов компактных минизаводов.

## ГЛАВА 2. ВЛИЯНИЕ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СИСТЕМАХ ВНУТРИЗАВОДСКОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА РАБОТУ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Одним из основных требований, предъявляемым к системам электроснабжения металлургических предприятий является надежное и бесперебойное обеспечение электроэнергией всех ответственных электроприемников. Важным условием для соблюдения данного требования является соответствие качества электроэнергии параметрам, установленным в нормативной документации. Все показатели качества электроэнергии можно разделить на две категории: продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события. Продолжительные изменения, как правило, обусловлены характером нагрузки и имеют большую длительность по времени, в отличие от случайных событий, которые возникают вследствие неисправностей в системе электроснабжения (СЭС) либо при включении мощной нагрузки. Провал напряжения, также как и перенапряжение, относится к числу случайных событий [41-42]. Согласно ГОСТ 32144-2013 он определяется как временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения. Основными характеристиками провалов являются их глубина  $\Delta U$ , длительность  $\Delta t$  (от 10 мс до 1 мин) и частота возникновения  $F$  [5]. При возникновении частых провалов напряжения возникает вопрос о разработке мероприятий, направленных на поддержание напряжения в пределах установленных значений. При этом эффективность предложенных решений напрямую зависит от степени проработанности наиболее вероятных причин возникновения провалов напряжения, а также анализа их влияния на работу чувствительных к данному явлению электроприемников. Рассмотрим проблему частых провалов напряжения на примере металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция).

## 2.1. Анализ конфигурации системы внутривозовского электроснабжения металлургического завода ЗАО ММК Metalurji»

Предприятие ЗАО «ММК Metalurji», входит в состав групп компаний ПАО «ММК» – одного из крупнейших производителей стали с полным технологическим циклом, расположенным на юго-западе Турции в промышленной зоне DORTYOL г. Искендерун (Рисунок 2.1, а). Исходное сырье для производства листовой продукции поступает на завод морским путем в виде металлического лома и чугуна.

Электросталеплавильный цех (ЭСПЦ) завода имеет в своем составе сверхмощную ДСП номинальным объемом 250 т и мощностью печного трансформатора 300 МВА, УКП с мощностью трансформатора 53 МВА. Общая производительность цеха составляет 2400000 т/год. Основные технические характеристики ДСП-250 приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные технические характеристики ДСП-250

№ п/п	Наименование параметров	Единицы измерения	Значение
1	Масса плавки		
	- номинальная	т	250
	- максимальная	т	300
	Масса остатка металла после выпуска	т	50
2	Диаметр кожуха	мм	9400
3	Диаметр графитированных электродов	мм	810
4	Ход электродов	мм	6500
5	Объем загрузочной бадьи	м <sup>3</sup>	300
6	Производительность по вдуванию:		
	- кислорода	м <sup>3</sup> /ч	8x2550
	- природного газа	м <sup>3</sup> /ч	
	- углерода	кг/мин	5x45
7	Мощность горелок RCB	МВт	13x4,4
8	Время цикла от выпуска до выпуска	мин	47

После прохождения этапа разливки металла на машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) слябовые заготовки поступают на линию прокатки. Стан 1750 горячей прокатки включает в себя 2 черновые клетки с высоковольтными



синхронными электродвигателями 6600 и 7800 кВт и 4 чистовые клетки – 2 с электродвигателями 9500 кВт и 2 с 8500 кВт. Силовая схема ПЧ выполнена на базе многоуровневых АВ и автономных инверторов напряжения (серия ПЧ с АВ ACS6000 производства компании АВВ). Результатом работы данного стана является стальная полоса толщиной 1-20 мм, шириной 800-1570 мм, которая после прохождения непрерывного травильного агрегата (НТА) поступает на двухклетевый реверсивный стан холодной прокатки. На выходе получается стальная полоса толщиной 0,25-2 мм, шириной 800-1530 мм. Одна часть полученной продукции поступает в Стамбул, на другую промышленную площадку металлургического завода, а вторая часть поступает на агрегат непрерывного горячего цинкования (АНГЦ) и агрегат полимерных покрытий (АПП). В итоге полученный металл распределяется на внутреннем и внешнем рынках и применяется в автомобилестроении, производстве бытовой техники и строительстве.

Электроснабжение металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» осуществляется по кольцевой линии 380 кВ от районной подстанции Erzin, входящей в СЭС провинций Хатай и Адана (Рисунок 2.1, б) [43-46].

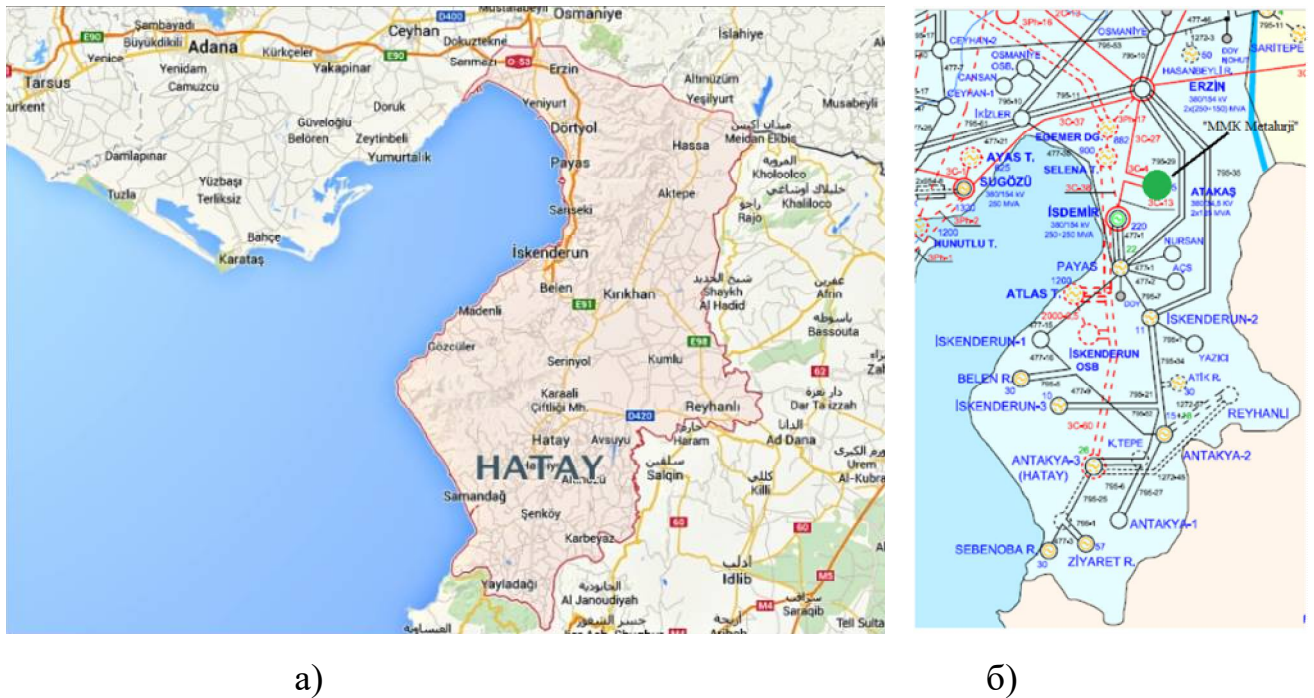


Рисунок 2.1 – Карта провинции Хатай и Адана Турецкой республики (а) и схема районных электрических сетей 380 кВ (б)

Упрощенная схема замещения исследуемого энергорайона приведена на Рисунке 2.2.

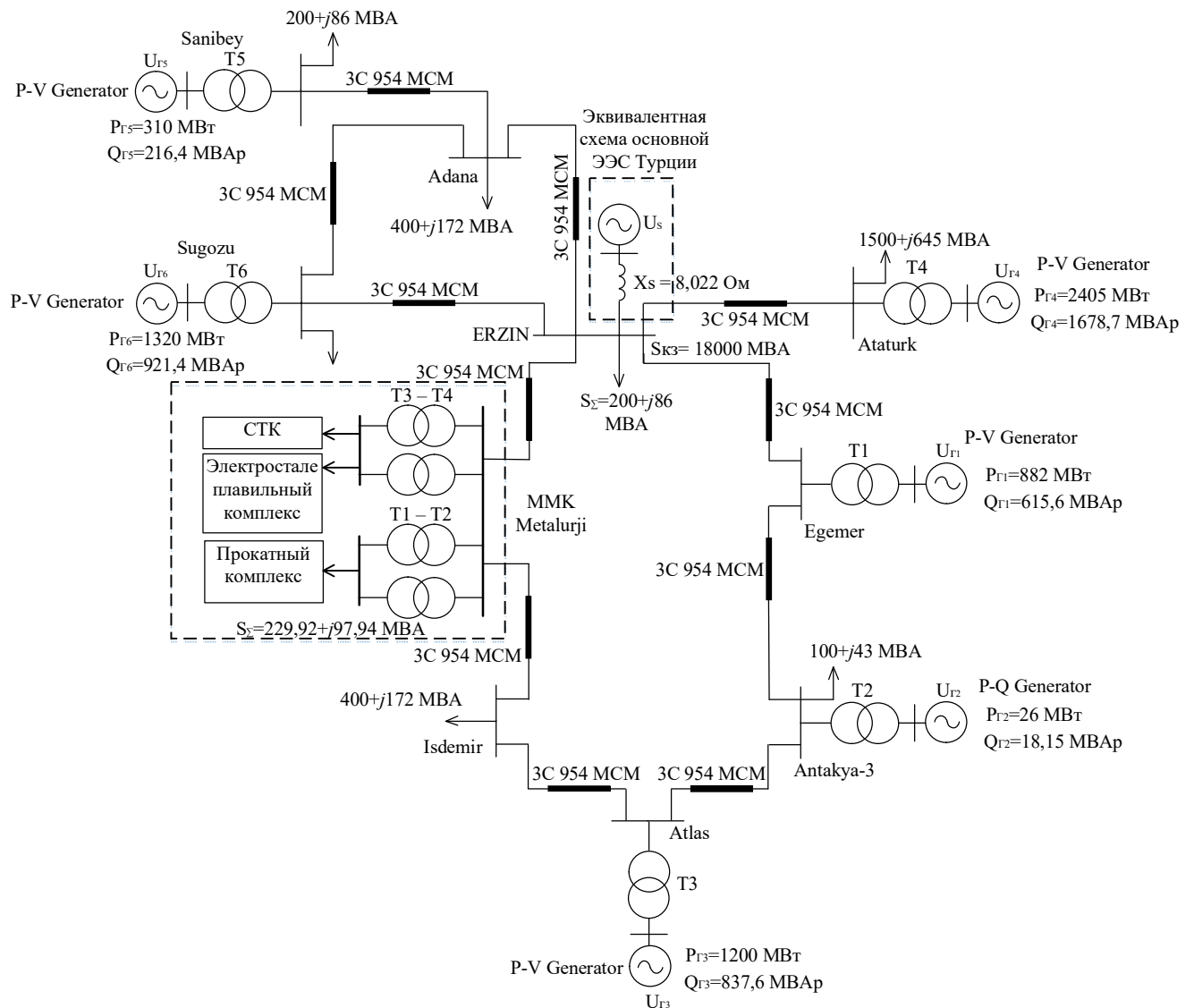


Рисунок 2.2 – Схема замещения исследуемого энергорайона провинций Хатай и Адана (Турция)

Кольцевая схема электроснабжения завода соединена с внешней энергосистемой Турции через районную подстанцию Erzin и образована электростанциями Egemer с генерирующей способностью 2405 МВт и 1678,7 МВАр, Антакья-3 с генерирующей способностью 26 МВт и 18,15 МВАр, Atlas с генерирующей способностью 1200 МВт и 837,6 МВАр и металлургическим заводом Isdemir.

Внешняя энергосистема Турции представлена в виде эквивалентной схемы с сопротивлением  $X_s = 8,022 \text{ Ом}$  и мощностью короткого замыкания

$S_{кз} = 18000 \text{ МВА}$ . До 2015 г. энергетическое кольцо было разомкнуто на участке Isdemir – Antakya-3.

Главная понизительная подстанция (ГПП) включает в себя 4 понизительных трансформатора (Т1, Т2, Т3 и Т4) мощностью 155 МВА и напряжением 380/34,5 кВ (Рисунок 2.3).

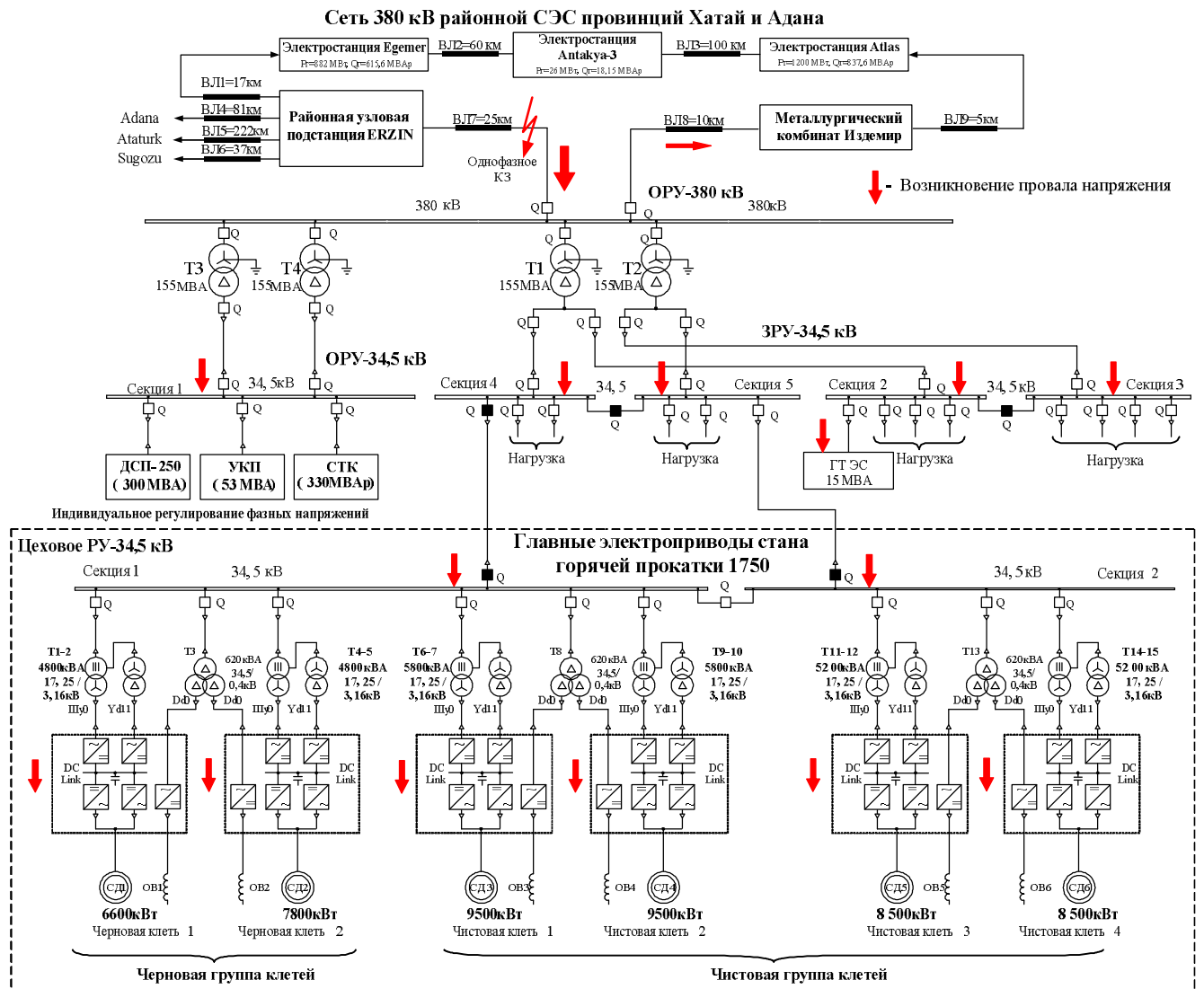


Рисунок 2.3 – Упрощенная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК METALURJI» (г. Искендерун, Турция)

Электросталеплавильный комплекс получает питание от первой секции шин (трансформаторы Т3 и Т4) и состоит из параллельно включенных ДСП-250, УКП и СТК 330 МВАр. Статический тиристорный компенсатор подключен на одну секцию с дуговой печью и установкой «ковш-печь». В нормальном режиме работы

он осуществляет компенсацию реактивной мощности электросталеплавильного комплекса, симметрирование и фильтрацию высших гармоник токов ДСП и УКП.

Главные электроприводы стана 1750 горячей прокатки подключены к четвертой и пятой секциям шин (Т1 и Т2). Силовая схема ПЧ выполнена на базе многоуровневых АВ и автономных инверторов напряжения (серия ПЧ с АВ ACS6000 производства компании АВВ), построенных на базе IGBT тиристоров. Как уже было отмечено ранее, данные схемы не адаптированы к несимметричным провалам напряжения. При возникновении подобной ситуации имеет место срабатывание защиты преобразователя и его отключение. Поскольку данное явление может привести к остановке технологического процесса и значительному экономическому ущербу, поставленная задача требует более детальной проработки.

## **2.2. Анализ распределения провалов напряжения во внутризаводской сети металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»**

Одной из особенностей СЭС, питающей металлургический завод ЗАО «ММК METALURJI», является подверженность ЛЭП 380 кВ кратковременным, самоустраняющимся, однофазным коротким замыканиям. Данные явления приводят в свою очередь к тому, что на ГПП предприятия, на стороне высокого напряжения, возникают кратковременные провалы, которые трансформируясь во внутризаводскую сеть 34,5 кВ, вызывают отключение ПЧ приводов прокатных станков [47].

На Рисунке 2.4 приведены графики мгновенных значений фазных напряжений в сети 380 кВ, 34,5 кВ и суммарных фазных токов листопрокатного комплекса, в момент возникновения провала напряжения  $\delta U = 57\%$ ,  $t_{пров} = 120 \text{ мс}$ . Как можно видеть, провал напряжения по одной фазе на стороне 380 кВ вызывает снижение напряжения в двух фазах на стороне 34,5 кВ, что в свою очередь, приводит к резкому увеличению тока на шинах стана горячей прокатки.

На данном этапе стоит отметить, что аварийное отключение ПЧ стана 1750 горячей прокатки влечет за собой застревание полосы в прокатных клетях. На устранение подобных ситуаций, как правило, требуется около 1-2 часов времени.

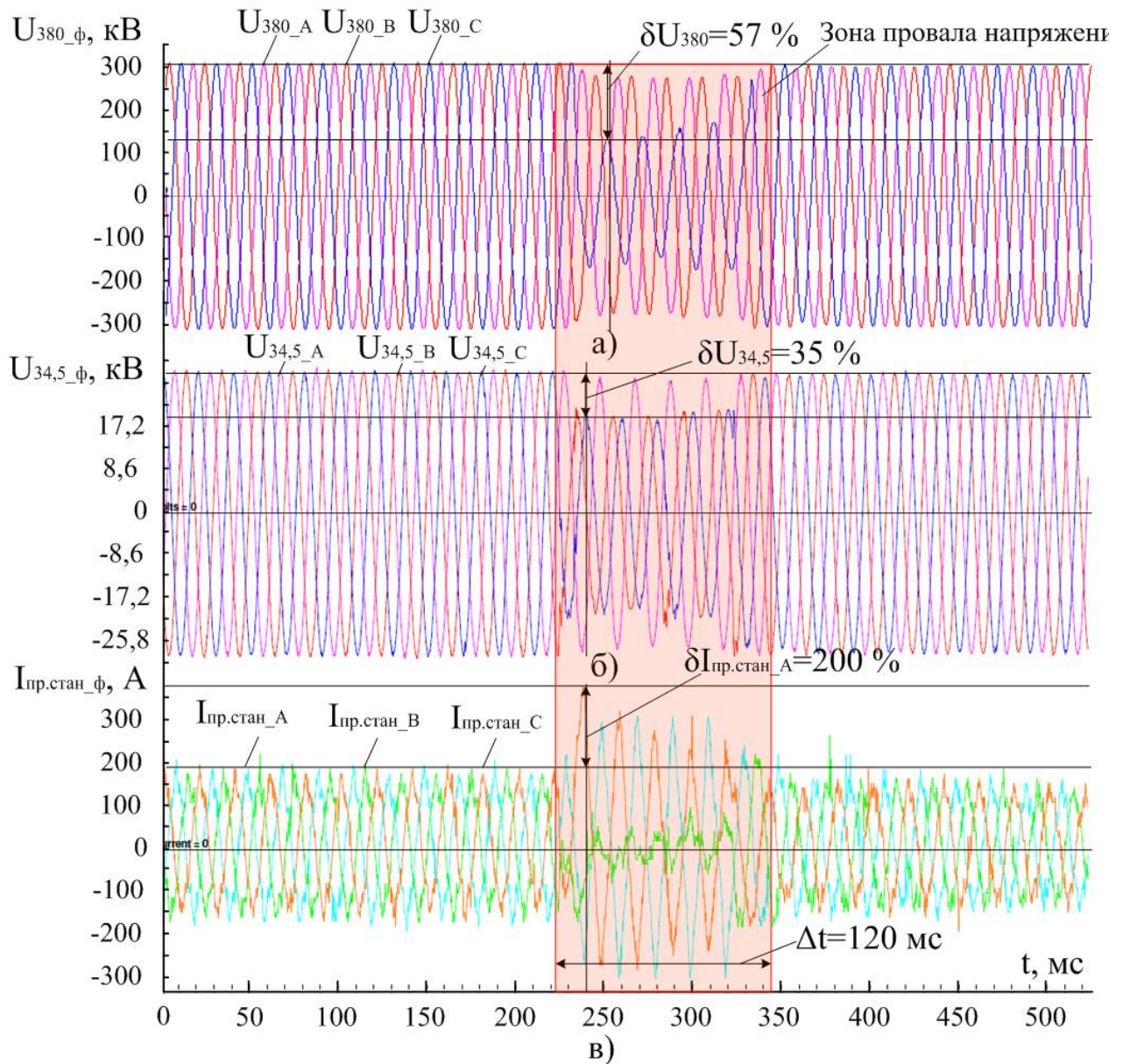


Рисунок 2.4 – Мгновенные значения фазных напряжений в сети 380 кВ (а), 34,5 кВ (б) и суммарных фазных токов листопрокатного комплекса ЗАО «ММК Metalurji» (в) в момент возникновения провала напряжения  $\delta U = 57\%$ ,  $t_{\text{пров.}} = 120$  мс

Учитывая тот факт, что стан 1750 работает в составе непрерывного литейно-прокатного комплекса, то отключение электродвигателей главных приводов клетей вызывает остановку электросталеплавильного комплекса, что отражается в недовыпуске готовой продукции и значительных затратах на восстановление работоспособного состояния вышедших из строя единиц

оборудования. В этой связи перед руководством предприятия встала задача повысить надежность работы электроприводов стана горячей прокатки за счет снижения количества внеплановых отказов в условиях регулярных провалов напряжения в питающей сети 380 кВ. Рассмотрев множество вариантов достижения поставленной цели и не найдя оптимального решения, необходимо было искать новые пути решения данной проблемы.

По статистике наиболее частыми повреждениями ЛЭП являются однофазные короткие замыкания (65%). Двухфазные КЗ и двухфазное КЗ на землю встречаются реже – 20% и 10% соответственно. Самым тяжёлым и самым редким видом повреждений являются трёхфазные КЗ – 5% от всех возможных коротких замыканий [48]. Для анализа подобных режимов на электрической подстанции предприятия была получена статистическая информация о провалах напряжения возникающих в период с 2012-2014 г. Как видно из Рисунка 2.5 наиболее часто встречающимися являются однофазные провалы напряжения глубиной  $\delta U_t = 10 - 50\%$  и длительностью  $t_{пров} = 50 - 100$  мс. Большинство из этих провалов вызвали превышение критических значений  $\delta U_t$  и  $t_{пров}$  для ПЧ стана 1750 горячей прокатки.

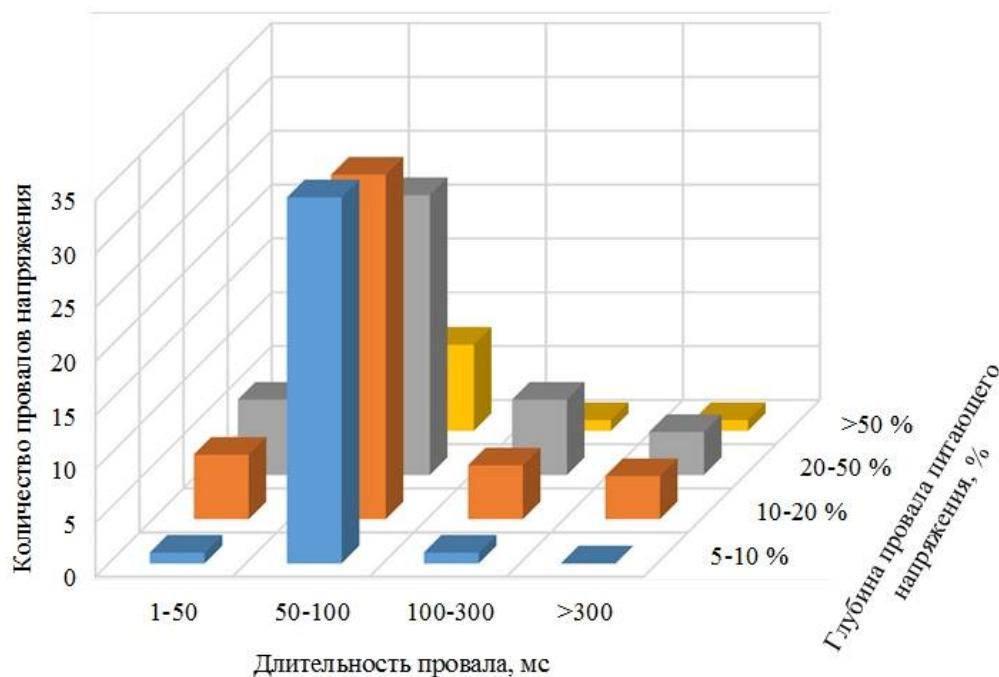


Рисунок 2.5 – Распределение однофазных провалов напряжения в сети 380 кВ металлургического завода ЗАО «ММК METALURJI» в 2012-2014 гг.

С учётом того, что данные провалы напряжения во внешней питающей сети 380 кВ устраняются через определенное количество времени, можно говорить о следующих причинах их возникновения:

- 1) перекрытие вследствие прямых ударов молнии в элементы воздушных линий передач или открытые распределительные устройства (ОРУ);
- 2) снижение диэлектрических свойств изоляторов ЛЭП, вызванное их естественным старением или термическим разрушением;
- 3) замыкания о ветки деревьев токоведущих частей ЛЭП.

При рассмотрении наиболее вероятных причин возникновения однофазных коротких замыканий в сети 380 кВ, а так же опираясь на результаты наблюдений оперативного персонала ГПП, была принята во внимание гипотеза о влиянии климатических особенностей данного района на работу СЭС. Для проверки данного утверждения был построен график распределения количества провалов напряжения и график суточного количества дождей и гроз в районе провинций Хатай и Адана за период 2013 г. (Рисунок 2.6).

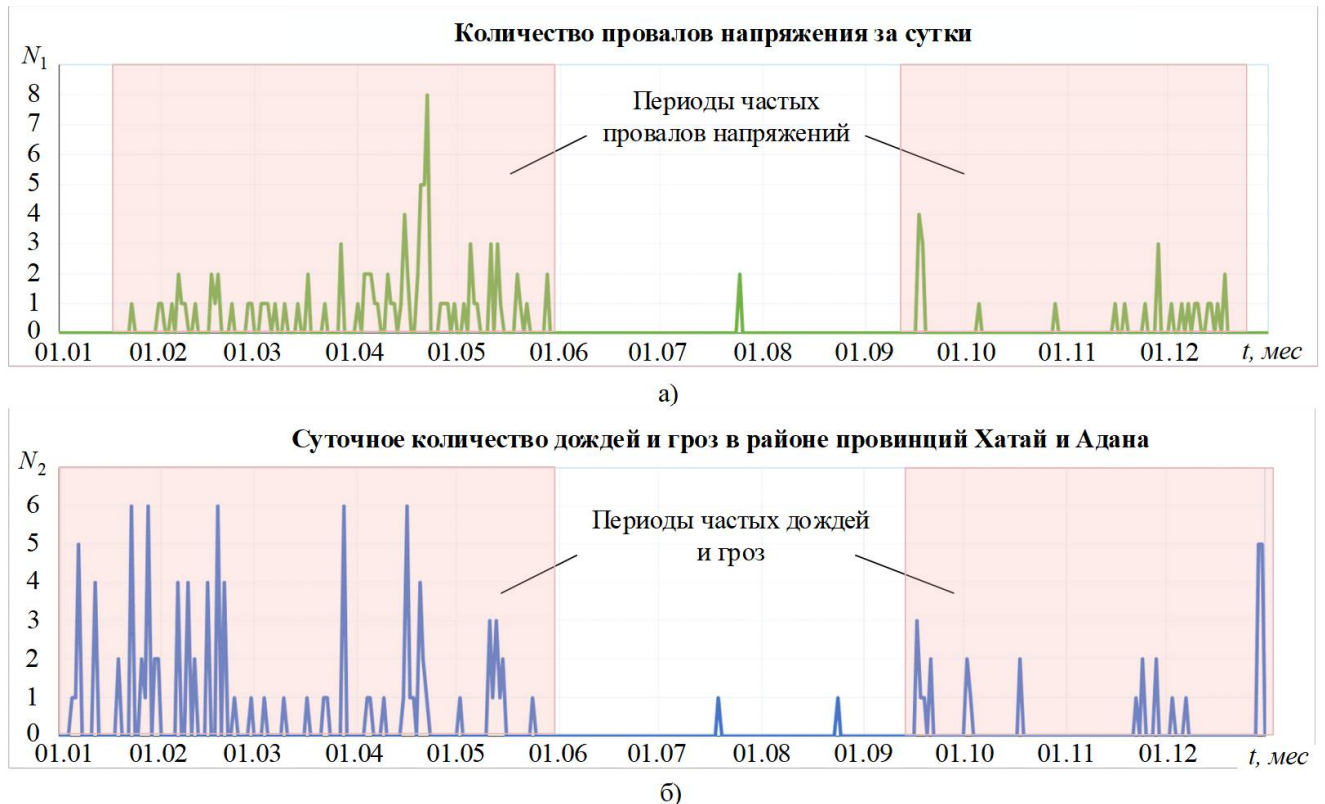


Рисунок 2.6 – Графики возникновения провалов напряжения в течение 2013 года (а) и выпадения дождей с грозами в районе провинций Хатай и Адана (б)

Как можно видеть из представленных графиков, отчетливо наблюдается совпадения времени частого возникновения провалов напряжения с наиболее дождливыми периодами в году. Необходимо отметить, что в некоторых случаях происходит совпадение пиков обоих графиков. Статистика за 2012-2014 года приведена в Приложении А. Таким образом, можно сделать вывод о сезонном характере возникновения провалов напряжения, что, несомненно, стоит учитывать в дальнейших исследованиях.

В таблице 2.2 указано процентное соотношение гроз в общем количестве провалов напряжения за указанные периоды.

Таблица 2.2 - Влияние гроз на провалы напряжения в процентном соотношении за период 2012-2014 г

Показатели	Исследуемый календарный год		
	2012	2013	2014
Кол-во дней в году, когда имели место провалы напряжения, $N_{1\Sigma}$	27	72	41
Кол-во дней в году, когда имели место грозы и осадки, $N_{2\Sigma}$	125	93	115
Кол-во совпадений гроз и осадков с провалами напряжения $N_3$	17 (63%)	34 (47,2%)	19 (46,3%)

Обобщая результаты проведенных исследований, можно утверждать, что в среднем в 50% случаев основной причиной возникновения провалов напряжения в СЭС ЗАО «ММК Metalurji» являются атмосферные осадки, сопровождающиеся грозовыми разрядами.

Далее рассмотрим применение различных алгоритмов ШИМ преобразователей частоты главных электроприводов стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» с целью повышения их устойчивости к провалам напряжения во внешней питающей сети.



### 2.3. Исследование процессов, протекающих в преобразователях частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения

В предыдущих параграфах было установлено, что электроприводы клетей прокатных станов выполняются на базе преобразователей частоты с активными выпрямителями, силовые ключи которых состоят из IGBT-транзисторов или IGCT-тиристоров, работающих в режиме широтно-импульсной модуляции. На сегодняшний день можно выделить четыре основных типа алгоритмов работы ШИМ, это [49]:

- синусоидальная ШИМ;
- векторная ШИМ;
- ШИМ с удалением выделенных гармоник;
- ШИМ с фиксированными углами переключения.

С целью оценки устойчивости системы управления ПЧ с АВ в моменты провалов напряжения были проведены исследования, в которых анализировались особенности работы алгоритмов различных видов ШИМ в данных условиях на примере стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji».

Так, например, при синусоидальной ШИМ формирование управляющих импульсов силовыми ключами АВ основано на сравнении требуемого синусоидального сигнала с двумя пилообразными опорными напряжениями. В реальных условиях эксплуатации синусоидальная ШИМ применяется довольно редко [50]. При возникновении провала напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс система управления не способна поддерживать напряжение в звене постоянного тока на заданном уровне (Рисунок 2.7). Минимальная величина напряжения постоянного тока составила 4450 В. В первый момент после устранения провала напряжения, происходит резкий скачок напряжения  $U_{dc}$  до 2100 В (Рисунок 2.7 - а). Помимо этого возникает бросок сетевого тока до значения 1900 А, что неизбежно приведет к срабатыванию максимальной токовой защиты (Рисунок 2.7 - б).

Другим вариантом реализации ШИМ является векторный алгоритм.

В этом случае все возможные комбинации включения ключей активных выпрямителей можно представить в виде плоскости – правильного шестиугольника. На основании заданного в пространстве вектора напряжения АВ система управления определяет сектор и регион. Далее определяются три базовых вектора и длительности включения каждого из них для получения необходимого вектора напряжения. В результате работы данных алгоритмов формируются импульсы управления силовыми ключами [51-53].

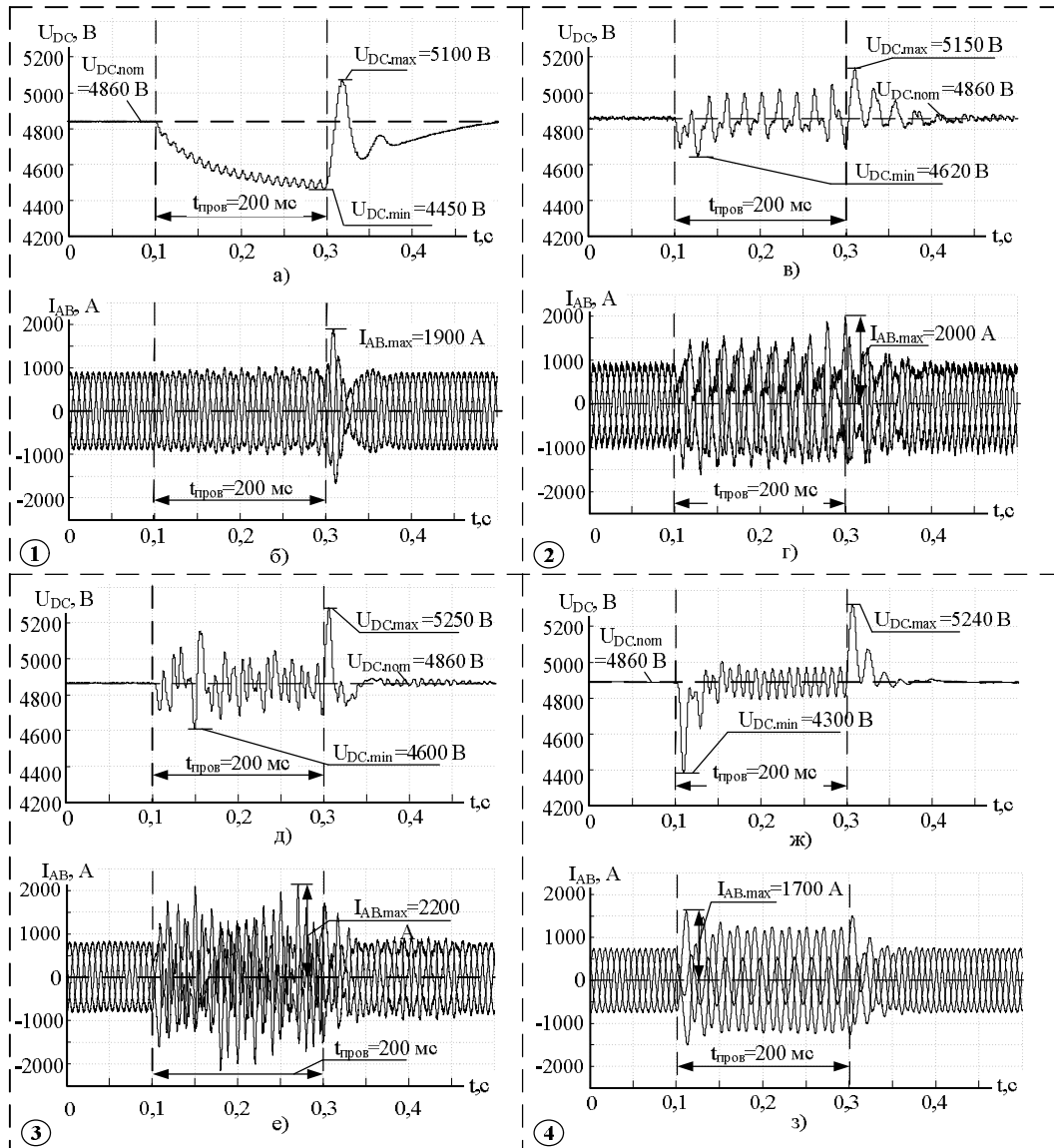


Рисунок 2.7 – Осциллограммы напряжения в звене постоянного тока (а, в, д, ж) и сетевого тока (б, г, е, з), потребляемого ПЧ, при использовании: 1 – синусоидального алгоритма ШИМ АВ; 2 – векторного алгоритма ШИМ АВ; 3 – ШИМ АВ с удалением выделенных гармоник; 4 – ШИМ АВ с фиксированными углами переключения

Приведенный выше алгоритм применяется в преобразователях частоты фирмы Siemens (например, в Siemens S120). В этом случае, также как и для примера с синусоидальной ШИМ, наблюдается снижение уровня напряжения в звене постоянного тока до значения 4620 В (Рисунок 2.7 - в). Несмотря на это система управления все же поддерживает уровень напряжения за счет увеличения потребляемых токов АВ, но при этом колебания напряжения превышают допустимый порог в 10%. Если говорить о токах, потребляемых из сети, то здесь также наблюдается сильная несимметрия по фазам (Рисунок 2.7 - г). В момент исчезновения провала и восстановления питающего напряжения ток АВ достигает значения 2000 А, что также приведет к срабатыванию токовой защиты и отключению главных электроприводов стана.

При использовании алгоритмов ШИМ с удалением выделенных гармоник на основе задающих сигналов происходит предварительный расчет углов переключения АВ. Особенностью данного алгоритма является то, что в этом случае происходит исключение определенных гармоник из потребляемого тока. Например, в случае использования двенадцатипульсной схемы подлежат исключению гармоники 11, 13, 23 и 25 [54]. Данный алгоритм ШИМ для определения состояния силовых ключей АВ применяется в ПЧ компании АВВ (например, в серии ACS6000) [55]. На Рисунке 2.7 показаны осциллограммы напряжение в звене постоянного тока (Рисунок 2.7 - д) и сетевой ток (Рисунок 2.7 - е) ПЧ при провале напряжения глубиной 30% и длительностью 200 мс. При работе данного алгоритма ШИМ происходит снижение напряжения до 4600 В, а размах колебаний составляет 7-10%. В момент окончания провала напряжения в питающей сети наблюдается увеличение напряжения в звене постоянного тока до 5250 В. Также, как и в предыдущих случаях можно видеть несимметрию токов, потребляемых АВ действующее значение, которых превышает уставки срабатывания токовых защит ПЧ.

Алгоритм ШИМ с фиксированными углами переключения основан на предварительном расчете углов переключения силовых ключей АВ. Критерием расчета в данном случае является минимальная величина активных потерь в

транзисторах и ограничение высших гармоник тока. В случае ШИМ с фиксированными углами переключения происходит регулирование активной составляющей тока за счет изменения реактивной. Данное регулирование достигается за счет фиксации амплитуды напряжения на входе АВ и изменения фазы напряжения по отношению к фазе питающего напряжения. Этот вид ШИМ применяется в ПЧ фирмы ТМЕИС.

В момент возникновения однофазного провала напряжения при использовании ШИМ с фиксированными углами переключения происходит падение напряжения в звене постоянного тока до уровня 4300 В и его увеличение до 5240 В после восстановления напряжения в питающей сети. Колебания напряжения в звене постоянного тока на всей длительности провала не превышают 2 % от величины номинального значения напряжения (Рисунок 2.7 - ж). Максимальная величина потребляемого тока ПЧ при возникновении провала достигает значения в 1700 А (рисунок 2.7 - з). Данное значение также недопустимо и превышает уставку срабатывания токовой защиты.

Результаты исследований работы различных алгоритмов ШИМ при возникновении провала напряжения в питающей сети приведены в Таблице 2.3. Подчеркнутые значения превышения тока  $\delta I_{ACmax}$ , % являются критическими и приводят к срабатыванию токовых защит.

Таблица 2.3 – Сравнение работы АВ при различных алгоритмах ШИМ при провале напряжения для стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji»

Алгоритм ШИМ	$\delta U_{DCmax}$ , %	$\delta I_{ACmax}$ , %	$t_{III}$ , мс
При возникновении провала напряжения			
синусоидальный	8,44	7,5	250
с фиксир. углами	4,94	<u>66</u>	100
с удалением выд. гарм.	11,5	<u>144</u>	50
векторный	5,35	<u>143</u>	150
При устранении провала напряжения			
синусоидальный	4,9	<u>110</u>	150
с фиксир. Углами	5,97	<u>122</u>	100
с удалением выд. гарм.	7,82	<u>65</u>	50
векторный	8,01	<u>88,1</u>	50

Как видно из данных, приведенных в таблице 2.3, ни один из вариантов ШИМ не способен обеспечить устойчивую работу электроприводов стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji».

Таким образом, в дальнейших исследованиях принят к рассмотрению вариант демпфирования провалов напряжения средствами статического тиристорного компенсатора, функционирующего в комплексе с дуговой сталеплавильной печью. В условиях ЗАО «ММК Metalurji» для реализации данного решения было предложено выполнить объединение секций шин ОРУ-34,5 кВ и цехового распределительного устройства РУ-34,5 кВ стана 1750 горячей прокатки, от которого получают питание понизительные трансформаторы мощных ПЧ с АВ серии ACS 6000 фирмы АВВ. Для этого предполагается прокладка дополнительной кабельной линии.

Необходимо отметить, что использование СТК электродуговой печи с классической системой управления не способно обеспечить эффективное демпфирование провалов напряжения из-за особенностей заложенных алгоритмов расчета реактивных проводимостей фаз ТРГ. Использование медленного канала с обратной связью по напряжению сети 34,5 кВ также не обладает возможностью по компенсации несимметричных провалов, т.к. в данном случае интегральный регулятор напряжения осуществляет поддержание заданного значения напряжения прямой последовательности за счет формирования одинаковых для всех трех фаз ТРГ корректирующих сигналов на реактивную проводимость. С этой целью необходимо провести более детальные исследования с помощью методов математического моделирования.

## **2.4 Выводы по главе**

1. Выполнен анализ системы конфигурации внутризаводского электроснабжения металлургического завода ЗАО ММК Metalurji». Выделены особенности работы ЛЭП, функционирующих в представленных энергорайонах. Рассмотрена однолинейная схема электроснабжения основных силовых электроустановок предприятия, входящих в состав электросталеплавильного и прокатного производств.

2. На основании реальных осциллограмм токов и напряжений, полученных на ГПП предприятия ЗАО «ММК Metalurji», произведено исследование распределения провалов напряжения во внутривозвратной сети металлургического завода ЗАО ММК Metalurji». Определено, что наиболее часто возникают провалы напряжения глубиной  $\delta U_t = 10 - 50\%$  и длительностью  $t_{пров} = 50 - 100$  мс. Рассмотрены основные причины их возникновения. Так к рассмотрению была принята гипотеза о влиянии климатических особенностей данного района Турции на надежность работы СЭС. Описано влияние провалов напряжения на процесс производства электросталеплавильного и прокатного комплексов.

3. Восстановлен годовой график возникновения провалов напряжения во внешней питающей сети предприятия ЗАО ММК Metalurji», что позволило сделать вывод об их сезонном характере. Получены результаты исследований, показывающие процент влияния погодных условий на вероятность возникновения провалов напряжений. Отмечено, что при существующей системе управления электрическим режимом СТК невозможно осуществить демпфирование провалов напряжения из-за особенностей заложенных алгоритмов расчета реактивных проводимостей фаз ТРГ.

4. На примере стана 1750 горячей прокатки ЗАО ММК Metalurji» проведено исследование работы различных алгоритмов ШИМ АВ при провалах напряжения, возникающих во внешней питающей сети. К рассмотрению было принято четыре основных вида ШИМ: синусоидальная, векторная, с удалением выделенных гармоник и с фиксированными углами переключения. В каждом из описанных случаев в период протекания провала напряжения наблюдается снижение напряжения в звене постоянного тока и несимметрия токов на входе АВ, а при восстановлении напряжения возникновение бросков тока, превышающих уставку срабатывания токовых защит. Доказано, что ни один из представленных алгоритмов не способен обеспечить бесперебойную работу ПЧ главных приводов прокатных станов в данных условиях.

### **ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТК И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕЗЕРВОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ**

Для осуществления демпфирования несимметричных провалов напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК необходима разработка усовершенствованной системы управления статическим компенсатором с переключающейся структурой, которая бы обеспечивала переход на иной принцип управления ТРГ в период возникновения внешних возмущений со стороны питающей сети. В частности, данная система в период возникновения провала напряжения должна кратковременно переводить СТК в режим индивидуального поддержания фазных напряжений с последующим возвратом на существующие режимы регулирования. Для реализации предложенных и исследования демпфирующей способности СТК был использован метод имитационного моделирования в программном пакете Matlab с приложением Simulink [56].

#### **3.1. Разработка имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК»**

Дуговые сталеплавильные печи являются неотъемлемым элементом технологической цепи в металлургическом производстве. В системе электроснабжения предприятия ДСП является специфическим нелинейным приёмником с несимметричным и резкопеременным характером изменения нагрузки [57, 58].

Установленная на промышленной площадке ЗАО «ММК Metalurji» ДСП - 250, получает питание от сети через печной трансформатор и реактор, произведенных фирмой AREVA (Приложение Б). Мощность печного трансформатора составляет 300 МВА. Трансформатор снабжен устройством регулирования вторичного напряжения под нагрузкой.

Основные технические характеристики трансформатора и реактора приведены в Таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные технические характеристики печного трансформатора и реактора

Наименование параметров	Значение параметра
1. Номинальная мощность $S_{1\text{ном}}$ , МВА	300
2. Номинальная частота питающего напряжения $f_{\text{ном}}$ , Гц	50
3. Номинальное первичное напряжение $U_{1\text{ном.л}}$ , В	34500
4. Номинальное вторичное напряжение $U_{2\text{ном.л}}$ , В	1683
5. Номинальный первичный ток $I_{1\text{ном.л}}$ , А	2899
6. Номинальный вторичный ток $I_{2\text{ном.л}}$ , А	59420
7. Группа соединения обмоток трансформатора	YΔ/Δ-0
8. Диапазон изменения вторичного напряжения $U_{2л}$ , В	1119-1683
9. Количество ступеней РПН трансформатора	16
10. Номинальная мощность реактора $Q_{\text{ном}}$ , МВАр	35,3
11. Номинальное напряжение реактора $U_{р.ном}$ , В	34500
12. Номинальный ток реактора $I_{р.ном}$ , А	2899
13. Количество ступеней РПН реактора	12

При проектировании и эксплуатации таких энергоёмких объектов наиболее актуальными являются две проблемы:

- обеспечение условий максимального и наиболее эффективного использования электрической энергии во всех технологических режимах ДСП без снижения производительности;

- обеспечение требований электромагнитной совместимости ДСП с питающей системой электроснабжения.

В значительной степени решение этих проблем обеспечивается за счет рационального выбора силовых элементов СТК и настройки систем управления электрическим режимом дуговой печи [59, 60].



Основной функцией СТК является компенсация реактивной мощности нагрузки [61, 62]. Как уже отмечалось выше, ДСП – это нелинейная, резкопеременная нагрузка, которая является источником высших гармоник. Поэтому к функциям компенсации реактивной мощности добавляются требования фильтрации высших гармоник.

Таким образом, на ЗАО «ММК Metalurji» в комплексе с ДСП-250 установлен статический тиристорный компенсатор 330 МВАр. Данный СТК включает в себя тиристорно-реакторную группу и фильтрокомпенсирующие цепи - фильтры 2-ой, 3-ей, 4-ой, 5-ой и 6-ой гармоник. ТРГ и фильтры 2-ой и 3-ей гармоник присоединены к распределительному устройству 34,5 кВ через общий элегазовый выключатель. Также общий выключатель имеют фильтры 4-ой и 5-ой гармоник. Установленная мощность ТРГ и ФКЦ составляет 330 МВАр. Полупроводниковые тиристорные ключи и реакторы соединены по схеме «треугольник». Упрощённая схема электроснабжения комплекса «ДСП-СТК» приведена на Рисунке 3.1.

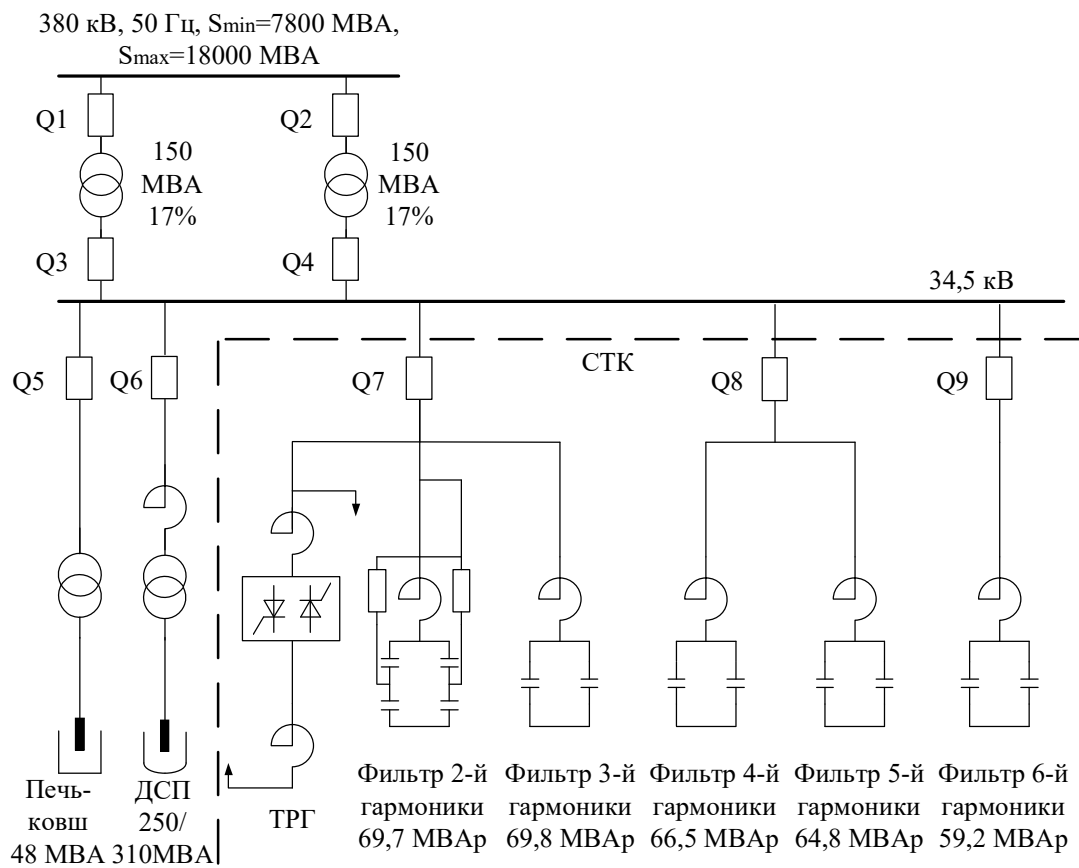


Рисунок 3.1 – Упрощенная однолинейная схема СТК 330 МВАр

Основные технические данные СТК 330 МВАр представлены в Таблице 3.2

Таблица 3.2 – Основные технические данные СТК 330 МВАр

Наименование параметров	Значение параметра
Номинальное линейное напряжение $U_{л.ном}$ , кВ	34,5
Номинальное значение генерируемой реактивной мощности компенсатора, МВАр	330
Номинальное значение потребляемой реактивной мощности компенсатора, МВАр	330
Относительная частота настройки фильтра 2-ой гармоники $n_{\phi 2}$ , о.е.	1,95
Относительная частота настройки фильтра 3-ей гармоники $n_{\phi 3}$ , о.е.	2,95
Относительная частота настройки фильтра 4-ой гармоники $n_{\phi 4}$ , о.е.	3,9
Относительная частота настройки фильтра 5-ой гармоники $n_{\phi 5}$ , о.е.	4,9
Относительная частота настройки фильтра 5-ой гармоники $n_{\phi 6}$ , о.е.	5,9
Номинальный фазный ток фильтра 2-ой гармоники $I_{\phi 2ном}$ , А	1166,4
Номинальный фазный ток фильтра 3-ей гармоники $I_{\phi 3ном}$ , А	1168
Номинальный фазный ток фильтра 4-ой гармоники $I_{\phi 4ном}$ , А	1113
Номинальный фазный ток фильтра 5-ой гармоники $I_{\phi 5ном}$ , А	1084
Номинальный фазный ток фильтра 6-ой гармоники $I_{\phi 6ном}$ , А	991
Мощность, генерируемая фильтром 2-ой гармоники $Q_{\phi 2ном}$ , МВАр	69,7
Мощность, генерируемая фильтром 3-ой гармоники $Q_{\phi 3ном}$ , МВАр	69,8
Мощность, генерируемая фильтром 4-ой гармоники $Q_{\phi 4ном}$ , МВАр	66,5
Мощность, генерируемая фильтром 5-ой гармоники $Q_{\phi 5ном}$ , МВАр	64,8
Мощность, генерируемая фильтром 6-ой гармоники $Q_{\phi 6ном}$ , МВАр	59,2
Добротность широкополосного фильтра 2-ой гармонки $Q_{F2}$	15
Добротность фильтра 3-ей гармонки на частоте настройки $Q_{F3}$	80
Добротность фильтра 4-ей гармонки на частоте настройки $Q_{F4}$	80
Добротность фильтра 5-ей гармонки на частоте настройки $Q_{F5}$	80
Добротность фильтра 6-ей гармонки на частоте настройки $Q_{F6}$	80
Индуктивность ТРГ на основной частоте $Q_{TCR(одна\ фаза)}$ , мГн	27,6
Удельные потери в конденсаторных батареях $\Delta P_C^*$ , Вт/кВар	0,2

Для дальнейших исследований, связанных с анализом процессов протекающих при провалах напряжения и особенностями функционирования электротехнического комплекса «ДСП-СТК» был принят метод имитационного моделирования [63, 64]. С учетом параметров силового оборудования, приведенных выше, в программном пакете Matlab была реализована модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК» ЗАО «ММК Metalurji» (Рисунок 3.2). Остановимся на каждой части модели подробнее в следующих параграфах.

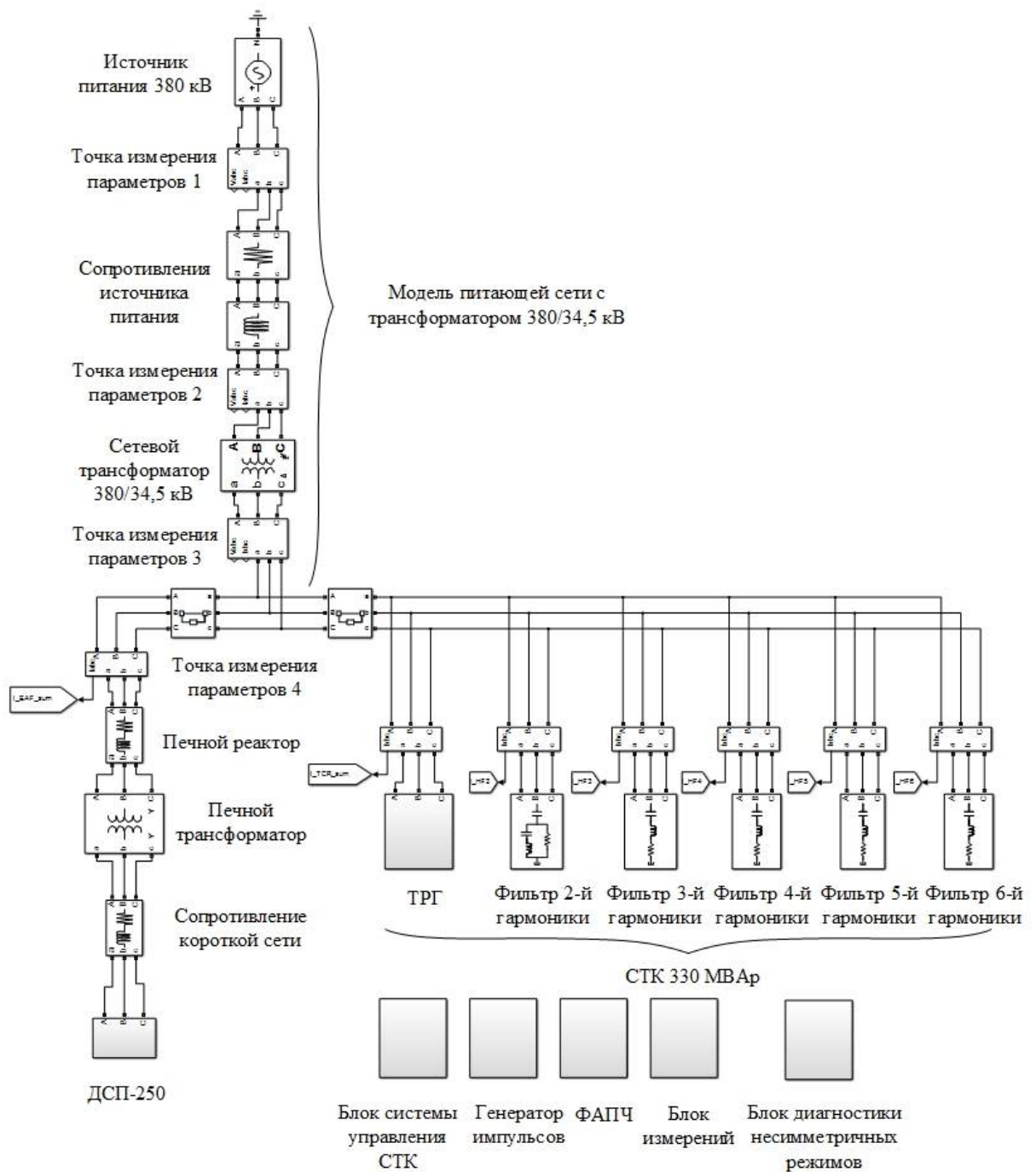


Рисунок 3.2 – Имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК»

### 3.1.1. Имитационная модель электрической дуги ДСП-250

При создании комплексной модели ДСП наиболее трудоемким процессом является моделирование самой электрической дуги, поскольку она должна с одной стороны достаточно точно и адекватно отражать реальные физические процессы, а с другой – быть легко реализуемой и гибкой при проведении исследований [65].

Существует несколько способов моделирования электрической дуги:

- представление дуги переменным активным сопротивлением [66, 67];
- представление напряжения дуги за время ее горения постоянным значением  $E_d = const$  (противо-ЭДС);
- моделирование на основе нелинейного дифференциального уравнения Касси, которое содержит в себе три основных параметра дугового разряда, а именно: мгновенное напряжение на дуге  $u_d(t)$ , противо-ЭДС дуги  $E_d$  и мгновенную проводимость дуги  $g_d(t)$  [68-70].

Каждый из приведенных выше способов имеет свои достоинства и недостатки. Так, например, представление дуги переменным активным сопротивлением является наиболее простым вариантом моделирования, но при этом он не дает возможности учитывать нелинейные свойства дуги и высшие гармонические составляющие тока, поэтому данный метод подходит для грубых расчетов, допускающих наличие больших погрешностей.

Моделирование на основе нелинейного дифференциального уравнения Касси является наиболее точным, хоть и трудоемким способом. В данном случае модель дуги учитывает не только ее нелинейный характер и несимметрию токов, но и условия горения на разных стадиях плавки за счёт тепловой постоянной времени дуги:

$$\theta_d \frac{dg(t)}{dt} = \left( \frac{u_d^2(t)}{E_d^2} - 1 \right) g(t), \quad (3.1)$$

где:  $g = i_d/u_d$  - мгновенная проводимость дуги, См;

$\theta_d$  - тепловая постоянная времени дуги, для разных стадий плавки изменяется в пределах от 0,1 до 5 мс.

В рамках настоящей работы использовался метод представления электрической дуги против-ЭДС, предложенный профессором С.И. Тельным [71]. Данный метод не рассматривает тепловую постоянную времени дуги, но при этом позволяет учитывать ее «вентильный» эффект и несимметрию токов по фазам. Помимо этого он позволяет использовать готовые имитационные блоки, встроенные в библиотеку SimPowerSystem приложения Simulink математического пакета Matlab.

Против-ЭДС дуги  $E_d$  обычно представляют в виде суммы двух составляющих:

$$E_d = U_{ak} + \beta \cdot L_d, \quad (3.2)$$

где:  $U_{ak}$  - падение напряжения в приэлектродных областях (для дуговых печей переменного тока  $U_{ak} = 20 \div 40$  В);  $\beta$  - градиент напряжения дуги, в зависимости от стадии плавки  $\beta = 1 \div 8$  В/мм;  $L_d$  - длина столба дуги, мм.

Схема замещения дуги для данного способа представлена на Рисунке 3.3:

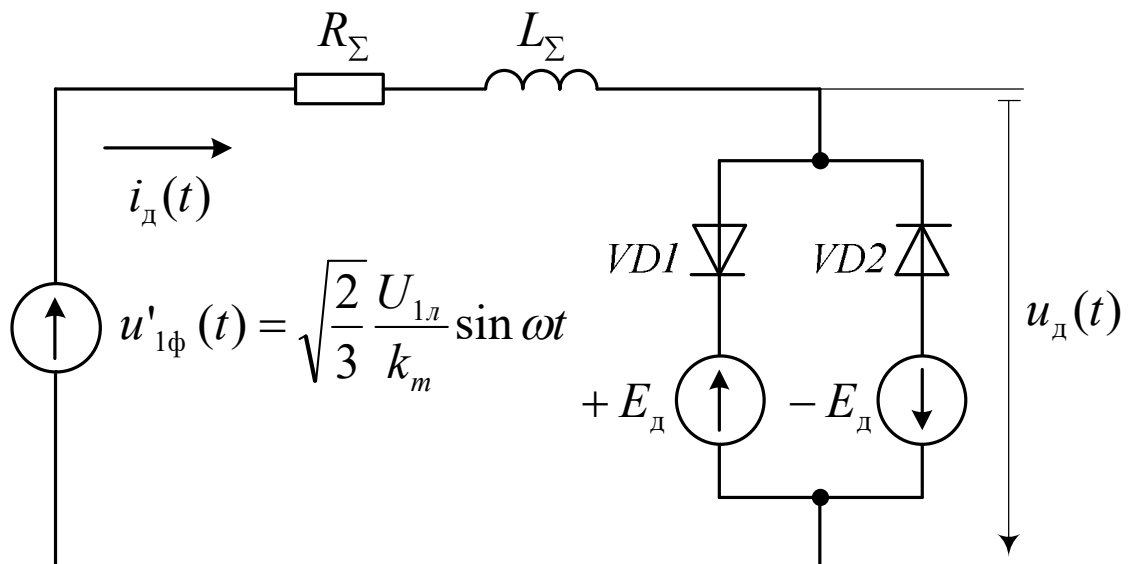


Рисунок 3.3 – Схема замещения дуги, представленной в виде против-ЭДС по способу С.И. Тельного

В схеме замещения (Рисунок 3.3):

$$R_{\Sigma} = R_p + R_{mp} + R_{kc}, \quad (3.3)$$

$$L_{\Sigma} = L_p + L_{mp} + L_{kc}, \quad (3.4)$$

где:  $R_p, R_{mp}, R_{kc}, L_p, L_{mp}, L_{kc}$  - активные сопротивления и индуктивности печного реактора, трансформатора и короткой сети.

Имитационная модель электрической дуги с противо-ЭДС представлена на рисунке 3.4:

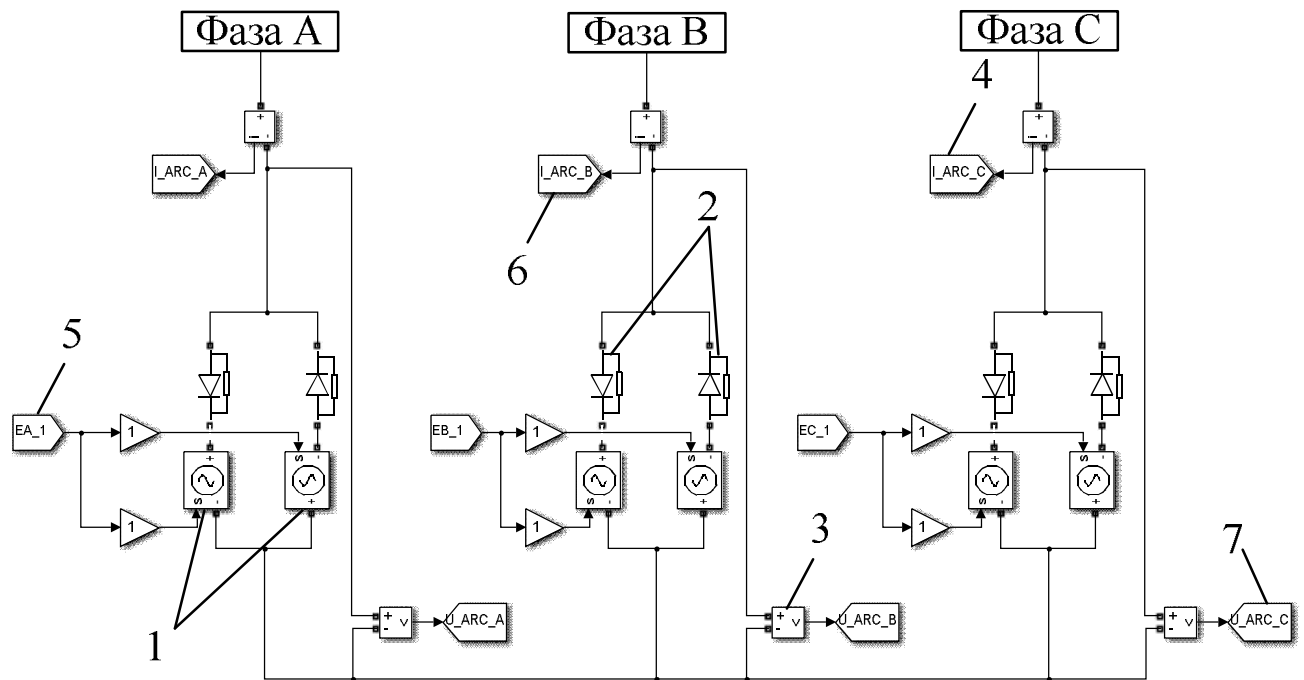


Рисунок 3.4 – Имитационная модель электрической дуги с противо-ЭДС: 1 – управляемые источники напряжения (Controlled voltage source); 2 – модель диода (блок Diode); 3 – измеритель напряжения дуги (Voltage Measurement); 4 - измеритель тока дуги (Current Measurement); 5- падение напряжения на дуге – ЭДС дуги; 6, 7 – блоки для отправки сигналов тока и напряжения дуги в другие элементы имитационной модели (блок Goto)

Таким образом, для задач исследования демпфирования провалов напряжения с использованием СТК при параллельно работающей ДСП упрощенное моделирование электрической дуги является приемлемым и оправданным, поскольку позволяет повысить скорость расчета сложной комплексной математической модели. Следующим этапом моделирования следует разработка модели электрического контура ДСП-250.

### 3.1.2. Имитационная модель электрического контура ДСП-250

В упрощенном виде электрический контур ДСП-250 включает в себя сопротивление обмоток реактора, сопротивление обмоток трансформатора и сопротивление короткой сети. Рассмотрим полную схему замещения всего контура, произведем расчет её параметров и построим имитационную модель.

Схема замещения электрического контура ДСП-250 представлена на рисунке 3.5.

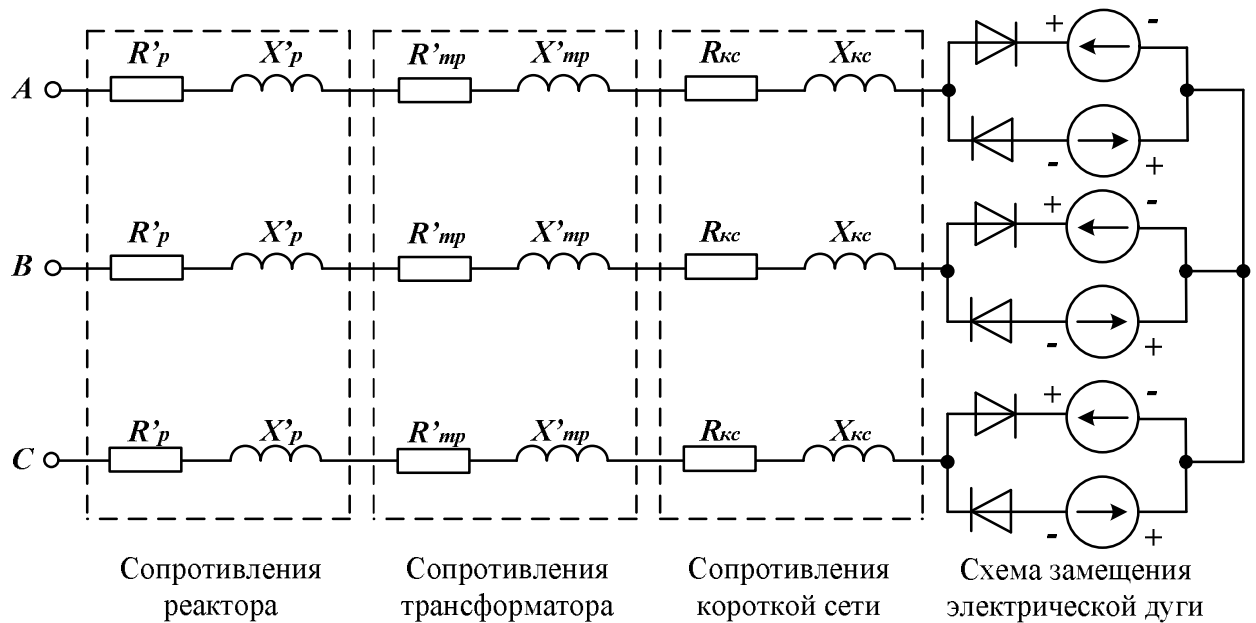


Рисунок 3.5 – Схема замещения электрического контура ДСП-250

В данной схеме:

$X'_{mp}$ ,  $R'_{mp}$  – приведенные к вторичной стороне сопротивления трансформатора, Ом;

$X'_p$ ,  $R'_p$  – приведенные к вторичной стороне сопротивления реактора, Ом;

$X_{kc}$ ,  $R_{kc}$  – сопротивления короткой сети, Ом.

Произведем расчет параметров модели электрического контура печи.

Приведенные сопротивления трансформатора:

- активное:

$$R'_{mp} = \frac{P_{кз\_i} \cdot U_{34,5}^2}{S_{н\_i}^2} \text{ мОм}, \quad (3.5)$$

- реактивное:

$$X'_{mp} = \frac{U_{к\_i} \cdot U_{34,5}^2 \cdot 10}{S_{н\_i}} \text{ мОм}, \quad (3.6)$$

где:  $P_{кз\_i}$  – потери короткого замыкания трансформатора для  $i$ -той ступени, кВт;

$U_{34,5}$  – линейное напряжение на вторичной стороне трансформатора 155 МВА, кВ;

$S_{н\_i}$  – номинальная мощность трансформатора для  $i$ -той ступени, МВА;

$U_{к\_i}$  – напряжение короткого замыкания для  $i$ -той ступени, %.

Приведенное реактивное сопротивление реактора:

$$X'_p = \frac{\Delta U_i \cdot 10^3}{I_n} \text{ Ом}, \quad (3.7)$$

где:  $\Delta U_i$  – фактические падения напряжения на реакторе для  $i$ -той ступени, кВ;

$I_n$  – номинальный ток реактора, А;

Сопротивление короткой сети:  $X_{кс} = 4,25 \text{ мОм}$ ,  $R_{кс} = 0,27 \text{ мОм}$ .

Результаты расчётов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Сопротивления трансформатора и реактора для разных ступеней

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



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°
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				

Питающая сеть в представленной модели выполнена из трехфазного программируемого источника напряжения 380 кВ (*Three-phase programmable voltage source*), блока сопротивлений питающей сети 380 кВ (*Three-phase series RLC branch*), блока трансформатора 155 МВА (*Three-phase transformer*), блока сопротивлений сети 34,5 кВ (*Three-phase series RLC branch*) и блоков измерений токов и напряжений (*Three-phase VI measurement*).

Мощность короткого замыкания питающей сети 380 кВ:

- для минимального режима:

$$S_{кз.min\_380} = 7800 \text{ МВА};$$

- для максимального режима:

$$S_{кз.max\_380} = 18000 \text{ МВА}.$$

Сопротивление питающей сети 380 кВ рассчитаем как:

$$X_{сетu\_380} = \frac{U_{сетu\_380}^2}{(S_{кз.min\_380} + S_{кз.max\_380})/2}; \quad (3.8)$$

$$R_{сети\_380} = 0,1 \cdot \frac{U_{сети\_380}^2}{(S_{кз.min\_380} + S_{кз.max\_380})/2}. \quad (3.9)$$

После подстановки всех значений в 3.8 и 3.9 получим, что:

$$X_{сети\_380} = 11,193 \text{ Ом}, R_{сети\_380} = 1,119 \text{ Ом}.$$

Мощность короткого замыкания в сети 34,5 кВ равна:

- для минимального режима:

$$S_{кз.min\_34,5} = 1556,051 \text{ МВА};$$

- для максимального режима:

$$S_{кз.max\_34,5} = 1358,168 \text{ МВА}.$$

В зависимости от режима системы сопротивление может варьироваться.

Для модели примем одно промежуточное значение  $S_{кз\_34,5} = 1525 \text{ МВА}$ .

Сопротивление питающей сети 34,5 кВ рассчитаем как:

$$X_{сети\_34,5} = \frac{U_{34,5}^2}{S_{кз\_34,5}}; \quad (3.10)$$

$$R_{сети\_34,5} = 0,1 \cdot \frac{U_{34,5}^2}{S_{кз\_34,5}}. \quad (3.11)$$

После подстановки всех значений в 3.10 и 3.11 получим, что:

$$X_{сети\_34,5} = 0,78 \text{ Ом}, R_{сети\_34,5} = 0,078 \text{ Ом}.$$

Таким образом, в результате всех расчетов была получена имитационная модель электрического контура ДСП-250, позволяющая моделировать однофазные и трехфазные провалы напряжения и выполнять при этом замеры электрических параметров в различных точках системы при включенном и отключенном СТК и с работающей и неработающей электродуговой печью. Следующим шагом идет разработка имитационной модели СТК 330 МВАр.

Имитационная модель электрического контура ДСП-250 функционирующей на предприятии ЗАО «ММК Metalurji» представлена на Рисунке 3.6.

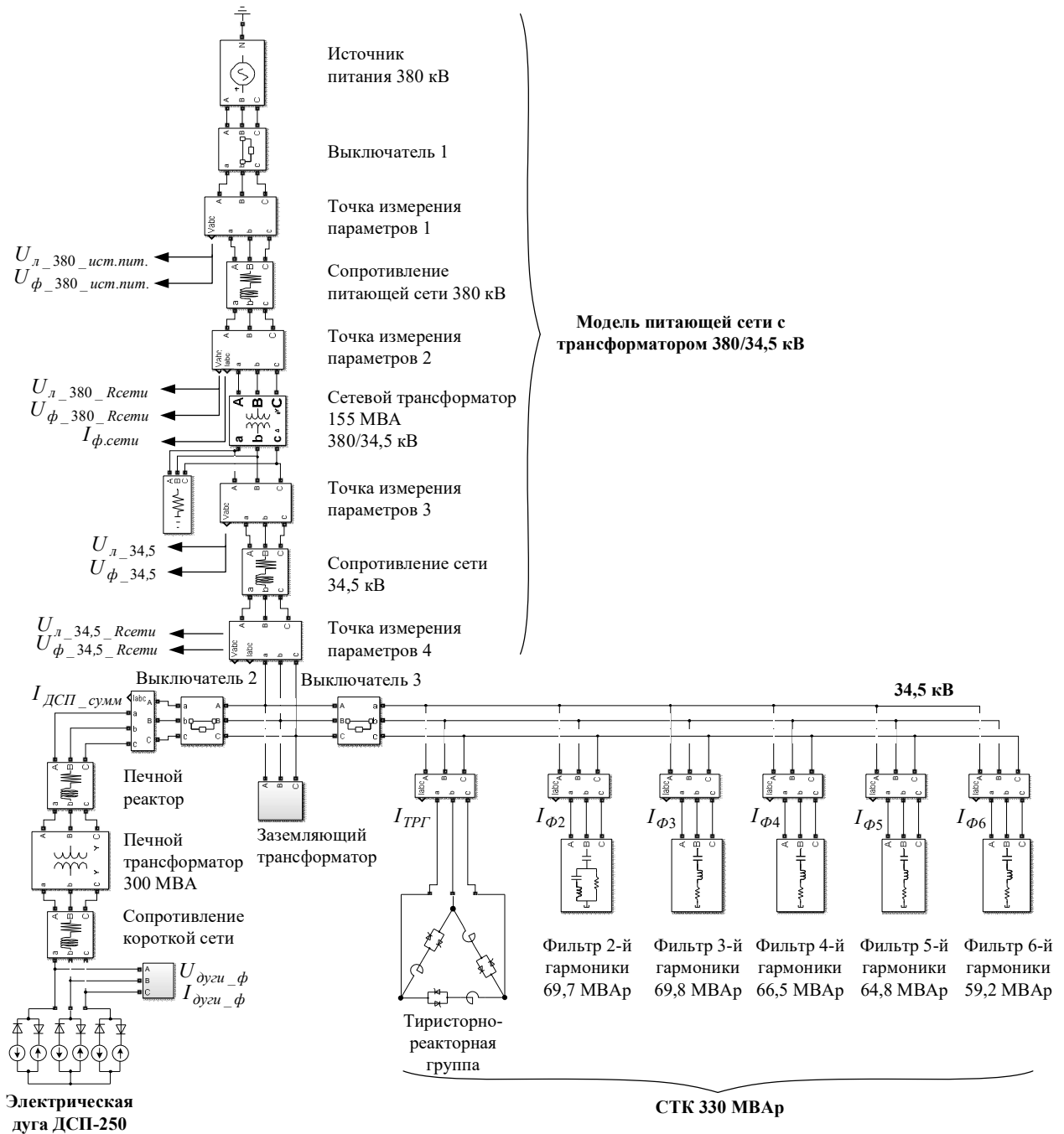


Рисунок 3.6 – Имитационная модель электрического контура ДСП-250

### 3.1.3. Имитационная модель СТК 330 МВАр

Для моделирования **фильтрокомпенсирующих цепей** [72] были использованы готовые блоки трехфазных фильтров гармонических составляющих, располагающихся в библиотеке *SimPowerSystems*.

В состав СТК-330 входят 5 фильтров: 2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й гармоник. Фильтр 2-й гармоники является широкополосным фильтром С-типа. Схема его замещения представлена на Рисунке 3.7.

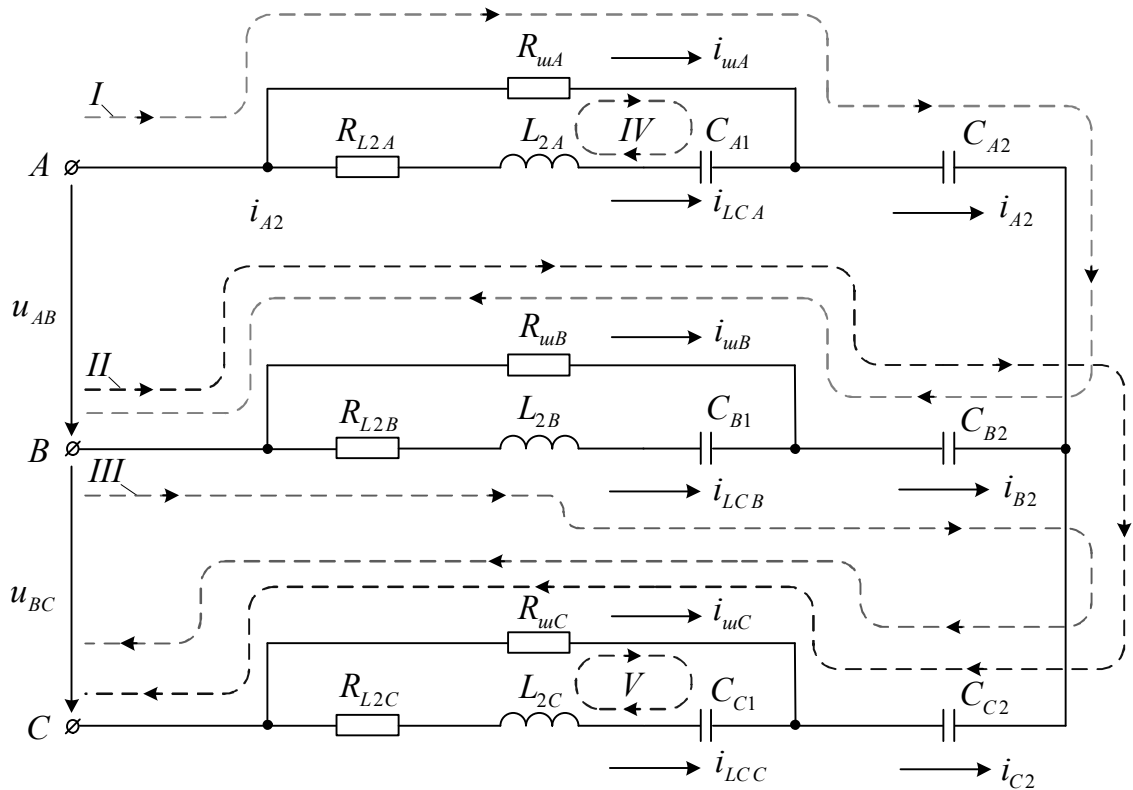


Рисунок 3.7 – Схема замещения широкополосного фильтра второй гармоники

В силовой схеме данного фильтра присутствует демпфирующий резистор. Он предназначен для снижения эффекта параллельных резонансных токов. В качестве фильтра 2-й гармоники при моделировании был использован блок *Three-phase harmonic filter* с типом фильтра *C-type high-pass*.

Технические данные резонансного фильтра 2-ой гармоники приведены в Таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические данные резонансного фильтра 2-ой гармоники

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное значение генерируемой фильтром реактивной мощности (при $U_{л.ном} = 34,5$ кВ) $Q_{\Phi 2ном}$ , МВАр	69,7
2. Относительная частота настройки фильтра $n_{\Phi 2}$ , о.е.	1,95
3. Индуктивность катушки реактора $L_2$ , мГн	19,40
4. Емкость основной конденсаторной батареи $C_1$ , мкФ	522,5
5. Емкость вспомогательной конденсаторной батареи $C_2$ , мкФ	186,4
6. Эквивалентное активное сопротивление демпфирующих резисторов $R_{u}$ , Ом	131,4

Узкополосные фильтры 3-ей, 4-ой, 5-й и 6-й гармоник являются узкополосными фильтрами. Они необходимы для фильтрации гармоник строго определенной частоты. Схема замещения фильтров такого типа представлена на Рисунке 3.8.

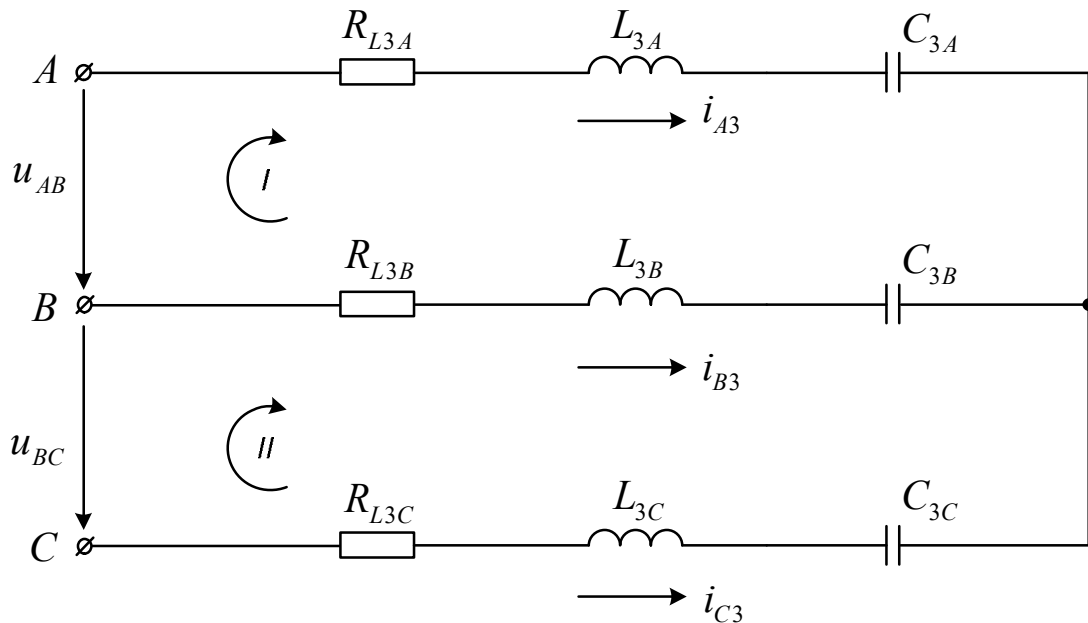


Рисунок 3.8 – Схема замещения узкополосных фильтров 3-ей, 4-ой, 5-й и 6-й гармоник

Данные фильтры настроены таким образом, что их частота ниже кратных значений гармоник той или иной частоты. Таким образом, удается снизить вероятность попадания кратных гармонических составляющих тока в области усиления гармоник. Технические данные резонансного фильтров 3, 4, 5, 6-й гармоник приведены в Таблицах 3.5 - 3.8.

Таблица 3.5 – Технические данные резонансного фильтра 3-ей гармоники

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное значение генерируемой фильтром реактивной мощности (при $U_{л.ном} = 35$ кВ) $Q_{Ф3ном}$ , МВАр	69,8
2. Относительная частота настройки фильтра $n_{Ф3}$ , о.е.	2,95
3. Номинальный фазный ток фильтра $I_{Ф3ном}$ , А	1168
4. Индуктивность катушки реактора $L_3$ , мГн	7,05
5. Емкость конденсаторной батареи $C_3$ , мкФ	165,2

Таблица 3.6 – Технические данные резонансного фильтра 4-ой гармоники

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное значение генерируемой фильтром реактивной мощности (при $U_{л.ном} = 35$ кВ) $Q_{\phi 4ном}$ , МВАр	66,5
2. Относительная частота настройки фильтра $n_{\phi 4}$ , о.е.	3,9
3. Номинальный фазный ток фильтра $I_{\phi 4ном}$ , А	1113
4. Индуктивность катушки реактора $L_4$ , мГн	4,009
5. Емкость конденсаторной батареи $C_4$ , мкФ	166,1

Таблица 3.7 – Технические данные резонансного фильтра 5-ой гармоники

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное значение генерируемой фильтром реактивной мощности (при $U_{л.ном} = 35$ кВ) $Q_{\phi 4ном}$ , МВАр	64,8
2. Относительная частота настройки фильтра $n_{\phi 4}$ , о.е.	4,9
3. Номинальный фазный ток фильтра $I_{\phi 4ном}$ , А	1084
4. Индуктивность катушки реактора $L_4$ , мГн	2,54
5. Емкость конденсаторной батареи $C_4$ , мкФ	166,1

Таблица 3.8 – Технические данные резонансного фильтра 6-ой гармоники

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное значение генерируемой фильтром реактивной мощности (при $U_{л.ном} = 35$ кВ) $Q_{\phi 4ном}$ , МВАр	59,2
2. Относительная частота настройки фильтра $n_{\phi 4}$ , о.е.	5,9
3. Номинальный фазный ток фильтра $I_{\phi 4ном}$ , А	991
4. Индуктивность катушки реактора $L_4$ , мГн	1,89
5. Емкость конденсаторной батареи $C_4$ , мкФ	153,8

На Рисунке 3.9 показана уточненная модель ФКЦ, созданная для получения результирующей частотной характеристики и сопротивления питающей сети относительно шины 34,5 кВ. Сама частотная характеристика и сопротивление сети представлены на Рисунке 3.10. Здесь на графике показаны области, в которых происходит фильтрация высших гармоник, а также межрезонансные области, с усилением высших гармоник.

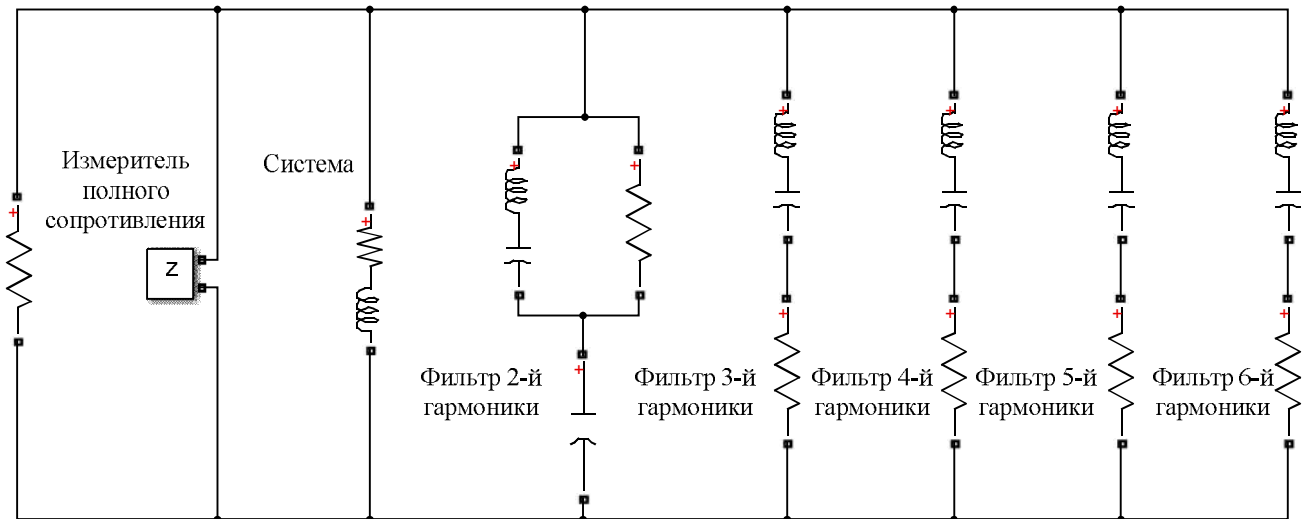


Рисунок 3.9 – Имитационная модель ФКЦ для снятия частотных характеристик

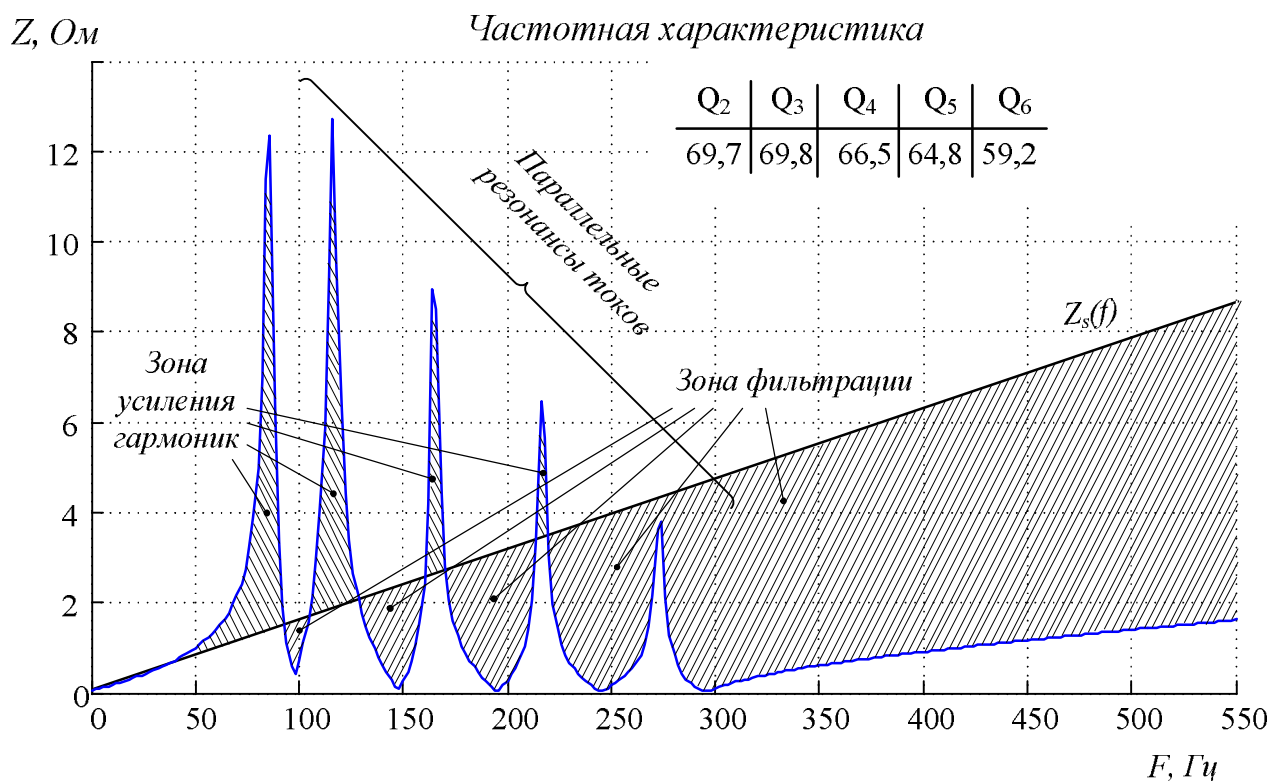


Рисунок 3.10 – Частотные характеристики группы фильтров и сопротивления питающей сети ( $S_{кз} = 1525 \text{ МВА}$ ) относительно шины 34,5 кВ

Далее рассмотрим модель **тиристорно-реакторной группы** [72].

Тиристорно-реакторная группа включает в себя встречно-параллельно включенные тиристоры, соединенные последовательно с печным реактором. Из-за большой величины рабочих токов реакторы ТРГ соединены по схеме «треугольник». Схема замещения представлена на Рисунке 3.11.

При моделировании ТРГ в математическом пакете Matlab были использованы блоки тиристоров с возможностью подачи на них отпирающих импульсов от системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и встроенными снабберными цепочками (блоки *Thyristor*).

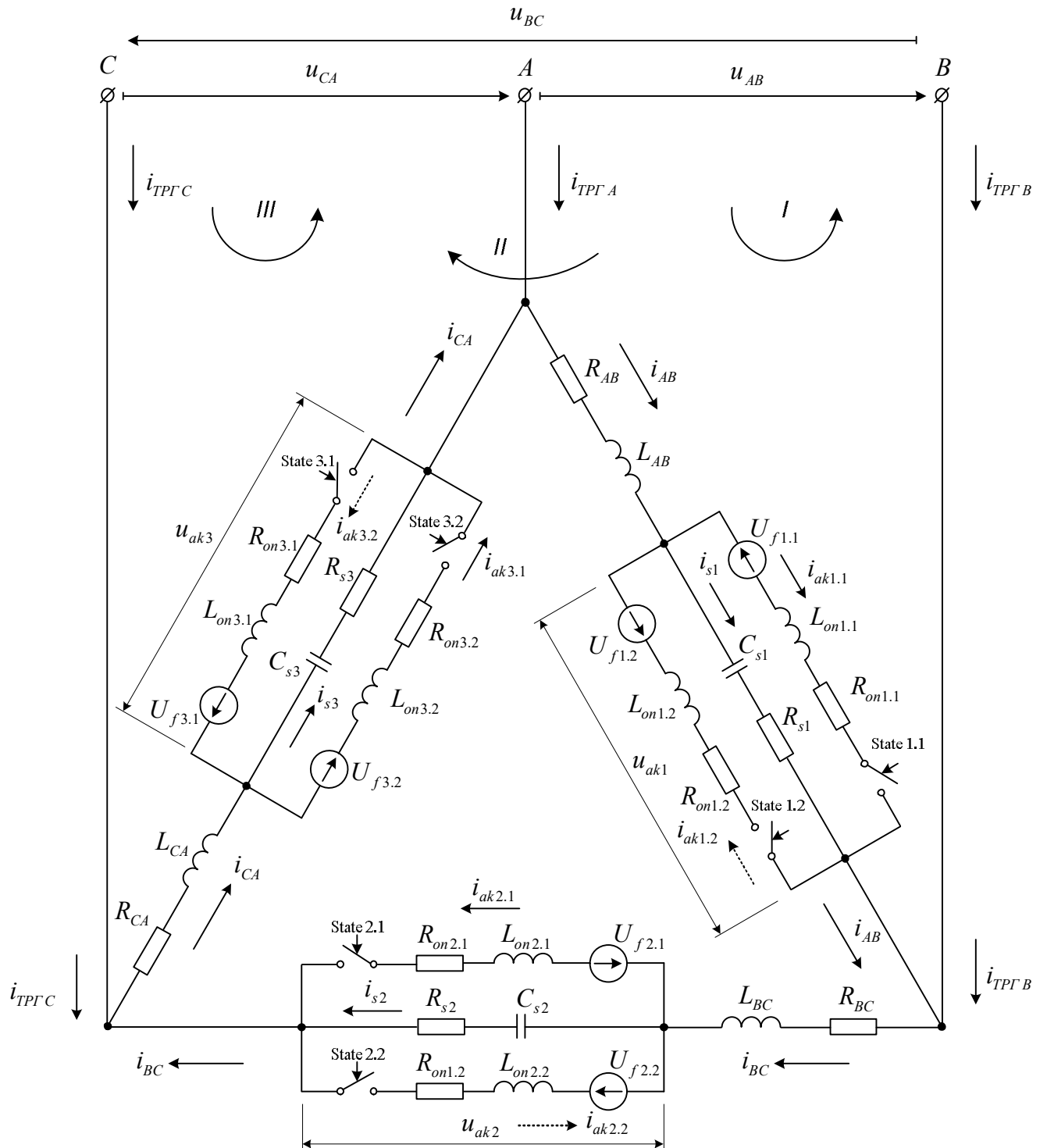


Рисунок 3.11 – Схема замещения тиристорно-реакторной группы

Технические данные ТРГ приведены в Таблице 3.9.



Таблица 3.9 – Технические данные тиристорно-реакторной группы

Наименование параметра	Значение параметра
1. Номинальное значение потребляемой ТРГ реактивной мощности $Q_{ТРГ\ ном}$ , МВАр	330
2. Максимальная величина реактивной мощности ТРГ в режиме форсировки ( $\alpha = 90^\circ$ ) $Q_{ТРГ\ max}$ , МВАр	377
3. Номинальный ток фазы ТРГ $I_{ф.ТРГ\ ном}$ , А	5522
4. Индуктивность катушки ТРГ $L_{ТРГ}$ , мГн	27,6

Схема, отражающая логику задания состояния тиристоров, представлена на Рисунке 3.12. Открытое или закрытое состояние тиристорных ключей определяется знаком напряжения «анод-катод»  $u_{ak}$ , значением тока  $i_{ak}$ , протекающего через тиристор, а также наличием управляющего импульса  $g$ .

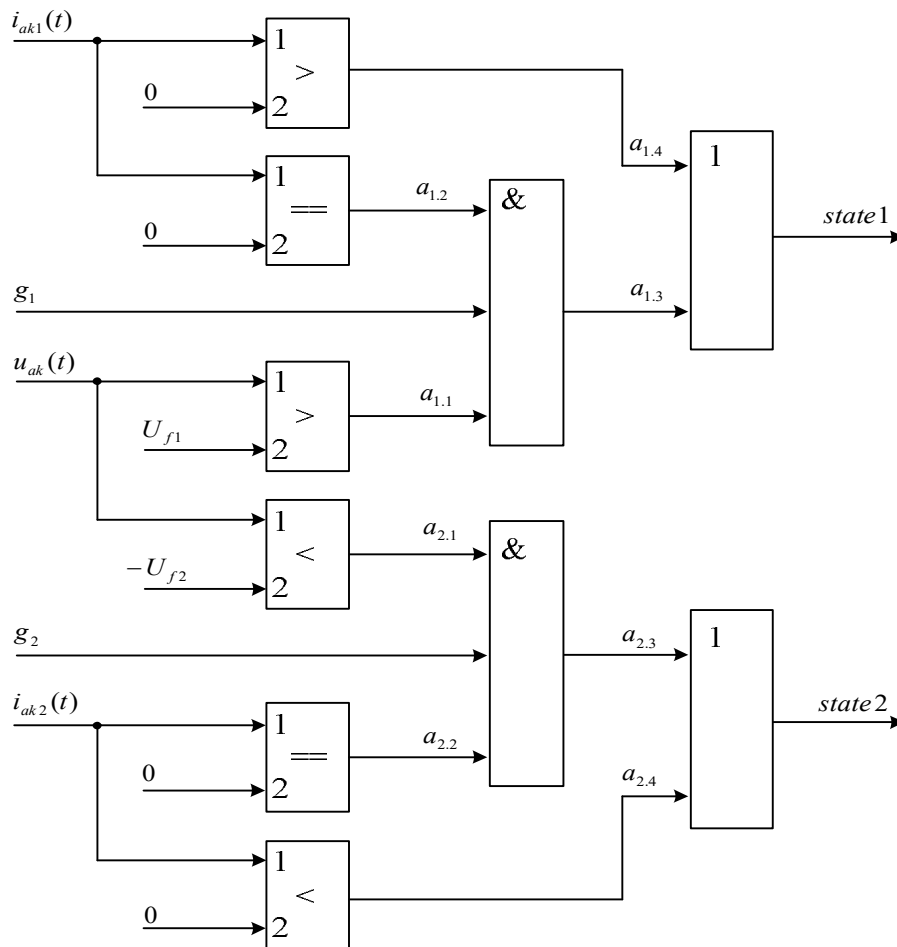


Рисунок 3.12 – Логическая схема определения текущего состояния тиристорного ключа ТРГ

На Рисунке 3.13 приведены временные диаграммы, отражающие работу логической схемы текущего состояния тиристорного ключа ТРГ. На них показано изменение сигналов на выходах логических элементов схемы в функции мгновенных значений токов и напряжения на тиристорном модуле.

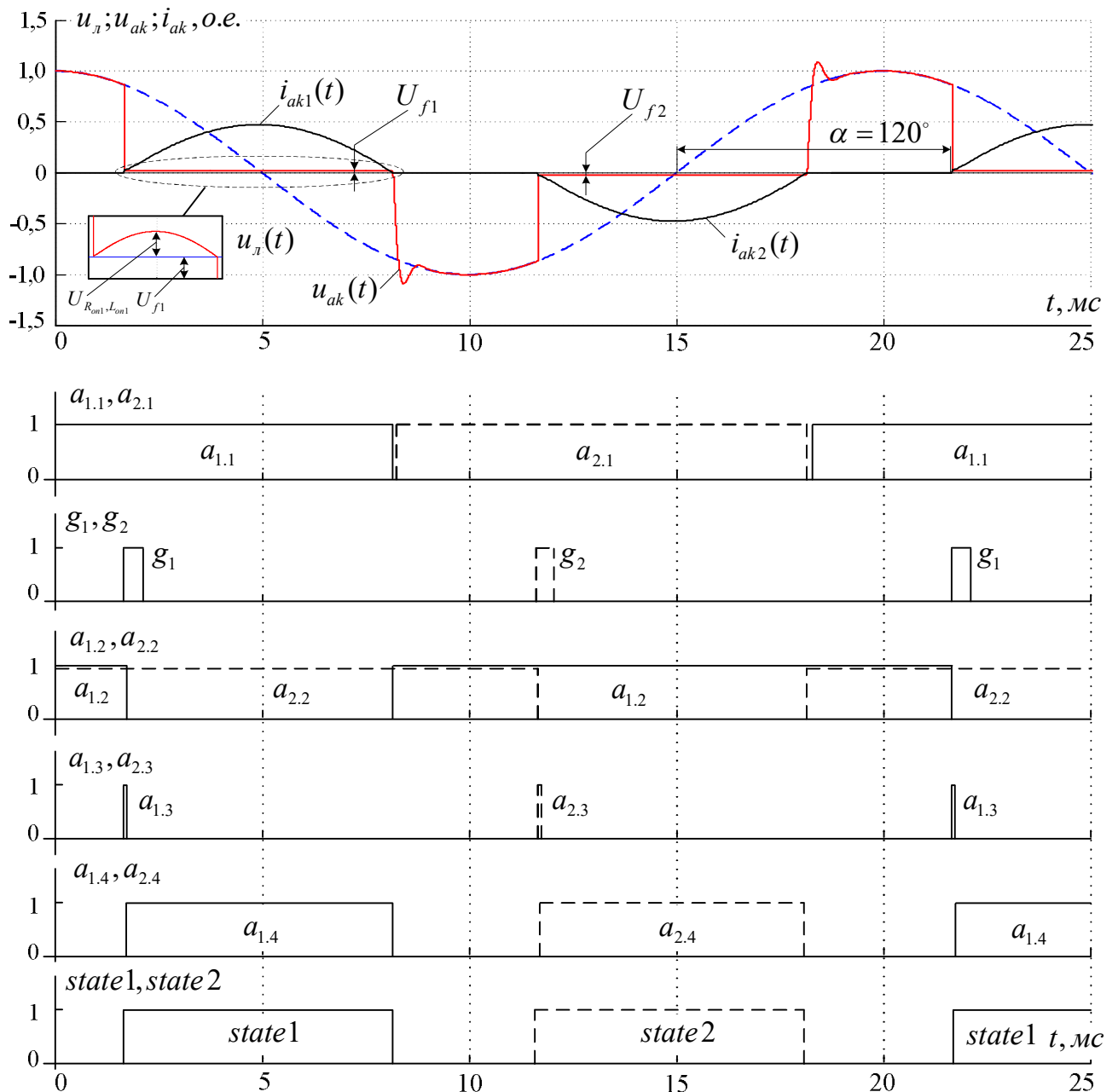


Рисунок 3.13 – Временные диаграммы, иллюстрирующие работу логической схемы определения состояния тиристорного ключа ТРГ

Имитационная модель статического тиристорного компенсатора 330 МВАр, установленного на ГПП металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji», представлена на Рисунке 3.14.

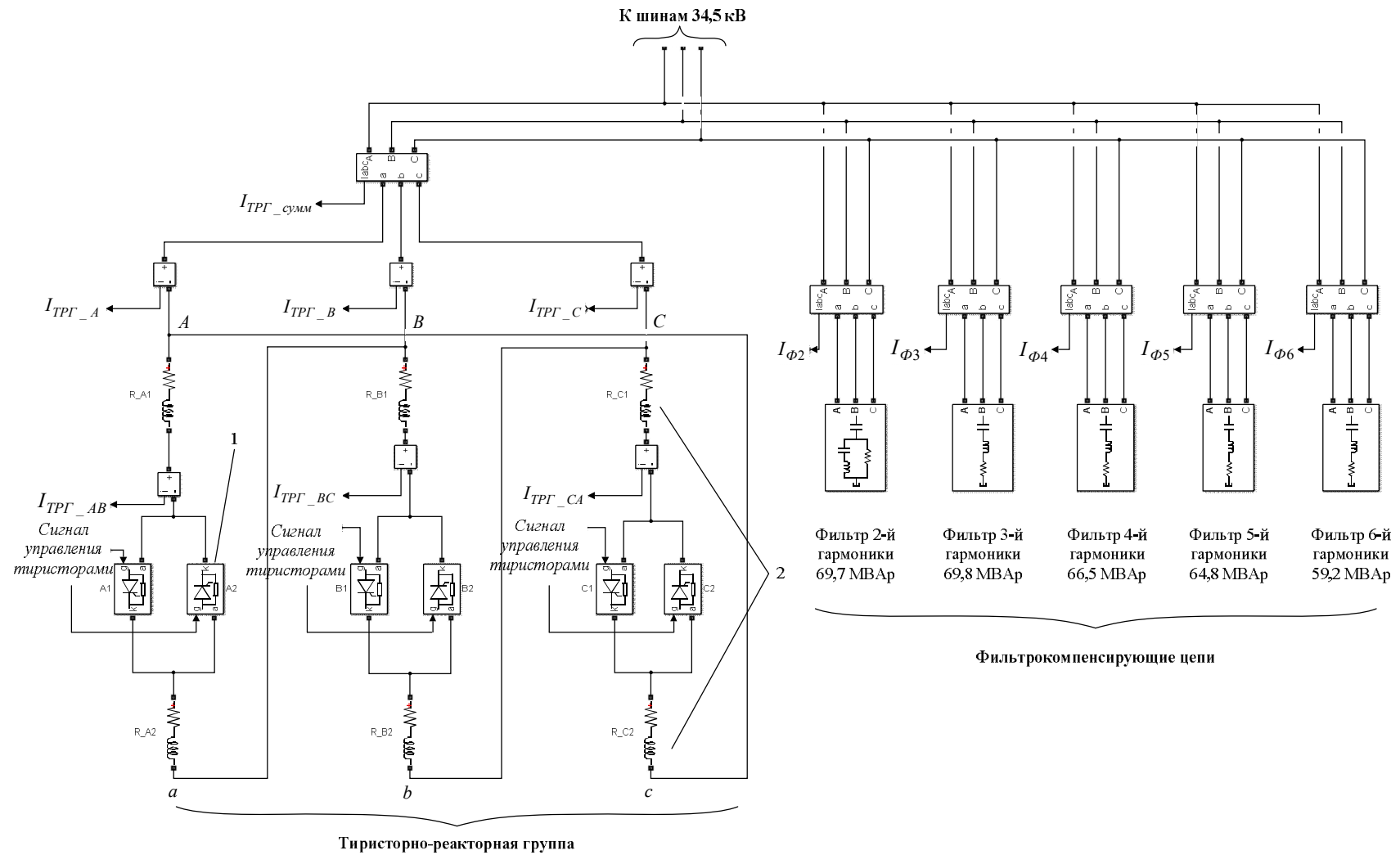


Рисунок 3.14 – Имитационная модель статического тиристорного компенсатора 330 МВАр:

1 - блок тиристорного ключа (Thyristor); 2- блок последовательной RLC – цепи (Series RLC – branch)

### 3.1.4. Математическая модель системы управления электрическим режимом СТК 330 МВАр

Следующим этапом моделирования является исследование существующей системы управления электрическим режимом СТК 330 МВАр. Рассмотрим её функциональную схему (Рисунок 3.15). Существующая система управления электрическим режимом СТК-330 основана на принципе разложения тока нагрузки на прямую и обратную последовательности. Иными словами, функционально схема управления электрическим режимом подразделяется на два канала регулирования – прямой и обратный. В прямом канале рассчитываются ортогональные  $d$ - $q$  составляющие тока нагрузки для прямой и обратной последовательностей во вращающейся системе координат, на основе которых, с помощью преобразования Штейнметца, формируются требуемые значения реактивных проводимостей фаз ТРГ. Данные проводимости, проходя через блоки системы импульсно-фазового управления (СИФУ) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), преобразуются в управляющий сигнал для тиристоров ТРГ [73]. Результатом работы данных блоков является симметрирование токов по фазам и полная компенсация реактивной мощности ДСП. В обратном канале располагается пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) реактивной мощности, который сравнивает значения фактической и реальной величины реактивной мощности и создаёт корректирующий сигнал необходимый для формирования общего задания на реактивную мощность в узле нагрузки. Так же в системе управления находится дополнительный внешний контур, который предназначен для регулирования напряжения. В том случае если напряжение на шинах 34,5 кВ не выходит за пределы допустимых значений, данный контур остаётся неактивным. Когда питающее напряжение превышает допустимое отклонение, то включается обратная связь по напряжению. В результате работы данного регулятора формируются сигналы, задающие углы управления ТРГ. Таким образом, удаётся избежать опасных перенапряжений. Модель системы управления СТК 330 МВАр представлена на Рисунке 3.16.

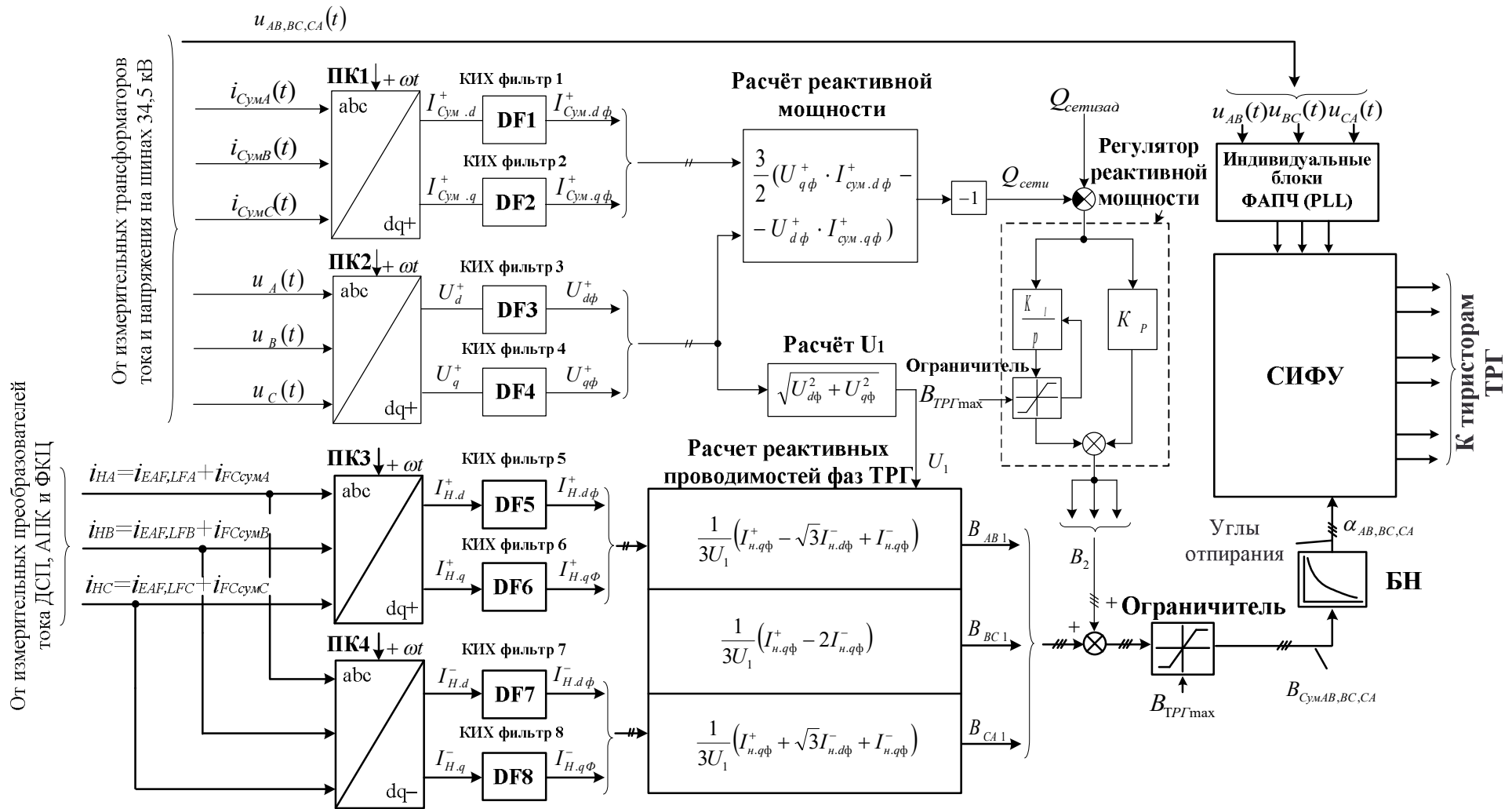


Рисунок 3.15 – Функциональная схема классической системы управления СТК-330 МВАр

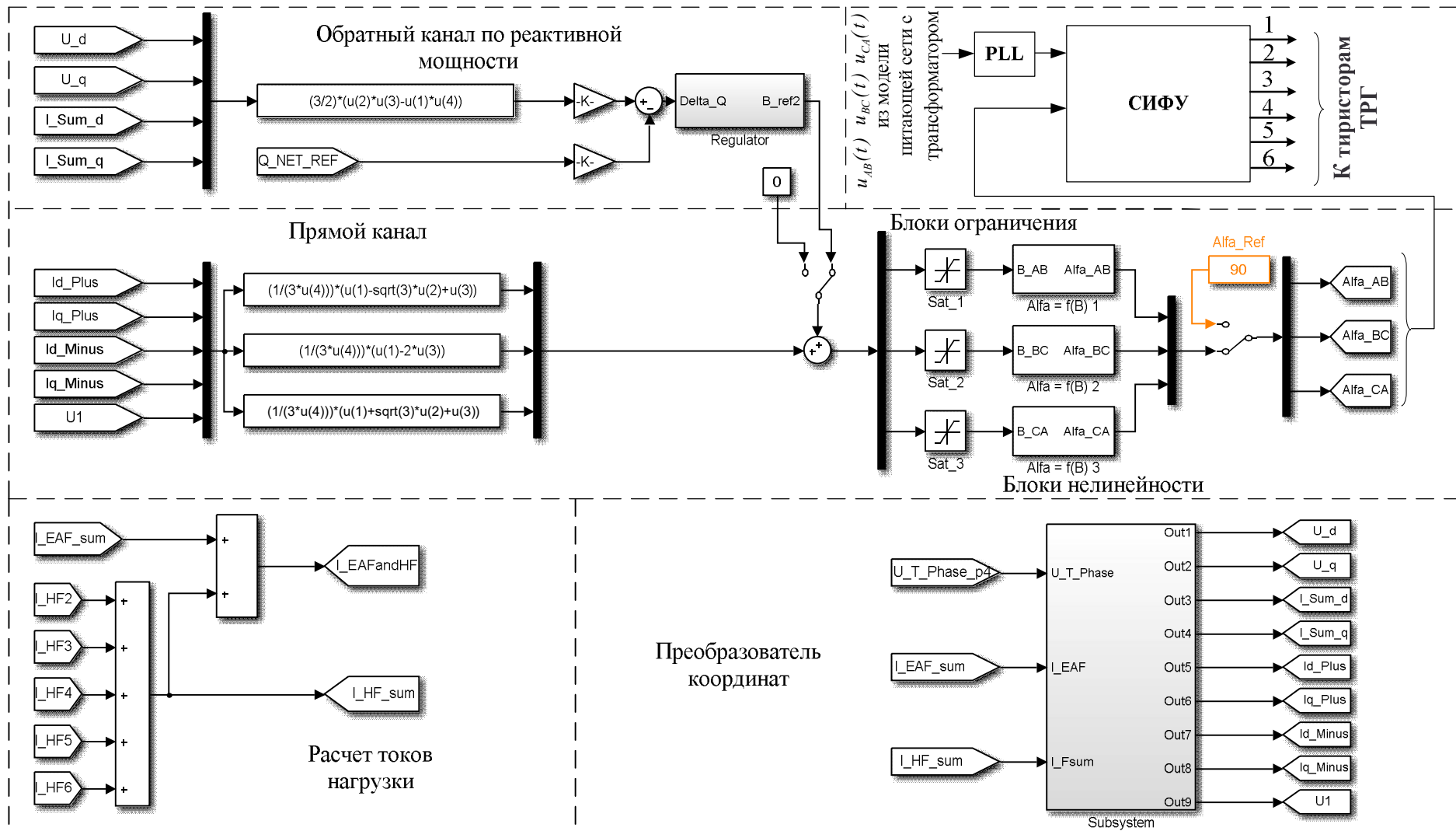


Рисунок 3.16 – Математическая модель классической системы управления СТК-330 МВАр

### 3.1.5. Математическая модель системы управления электрическим режимом ДСП-250

Для дальнейших исследований, направленных на получение статических характеристик ДСП-250 необходимо рассмотреть принцип работы системы управления перемещением электродов HIREG Plus (Danieli, Италия). Функциональная схема данной системы представлена на Рисунке 3.17 [74 - 76].

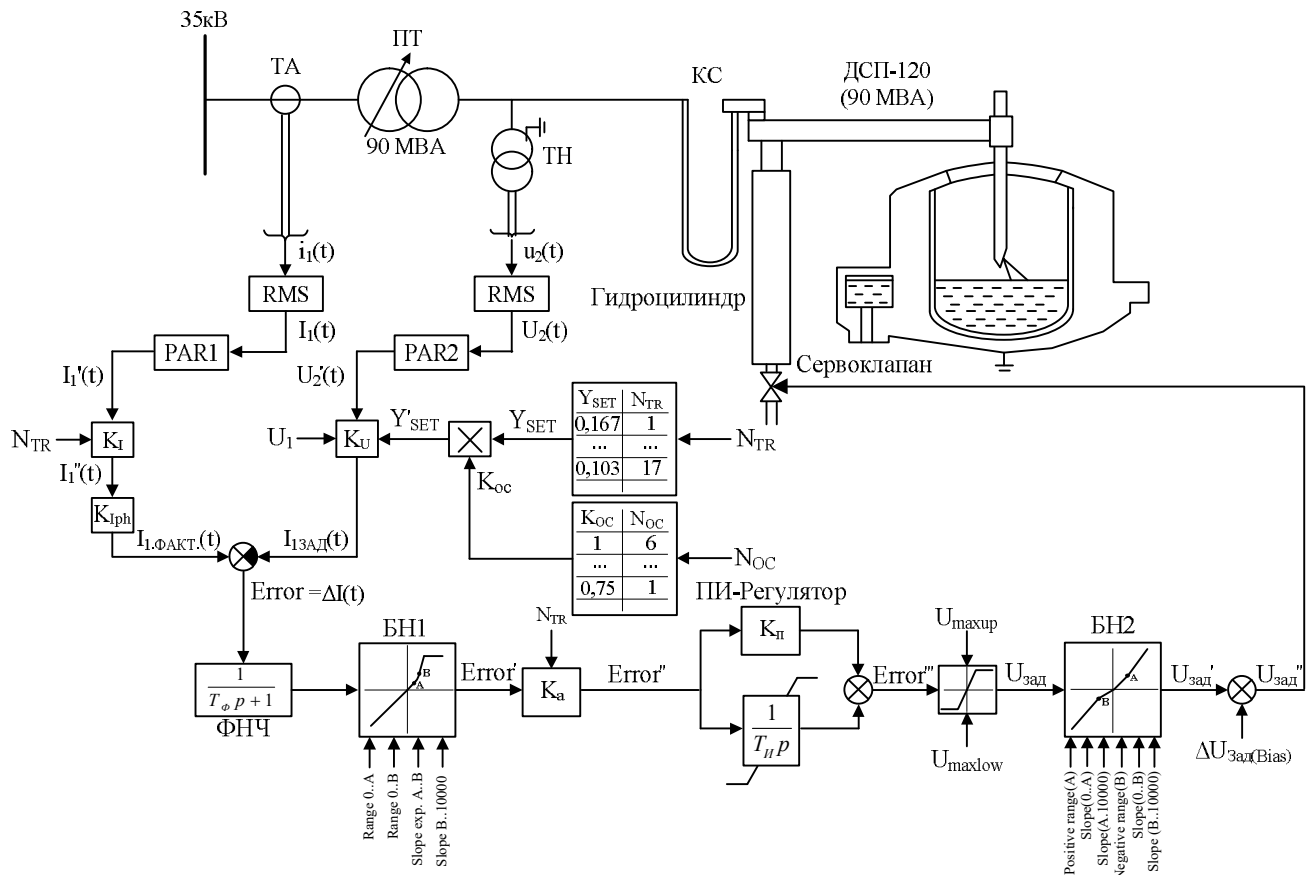


Рисунок 3.17 – Функциональная схема системы управления положением электродов HIREG Plus (Danieli, Италия) ДСП-250

Работа данной системы управления основана на поддержании на нулевом уровне ошибки регулирования адмитанса электрического контура. Сама ошибка регулирования вычисляется по следующей формуле:

$$Error = \left( \frac{1}{K_I} \right) \cdot K_{IPH} \cdot I_1 - K_U \cdot U_{2\phi} \quad (3.12)$$

где:  $K_I$  – коэффициент, учитывающий изменение коэффициента трансформации печного трансформатора;

$K_{IPH11}$  – коэффициент балансировки фаз, который позволяет уменьшить величину тока и длины дуги в одной из фаз относительно других в соответствии с технологическими требованиями, связанными с ограничением теплового воздействия на водоохлаждаемые панели и футеровку;

$I_1$  – ток, измеренный на стороне высокого напряжения печного трансформатора, пропорциональный току дуги (при условии соединения обмоток по схеме  $\Delta/\Delta-0$ );

$K_U$  – коэффициент, определяемый текущей ступенью трансформатора, уставкой адмитанса, номером рабочей кривой, а также системой динамической компенсации колебаний напряжения питающей сети NIREG DEC;

$U_{2\phi}$  – фазное напряжение, измеренное на между выводами вторичной обмотки трансформатора и подиной печи.

На вход системы управления подаются мгновенные значения тока  $i_l(t)$  и напряжения  $u_{2\phi}(t)$  от трансформатора тока ТА и трансформатора напряжения ТН (рисунок 3.17). Сигнал от данных трансформаторов поступает на блоки вычисления действующих значений сигналов RMS (Root Mean Square). Далее, в блоках PAR1 и PAR2 вычисленные действующие значения тока и напряжения пересчитываются в действующие значения тока электрической дуги  $I'_l(t)$  и фазного напряжения на вторичной стороне  $U'_{2\phi}(t)$ .

С целью учета коэффициента трансформации на всех ступенях трансформатора в схему вводится коэффициент  $K_I$ , рассчитываемый по формуле:

$$K_I = \frac{K_{Ti}}{K_{T12}} \quad (3.13)$$

где:  $K_{Ti}$  – коэффициент трансформации на текущей ступени печного трансформатора,  $K_{T12}$  – коэффициент трансформации на 12 ступени печного трансформатора.

Для фазного напряжения  $U'_{2\phi}(t)$  данный коэффициент не нужен, поскольку трансформатор напряжения ТН, с которого снимает сам сигнал, итак уже



установлен на вторичной стороне печного трансформатора. Таким образом, после учета текущей ступени трансформатора, уставки адмитанса, номера рабочей кривой формируется значение тока  $I_{ЗД}(t)$ , которое сравнивается с фактическим значением тока  $I_{ФАКТ}(t)$ . Результатом данного сравнения является сигнал ошибки, на основании которого производится поэтапное формирование сигнала задания на сервоклапан. Сигнал ошибки фильтруется, после чего поступает на вход нелинейного блока БН1.

Для обеспечения достаточного быстродействия системы управления на всех ступенях трансформатора необходимо учитывать коэффициента электрического контура ДСП в зависимости от ступени печного трансформатора. Для этого в схему вводится коэффициент  $K_a$ , который рассчитывается по следующей формуле:

$$K_a = \frac{U_{2л.мах}}{U_{2ли}}, \quad (3.14)$$

где:  $U_{2л.мах}$  – максимальное значение линейного напряжения на вторичной стороне трансформатора;

$U_{2ли}$  – значение линейного напряжения на вторичной стороне печного трансформатора для ступени, на которой производится расчет.

Полученный сигнал ошибки поступает на вход пропорционально-интегрального регулятора.

С целью ограничения диапазона рабочих скоростей перемещения электродов и приведения величины сигнала ошибки в соответствие диапазону управляющего сигнала сервоклапана сигнал «Error» проходит через блок ограничения и далее подаётся на блок нелинейности БН2.

Таким образом, на выходе блока БН2 формируется сигнал задания на сервоклапан, который корректируется с помощью параметра Bias. Данный параметр позволяет скомпенсировать утечку в гидравлической системе и предотвратить самопроизвольное опускание электродов без сигнала задания.

Для решения задач, представленных в рамках диссертационного исследования, не требуется реализация полной модели гидропривода со всеми сопутствующим блоками расчета. С целью достижения корректной реакции исследуемого объекта на изменение напряжения питающей сети необходимо реализовать функцию поддержания заданного значения адмитанса фаз для последующего воспроизведения статических характеристик ДСП-250, а именно  $P_o = f(U)$  и  $Q_o = f(U)$ . Результаты данных расчетов представлены в главе 4 диссертационного исследования. Математическая модель данной функции представлена на Рисунке 3.18.

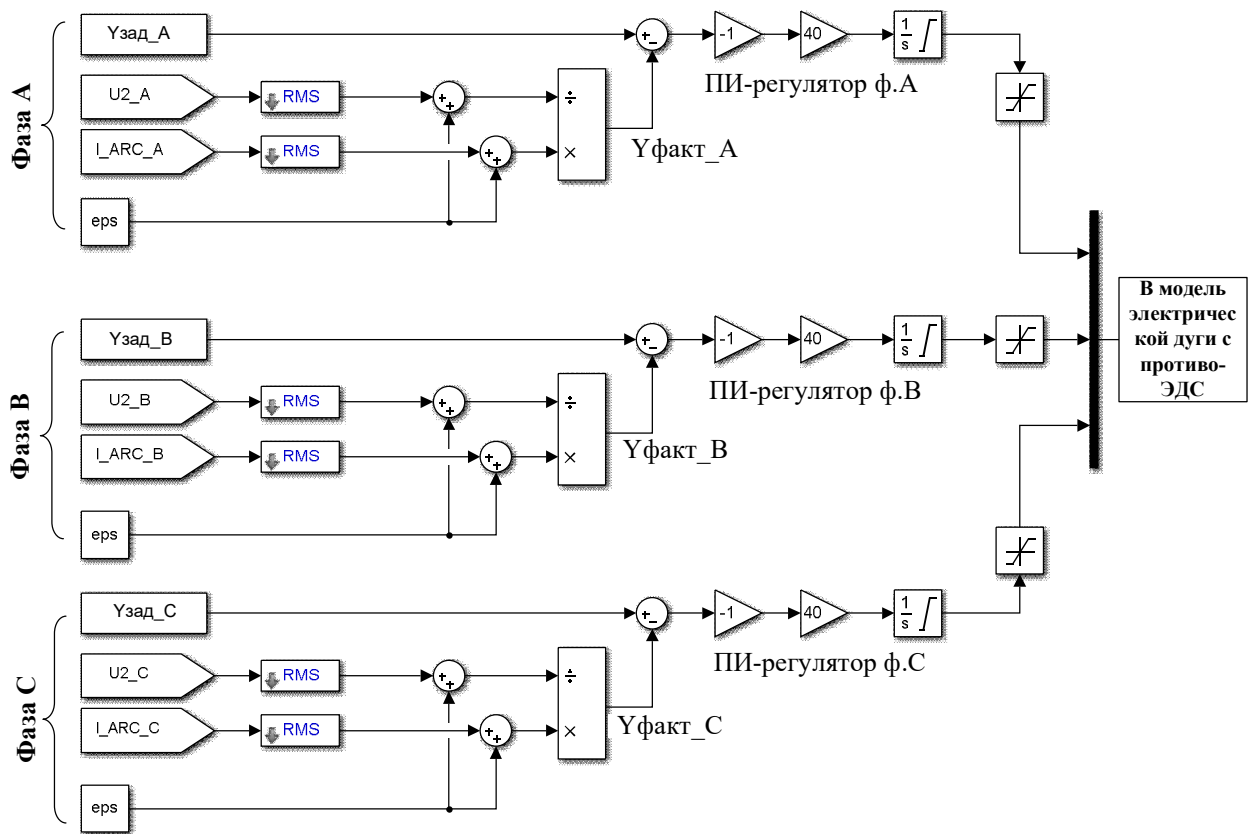


Рисунок 3.18 – Математическая модель системы поддержания заданного адмитанса фаз ДСП-250

Следующим этапом в разработке усовершенствованной системы управления СТК 330 МВАр является определение его генерирующей способности, с целью определения максимального уровня глубины провалов напряжения, которые могут быть скомпенсированы собственными резервами реактивной мощности.

### 3.2. Анализ генерирующей способности СТК 330 МВАр

Генерирующую способность СТК определим по методике, изложенной в [72]. С помощью разработанной модели строится область распределения токов прямой и обратной последовательной ДСП ( $I_{ДСП1}$  и  $I_{ДСП2}$ ) для всех теоретически возможных вариантов несимметрии при наивысшей ступени трансформатора и минимальном сопротивлении реактора. Эта область имеет вид треугольника. Далее на данную область наносится область фактического рассеивания токов ДСП за весь цикл плавки, полученная экспериментальным путем. Для оценки генерирующей способности воспользуемся результатами расчётов несимметричных режимов ДСП на математической модели.

Исходя из этого, качественный анализ различных видов несимметрии произведён на плоскости в осях токов прямой  $I_{(1)}$  и обратной  $I_{(2)}$  последовательностей. Вершины, полученного треугольника соответствуют следующим режимам: обрыв дуг в трёх фазах, трёхфазное короткое замыкание, двухфазное короткое замыкание при обрыве дуги в третьей фазе.

После обработки экспериментальных данных на полученной ранее модели была построена область распределения симметричных составляющих токов ДСП за весь цикл плавки (Рисунок 3.19).

Также на данное распределение токов прямой и обратной последовательности нанесены кривые, соответствующие области регулирования СТК при нулевом значении, (традиционная настройка СТК –  $Q_{зад1} = 0$ ), и при генерации реактивной мощности в питающую сеть ( $Q_{зад1} = -50$  МВАр).

Из Рисунка 3.19 видно, что при нулевой уставке область устойчивой работы СТК характеризуется самой большой площадью, при этом наибольшее значение токов прямой и обратной последовательностей соответственно равны  $I_{1max} = 0,73I_{баз}$  и  $I_{2max} = 0,3I_{баз}$ ; режим генерации реактивной мощности уменьшает данную область, и граничные значения токов уменьшаются до  $I_{1max} = 0,65I_{баз}$ ,  $I_{2max} = 0,25I_{баз}$ .

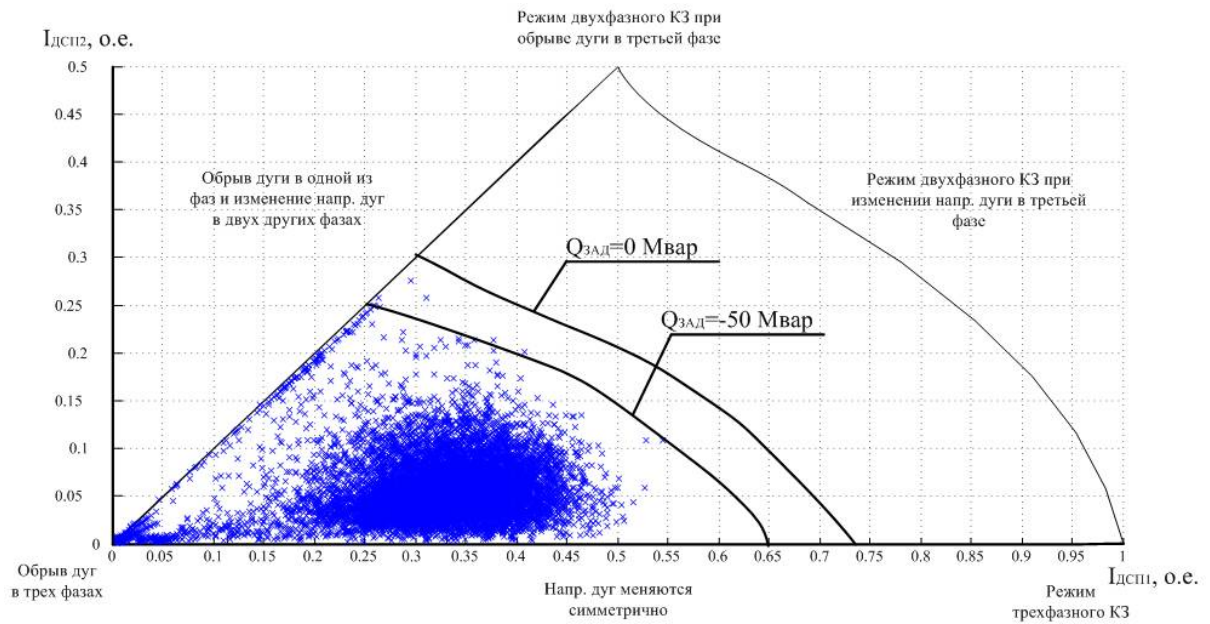


Рисунок 3.19 – Распределение симметричных составляющих токов ДСП-250

Таким образом, данное распределение позволяет сделать вывод о возможности генерирования реактивной мощности СТК в шины 34,5 кВ. С учётом фактической несимметрии токов ДСП максимальное значение генерирующей мощности не должно превышать 50 МВАр.

### 3.3. Разработка усовершенствованной системы управления СТК 330 МВАр для функционирования в условиях провалов напряжения

Как было определено в предыдущем параграфе, СТК 330 МВАр имеет возможность генерирования дополнительной реактивной мощности. В рамках проводимых исследований посвященных разработке эффективных способов снижения влияния провалов напряжения на внутривоздушную сеть наибольший интерес вызывает идея использования имеющихся резервов компенсатора с целью снижения количества отказов работы приводов стана 1750 горячей прокатки [79, 80]. Рассмотрим для этого работу существующей системы управления СТК 330 МВАр в условиях кратковременных провалов.

Для данной цели на разработанной ранее имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» (Рисунок 3.2) было воспроизведено однофазное короткое замыкание во внешней питающей сети глубиной 23% и длительностью 200 мс. С помощью блока измерений были сняты зависимости напряжений на шинах 380 кВ, 34,5 кВ и тока ТРГ от времени (Рисунок 3.20).

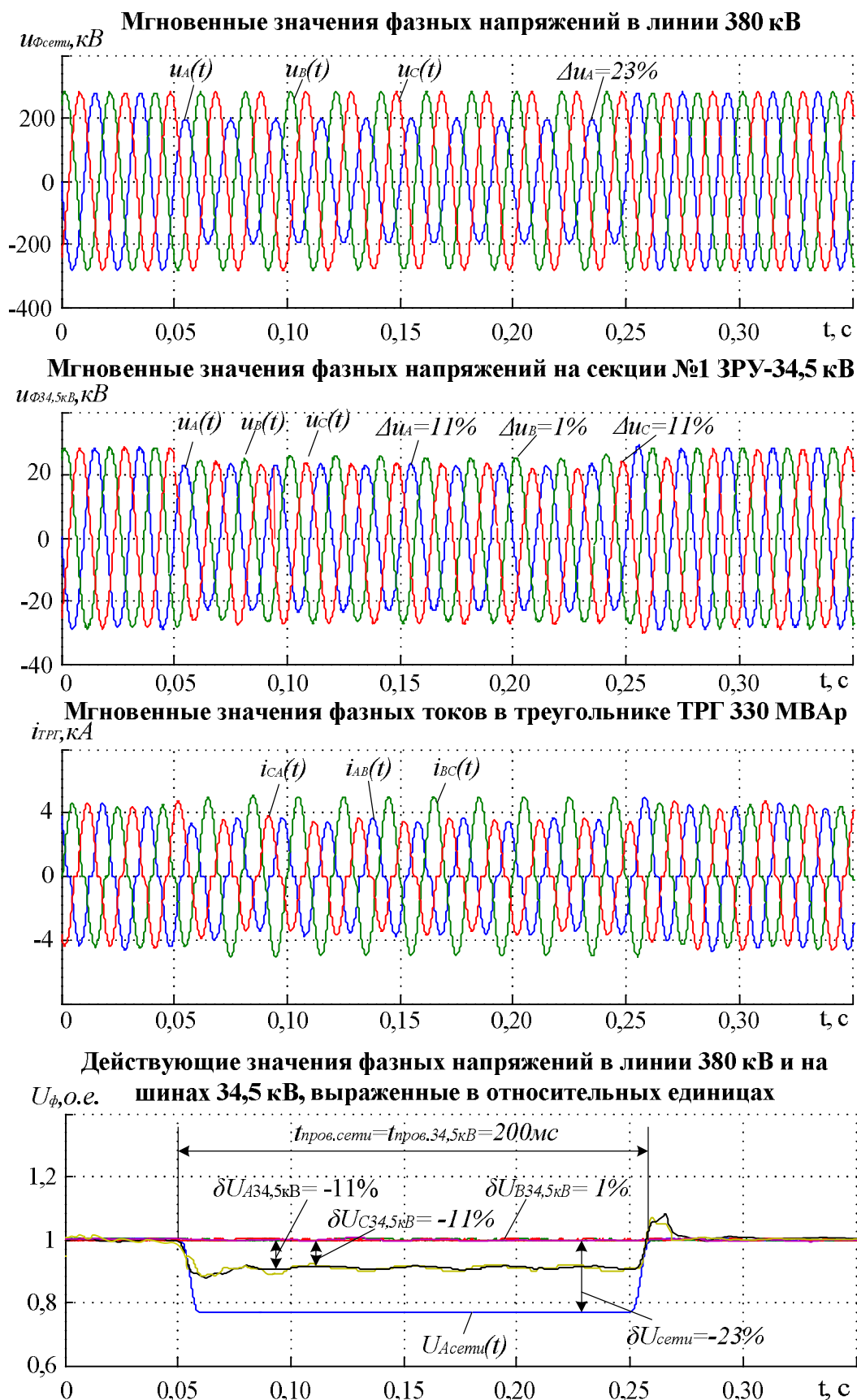


Рисунок 3.20 – Временные диаграммы изменения напряжения и токов, показывающие реакцию СТК на провал напряжения при использовании классической системы управления

Как видно из представленных выше временных диаграмм, в случае возникновения провала напряжения в сети 380 кВ в фазе А происходит снижение напряжения на шинах 34,5 кВ на 11% по фазам А и С и на 1% по фазе В. С точки зрения надежности приведенный режим работы системы электроснабжения с классической системой управления СТК является нежелательным, поскольку вызывает риск отключения приводов прокатного стана при более глубоких провалах напряжения в питающей сети (более 30 %). Таким образом, было предложено доработать существующую классическую систему управления СТК с целью реализации в нём пофазного регулирования напряжения.

Математическая модель контура регулирования фазных напряжений в сети 34,5 кВ представлена на Рисунке 3.21. Здесь в блоке Power\_Calc установлена схема трехфазного пропорционально-интегрального регулятора (ПИ-регулятора) напряжений (Рисунок 3.22), который позволяет осуществлять пофазное регулирование.

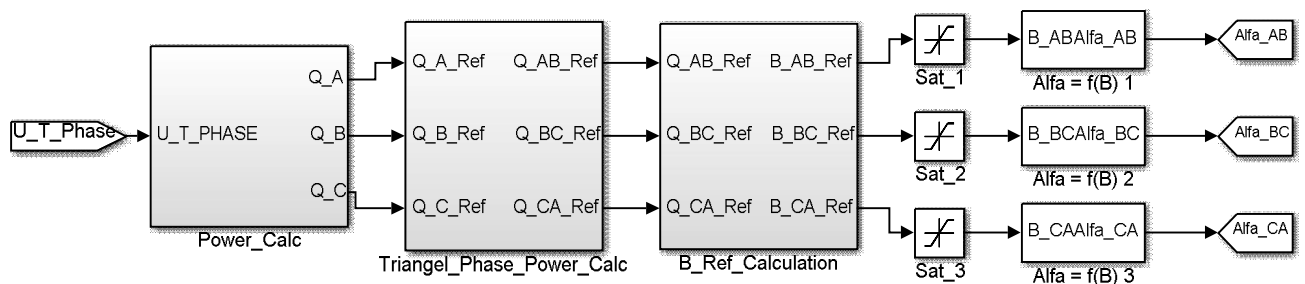


Рисунок 3.21 – Математическая модель контура регулирования фазных напряжений в сети 34,5 кВ

После работы ПИ-регулятора напряжений рассчитываются дополнительные заданные проводимости фаз ТРГ, которые, проходя через блоки ограничения и нелинейности, преобразуются в углы отпирания тиристоров. Данные углы поступают на вход СИФУ, на которую также подаются сигналы с модели ФАПЧ, используемые для создания синхронизирующего сигнала СИФУ в условиях постоянно меняющихся параметров напряжения, таких как, частота и фаза.

Результаты данного преобразования наглядно показаны с помощью осциллограмм мгновенных значений фазных напряжений на шинах 380 кВ, 34,5

кВ, мгновенных значений фазных токов ТРГ и действующих значений фазных напряжений в линии 380 кВ и шинах 34,5 кВ (Рисунок 3.23).

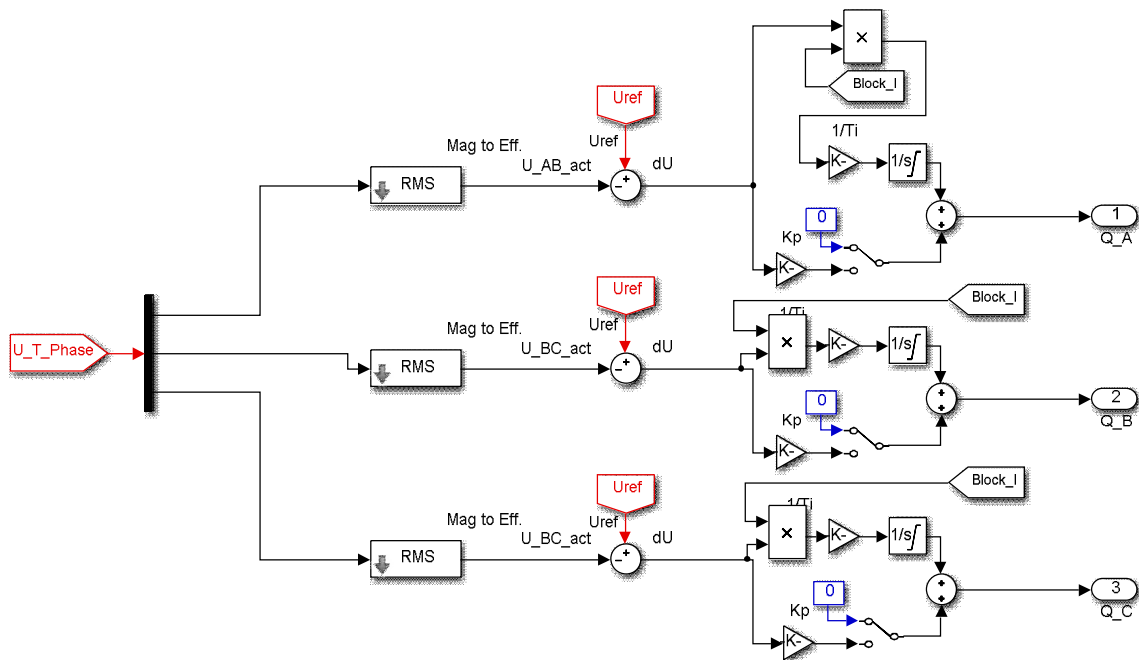


Рисунок 3.22 – Математическая модель трехфазного регулятора напряжений (блок Power\_Calc)

Из Рисунка 3.23 нетрудно заметить, что после того как была доработана система управления СТК, провал напряжения глубиной в 23% и длительностью 200 мс удаётся восстановить за время равное 80 мс.

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что преобразованная система управления СТК 330 МВАр позволяет быстро восстановить напряжение на шинах 34,5 кВ при том условии, что провал со стороны питающей сети 380 кВ еще не закончился. Таким образом, длительность провала напряжения должна быть более 80 мс.

Не смотря на все преимущества представленного регулятора, он имеет свои недостатки. Во-первых, он не учитывает трансформацию провала напряжения через вторичную обмотку сетевого трансформатора 155 МВА соединённую в треугольник. Во-вторых, в первый и последний моменты провала возникают броски напряжения, которые отрицательно влияют на работу преобразователей частоты. Данные обстоятельства заставляют пересмотреть и доработать существующие алгоритмы регулирования.

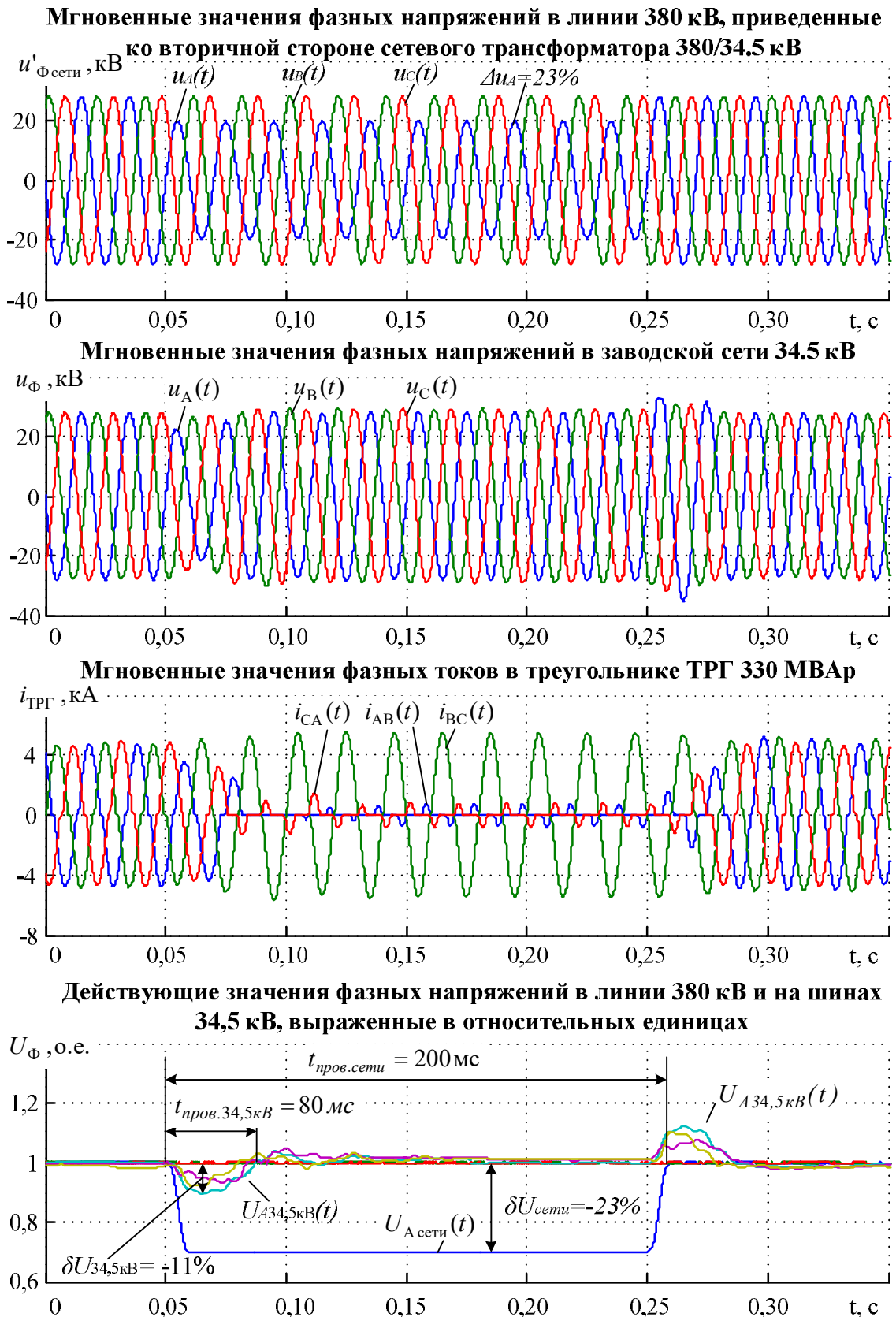


Рисунок 3.23 – Временные диаграммы, иллюстрирующие снижение амплитуды и длительности провала напряжения при использовании усовершенствованной системы управления СТК 330 Мвар (использование ПИ-регуляторов фазных напряжений)



Для реализации функций по демпфированию несимметричных провалов напряжения за счет резервов реактивной мощности СТК необходима разработка усовершенствованной системы управления статическим компенсатором с переключающейся структурой, которая бы обеспечивала переход на иной принцип управления ТРГ в период возникновения внешних возмущений со стороны питающей сети. В частности, данная система в момент возникновения провала напряжения должна кратковременно переводить СТК в режим индивидуального поддержания фазных напряжений с последующим возвратом на существующие режимы регулирования. Детальная и упрощенная функциональные схемы разработанной усовершенствованной системы управления СТК приведены на рисунках 3.24 и 3.25.

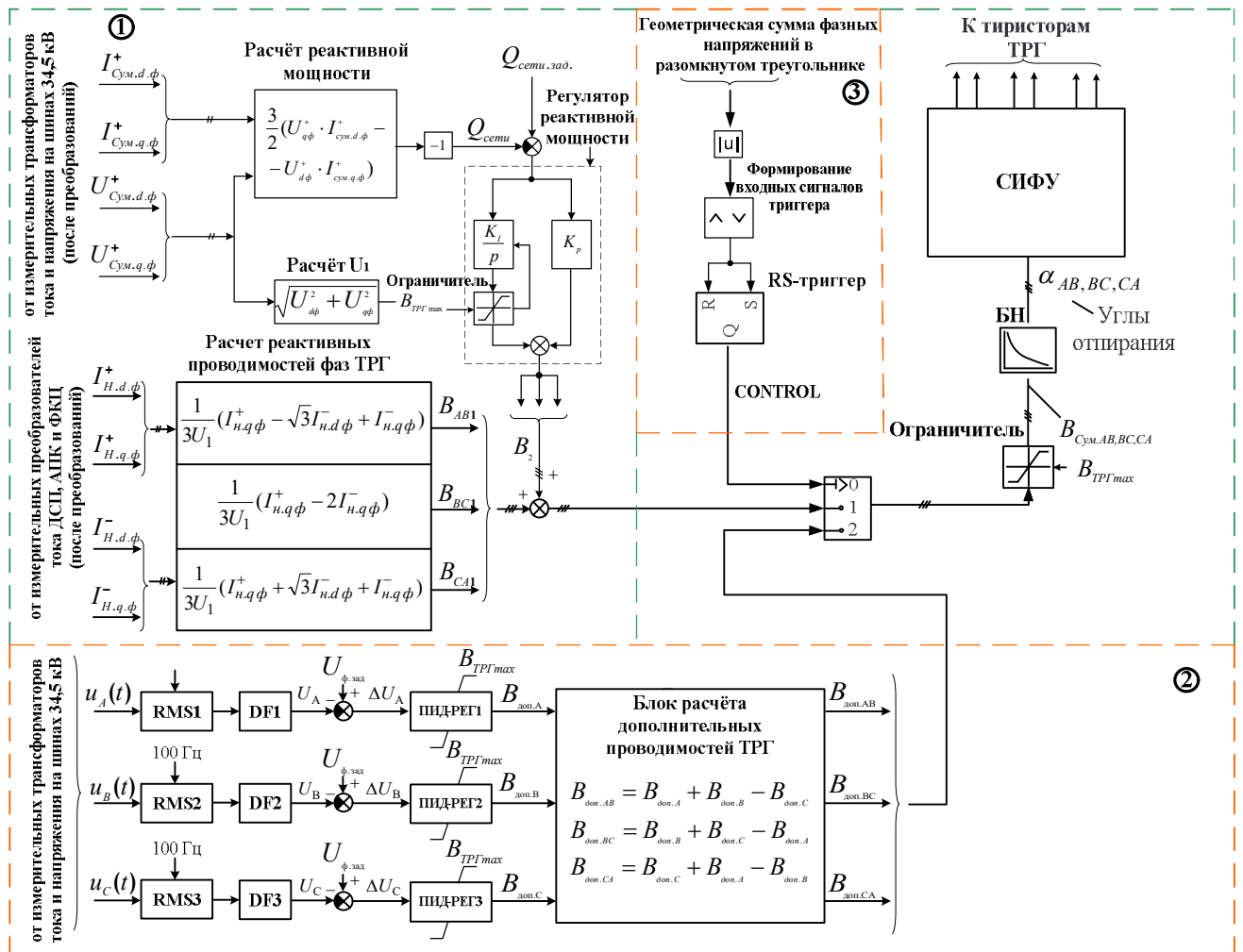


Рисунок 3.24 – Функциональная схема усовершенствованной системы управления СТК 330 МВАр с переключающейся структурой, обеспечивающая эффективное демпфирование провалов напряжения на секции 34,5 кВ

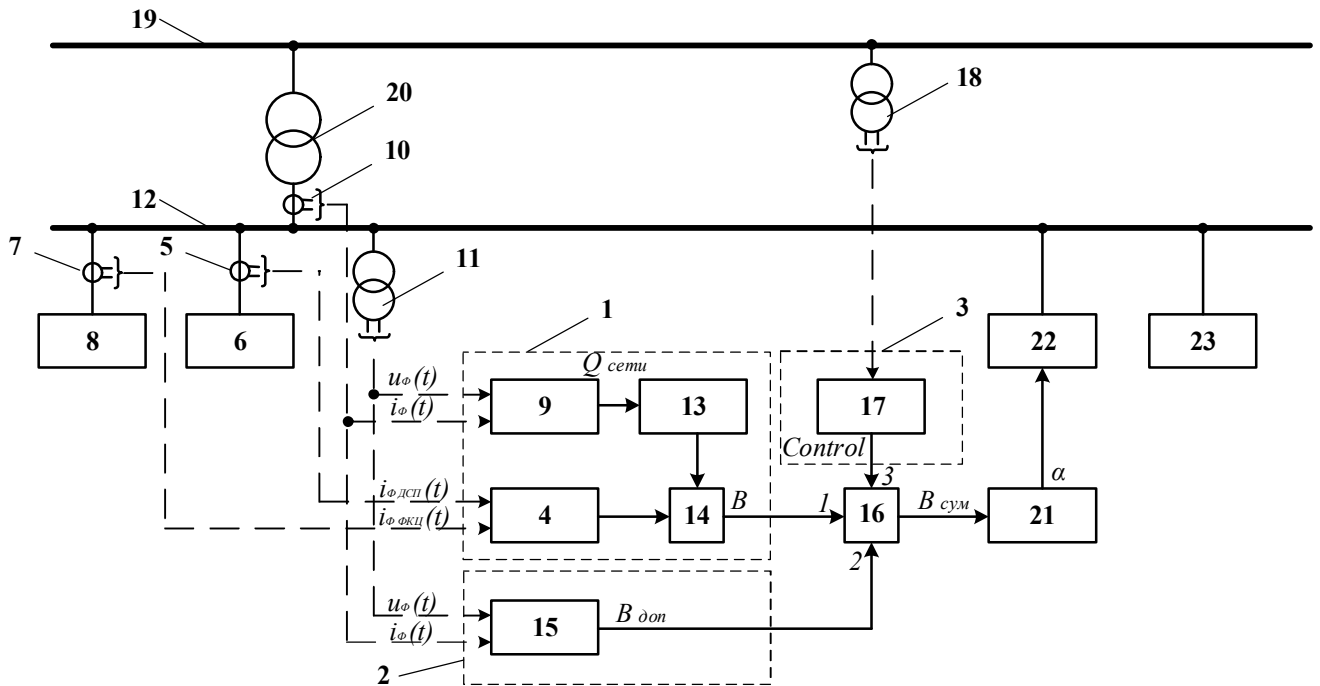


Рисунок 3.25 – Упрощенная функциональная схема усовершенствованной системы управления СТК электродуговой печи с возможностью демпфирования кратковременных провалов напряжения

Усовершенствованная система управления СТК (Рисунок 3.25) включает в себя контур регулирования реактивной мощности СТК 1, контур регулирования напряжения 2 и контур диагностики провалов напряжения в питающей сети 3 [81]. Контур регулирования реактивной мощности СТК 1 состоит из блока расчёта реактивных проводимостей фаз ТРГ 4, вход которого соединён с трансформатором тока 5 дуговой сталеплавильной печи 6 и трансформатором тока 7 фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) 8, и блока расчёта реактивной мощности 9, вход которого соединён с трансформаторами тока и напряжения 10 и 11 соответственно, подключенных к шинам 12 электросталеплавильного комплекса, а выход – с регулятором реактивной мощности СТК 13. Выходы блоков 4 и 13 соединены с первым и вторым входом блока суммирования 14. Контур регулирования напряжения 2 состоит из блока расчёта дополнительных проводимостей фаз ТРГ 15. Вход блока 15 соединён с трансформатором тока 10 и трансформатором напряжения 11 электросталеплавильного комплекса, а выход – со вторым из входов блока

переключения контуров системы управления СТК 16. Остановимся на нем поподробнее.

Блок 15 контура регулирования напряжения 2 содержит в себе трёхфазный регулятор напряжений, созданный на базе пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора). Интегральная часть ПИД-регулятора обеспечивает выход на нулевую ошибку регулирования. Пропорционально-дифференциальная часть обеспечивает необходимое быстродействие регулятора в переходных режимах: период возникновения провала и период восстановления напряжения [82-87]. Рассмотрим математическую модель данного регулятора (Рисунок 3.26).

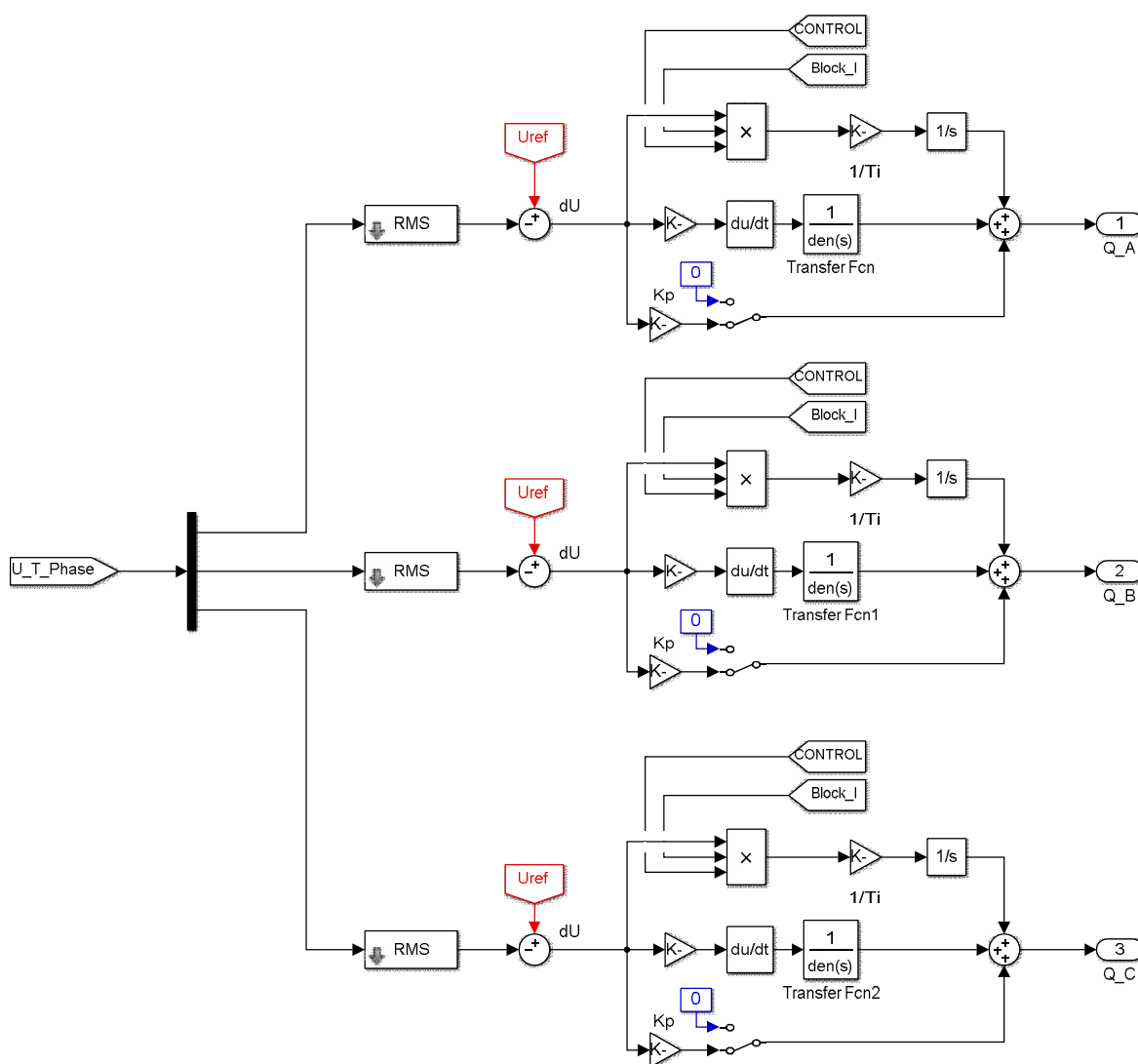


Рисунок 3.26 – Математическая модель трёхфазного ПИД-регулятора напряжений (блок Power\_Calc)

У интегратора на входе стоит блок умножения, на который подается сигнал с блока диагностики провалов напряжения 17 – «CONTROL». Значение сигнала «CONTROL» равное 1 означает, что надо включиться контуру регулирования напряжения 2. При этом контур 1 с прямым и обратным каналом отключается.

Для того чтобы интегральная составляющая регулятора реактивной мощности 13 (Рисунок 3.27) не накапливала ошибку регулирования, когда в процессе возникновения провала напряжения канал управления находится в разомкнутом состоянии, сигнал управления «CONTROL» осуществляет остановку интегральной части данного регулятора с последующей повторной активацией после восстановления напряжения сети 380 кВ.

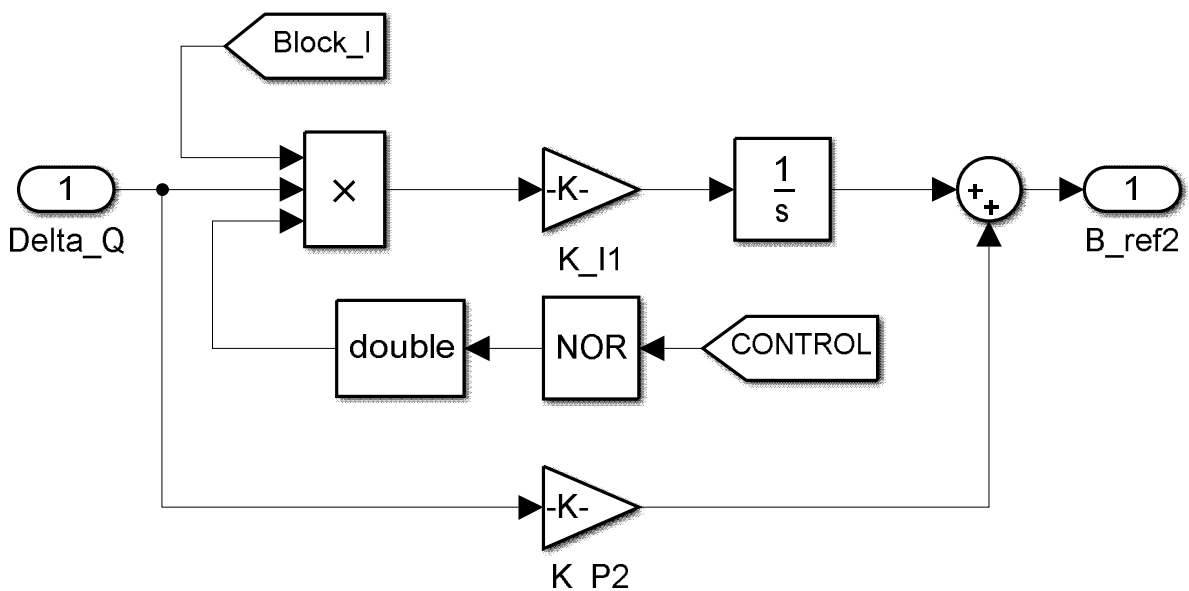


Рисунок 3.27 – Функциональная схема пропорционально-интегрального регулятора реактивной мощности

Это позволяет обеспечить нормальный переходный процесс при восстановлении напряжения с минимальным перерегулированием за счет того, что на выходе интегрирующей части регулятора реактивной мощности сохраняется прежнее значение корректирующего сигнала по реактивной проводимости, которое соответствовало нормальному режиму работы до возникновения провала напряжения.

Данный процесс хорошо иллюстрирует Рисунок 3.28.

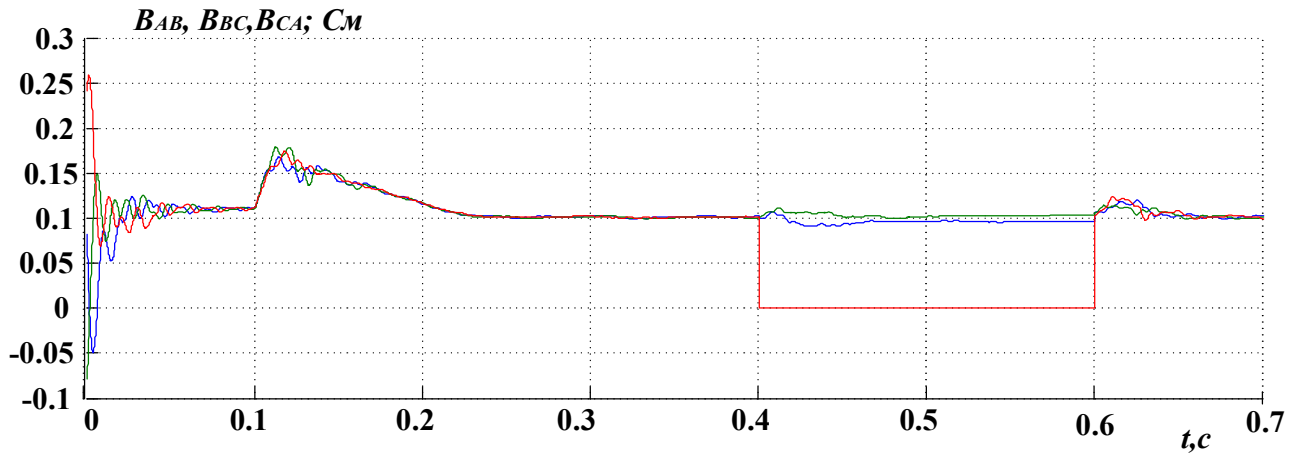


Рисунок 3.28 – Заданные реактивные проводимости в нормальном режиме и в момент переходного процесса

Контур диагностики провалов напряжения в питающей сети 3 содержит в себе блок диагностики провалов напряжения 17, вход которого соединён с трансформатором напряжения 18 на шинах распределительного устройства высокого напряжения 19 (РУ ВН), питающих сетевой трансформатор 20, а выход – с третьим входом блока переключения контуров системы управления СТК 16. Вход системы импульсно-фазового управления тиристорно-реакторной группы СТК 21 соединён с выходом блока переключения контуров системы управления СТК 16. Выход данного блока связан с тиристорно-реакторной группой СТК 22. Так же к шинам электросталеплавильного комплекса 12 подключены главные электроприводы стана горячей прокатки 23, построенные на базе ПЧ с АВ.

Блок диагностики провалов напряжения 17, расположенный в контуре диагностики провалов напряжения в питающей сети 3, определяет момент включения контура регулирования напряжения 2 и отключения контура регулирования реактивной мощности 1 с помощью блока переключений 16.

Математическая модель блока диагностики провалов напряжения 17 представлена на Рисунке 3.29.

Основной структурной частью данного блока является математическая модель RS-триггера.

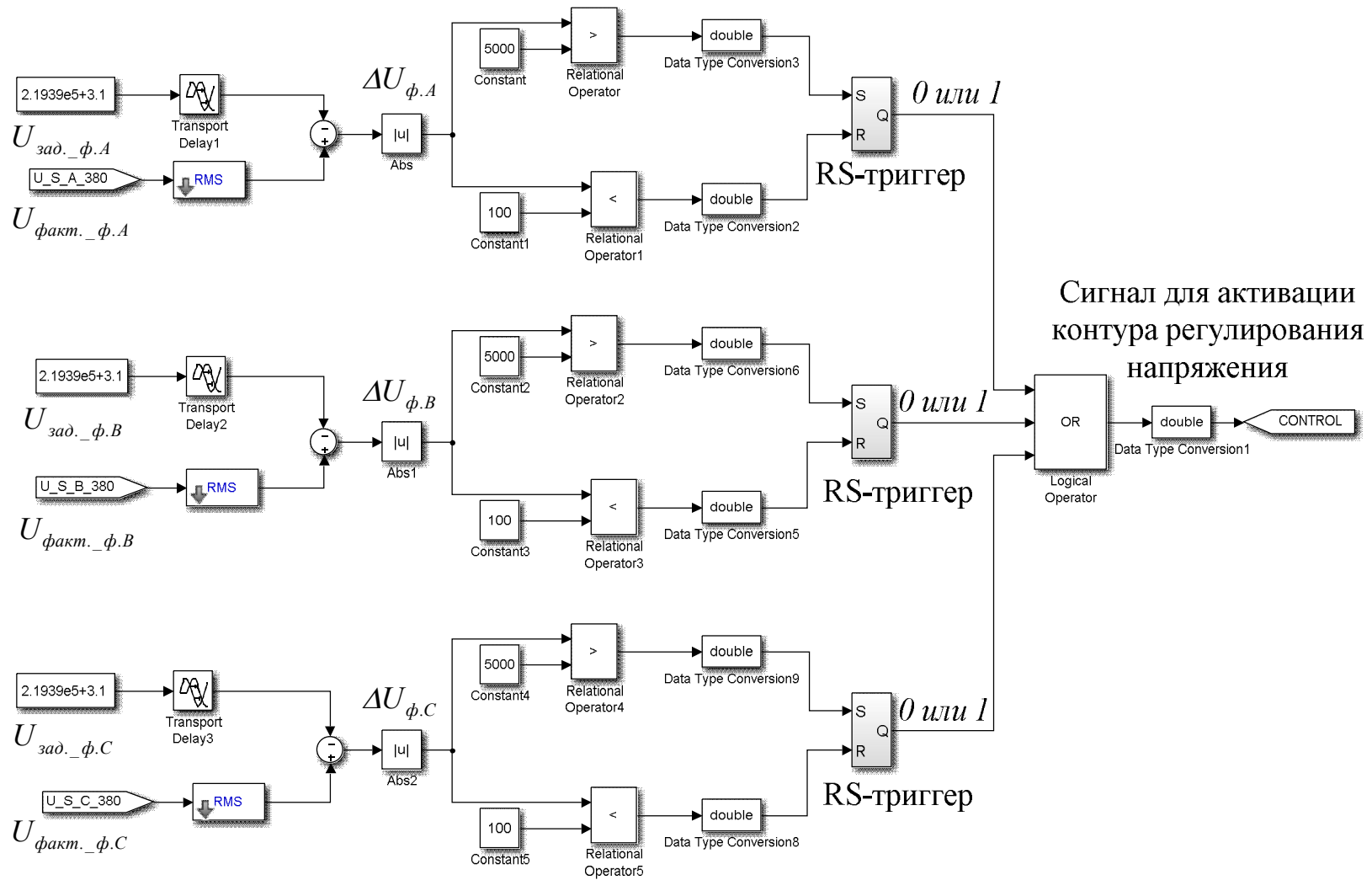


Рисунок 3.29 – Структурная схема блока диагностики провалов напряжений

RS-триггер получил название по названию своих входов. Вход S (Set — «установка» англ.) позволяет устанавливать выход Q в единичное состояние. (Устанавливать означает записывать логическую единицу). Вход R (Reset — «сброс» англ.) позволяет сбрасывать выход Q (Quit — выход англ.) в нулевое состояние. Структурная схема RS-триггера представлена на Рисунке 3.30.

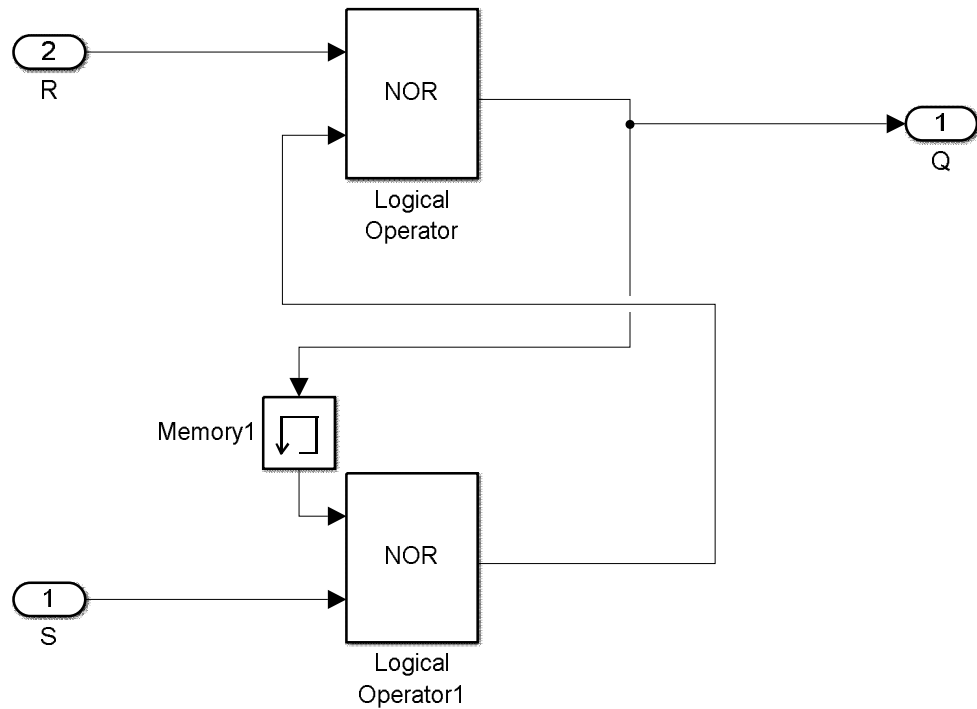


Рисунок 3.30 – Структурна схема RS-триггера

Принцип работы блока диагностики провалов напряжения 17 реализован по следующему алгоритму: действующее значение фазного напряжения питающей сети сравнивается с заданным действующим значением. Как только в одной из фаз, либо в двух фазах или одновременно в трех фазах, произойдет снижение напряжения, то появится разница между фактическим и заданным значением напряжений. Модуль этой разницы будет являться сигналом на включение или отключение RS-триггера. Если фактическое напряжение будет меньше заданного более чем на 5кВ, то триггер включится. Как только разница между  $U_{факт}$  и  $U_{зад}$  будет меньше 100 В, то триггер отключится.

В конце находится логический блок «ИЛИ», который сформирует сигнал CONTROL в том случае, если отработал хотя бы один из триггеров.

Результат работы блока диагностики провалов напряжения 17 наглядно показан с помощью осциллограмм на Рисунке 3.31.

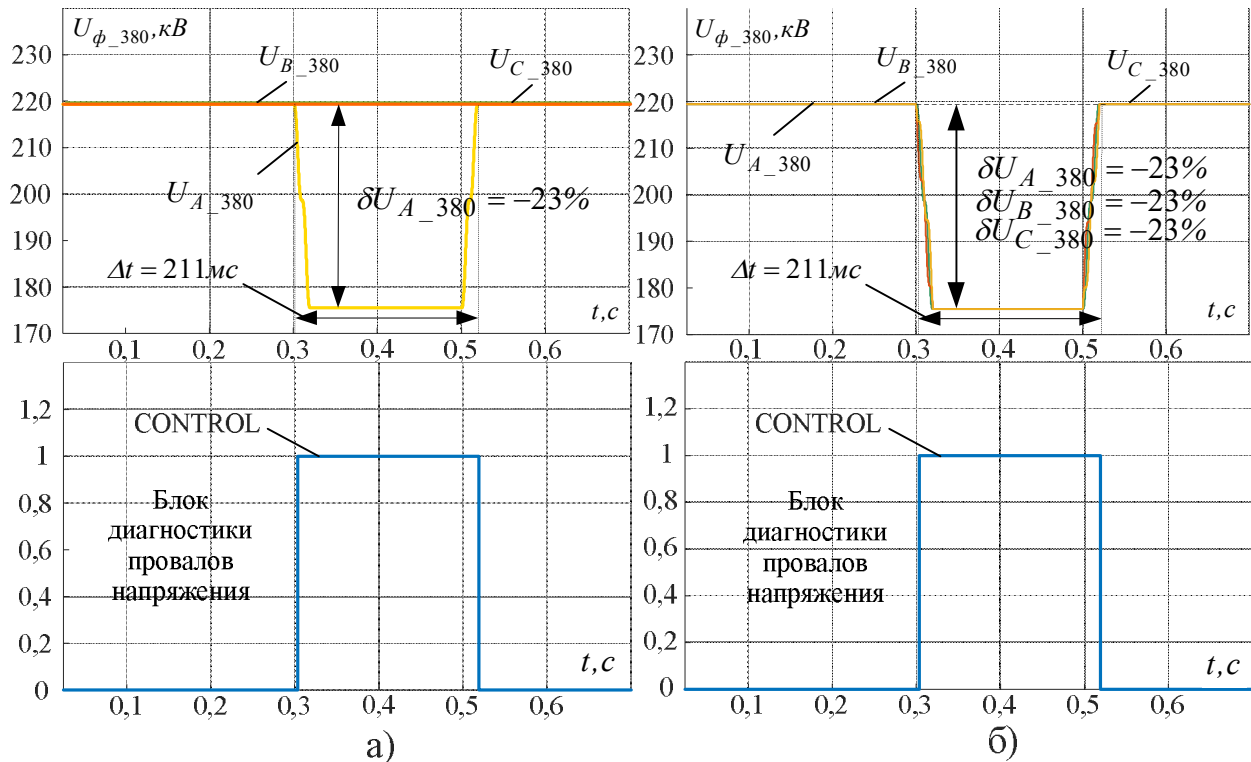


Рисунок 3.31 – Временные диаграммы, иллюстрирующие работу блока диагностики провалов напряжения при однофазном (а) и трехфазном (б) провалах напряжения

Таким образом, результатом работы блока диагностики провала напряжения 17 является сигнал об аварийном режиме работы сети CONTROL. Как описывалось выше, данный сигнал с блока диагностики приходит на вход интегратора ПИД-регулятора напряжения, расположенного в блоке расчёта дополнительных проводимостей фаз ТРГ 15, и осуществляет активацию интегральной части регулятора. Также сигнал CONTROL поступает на блок выбора режима регулирования 16, который включает контуры регулирования реактивной мощности и симметрирования нагрузки 1 и вводит в работу индивидуальные контуры регулирования фазных напряжений на секции 34,5 кВ с быстродействующими ПИД-регуляторами 2. Модель усовершенствованной системы управления СТК 330 МВАр с использованием ПИД-регулятора и контура диагностики несимметричных режимов представлена на Рисунке 3.32.



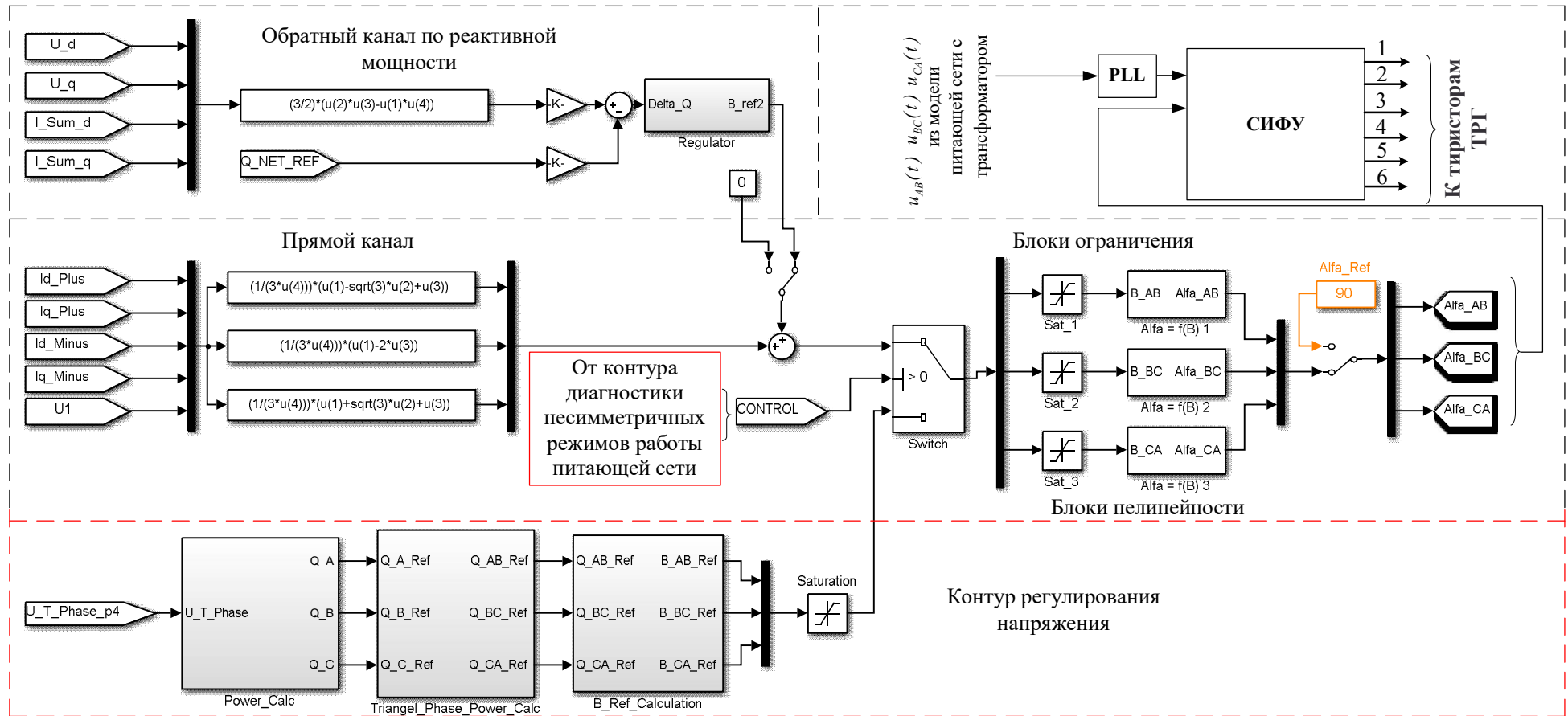


Рисунок 3.32 – Математическая модель усовершенствованной системы управления СТК-330 МВАр

Для исследования эффективности разработанной системы управления СТК в математическом пакете Matlab с приложением Simulink была воспроизведена модель комплекса «ДСП–УКП–СТК» ЗАО «ММК Metalurji», на которой искусственно воспроизводились провалы напряжения различной величины и длительности. Временные диаграммы изменения напряжения и токов, показывающие реакцию СТК на провал напряжения приведены на Рисунке 3.33. Анализ результатов исследований показал, что при использовании традиционной системы управления СТК с регулятором реактивной мощности имеет место неправильная реакция СТК на несимметрию напряжения и компенсатор в этом случае лишь частично уменьшает глубину провала с 23% до 11% (Рисунок 3.20). В этом случае прямой канал управления, отвечающий за симметрирование, реагирует только на несимметрию токов ДСП, а уровни напряжения участвуют в нем только для расчета требуемых реактивных проводимостей фаз ТРГ. При использовании системы управления с переключающейся структурой за счет активации индивидуальных контуров регулирования фазных напряжений с ПИД-регуляторами удается обеспечить качественные переходные процессы при возникновении провалов напряжения. Наличие дифференциальной составляющей обеспечивает отсутствие значительного перерегулирования фазных напряжений в моменты возникновения и исчезновения провала по сравнению с ПИ структурой (Рисунок 3.23). Благодаря новым элементам осуществляется формирование корректирующих сигналов на реактивные проводимости фаз ТРГ  $B_{дон. AB, BC, CA}$ , которые изменяют результирующие значения  $B_{\Sigma AB, BC, CA}$  таким образом, чтобы исключить несимметрию напряжения на секции 34,5 кВ. Результаты показали, что при использовании усовершенствованной системы управления, СТК способен устранять однофазные провалы напряжения глубиной до 23% любой продолжительности, при включенной ДСП. На Рисунке 3.34 приведены графики переходных процессов токов на входе активного выпрямителя и напряжения в звене постоянного тока преобразователя ACS6000 фирмы АВВ при демпфировании провалов напряжения с помощью разработанной системы управления СТК.

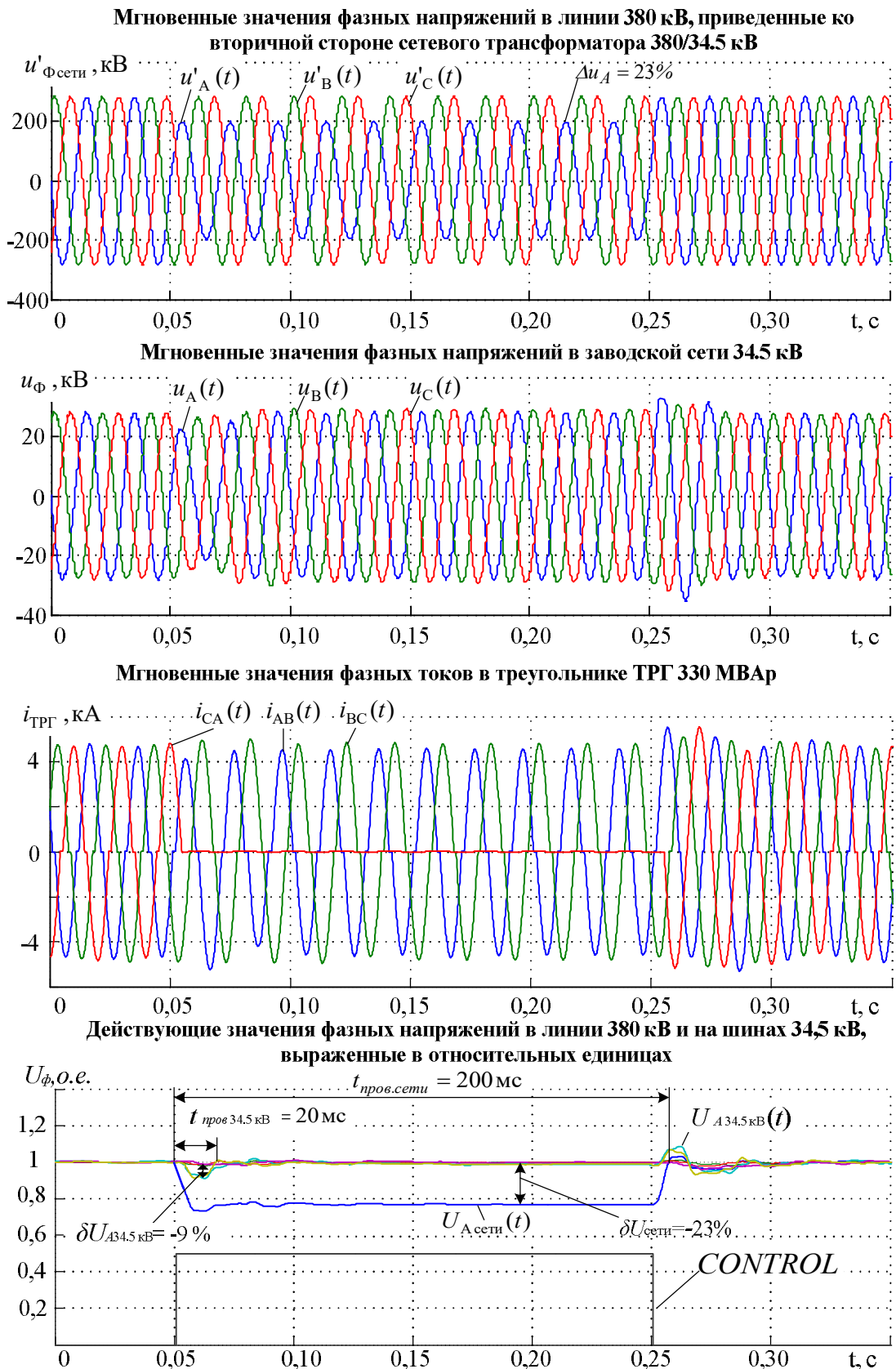


Рисунок 3.33 – Временные диаграммы изменения напряжения и токов, показывающие реакцию СТК на провал напряжения при использовании усовершенствованной системы управления (использование ПИД-регуляторов фазных напряжений)

Из Рисунка 3.34 видно, что включение электроприводов клеток прокатного стана на параллельную работу с электросталеплавильным комплексом и использование системы управления СТК с переключающейся структурой позволило существенно улучшить процессы, протекающие в ПЧ с АВ при провале напряжения. В частности, по сравнению с результатами исследования на Рисунке 1.6, наблюдается заметное улучшение переходных процессов. Напряжение в звене постоянного тока поддерживается на заданном уровне с незначительными колебаниями (Рисунок 3.34, б). Сетевые токи, потребляемые активным выпрямителем, на протяжении всей длительности провала напряжения остаются на прежнем уровне, сохраняя симметрию по фазам (Рисунок 3.34, а). При восстановлении сети к нормальному режиму наблюдается незначительное увеличение тока, действующее значение которого не превышает уставку срабатывания защиты АВ.

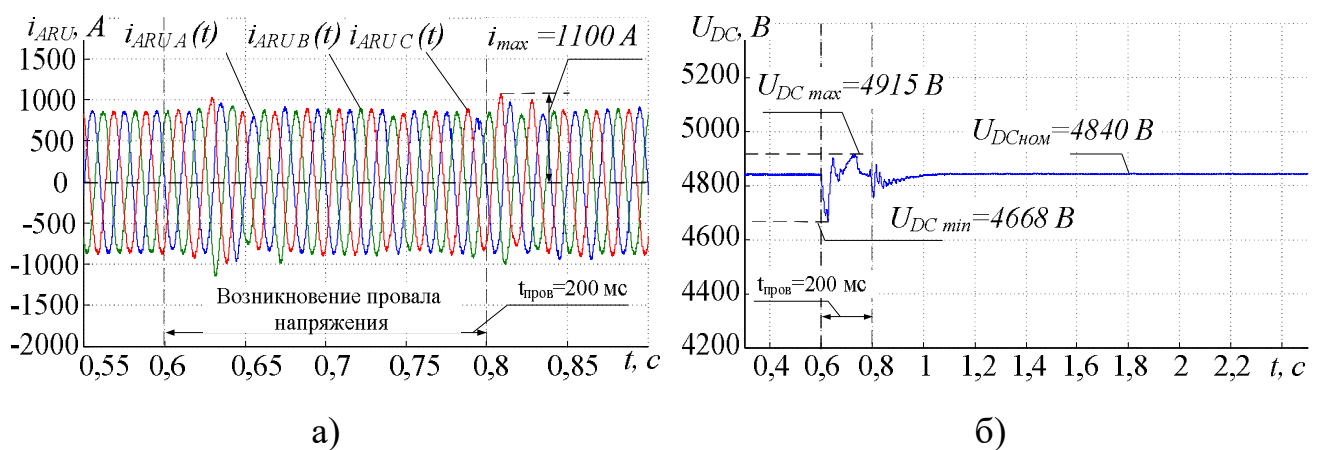


Рисунок 3.34 – Мгновенные значения токов, потребляемых АВ (а), и напряжение в звене постоянного тока при компенсации провала напряжения с помощью резервов реактивной мощности СТК (б)

Реализация предложенного способа демпфирования провалов напряжения в питающей сети за счёт изменения алгоритмов управления электрическим режимом СТК возможна на базе промышленного контроллера MACH2 фирмы АВВ, при наличии пароля разработчика. В программной среде системы MACH2 используются встроенные библиотеки с готовыми функциональными блоками, необходимыми для применения предложенных изменений. Используя свободные функциональные блоки, не задействованные в реализации основных режимов

управления, возможно разработать алгоритмы для компенсации провалов напряжения на металлургических предприятиях с чувствительными электроприемниками, включающих в себя преобразователи частоты с активными выпрямителями и подключенных на параллельную работу с электротехническим комплексом «ДСП-СТК».

### 3.4. Проверка адекватности имитационной модели

Для проверки адекватности разработанной модели было проведено моделирование основных электрических режимов ДСП-250. В ходе проверки сравнивались расчетные значения  $P_{\delta}$  и  $I_{\delta}$ , записанные с помощью специализированных программных средств системы управления перемещением электродов, и фактические параметры, полученные на разработанной математической модели. Также на основе полученных экспериментальных данных и результатов расчета построены семейства рабочих точек для отдельных стадий плавки. На рисунке 3.35 представлено изменение  $P_{\delta}(t)$  во времени. Также приведены номера ступеней трансформатора, реактора и рабочих кривых для различных временных участков данной характеристики. Для каждого из участков построена расчетная характеристики  $P_{\delta}(t)$  и  $I_{\delta}(t)$ , с нанесенными на них областью рабочих точек. В пределах каждой области посчитано математическое ожидание ( $MX$ ), дисперсия ( $DX$ ) и среднеквадратичное отклонение ( $S$ ). Например, для  $I_{\delta}$ , о.е., участка 1.1:

$$MX = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = 0,605; \quad (3.15)$$

где:  $n$  – объем выборки (300 точек).

$$DX = \frac{1}{n-1} \cdot \left[ \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}{n} \right] = 0,0024; \quad (3.16)$$

$$S = \sqrt{DX} = \sqrt{0,0024} = 0,049. \quad (3.17)$$

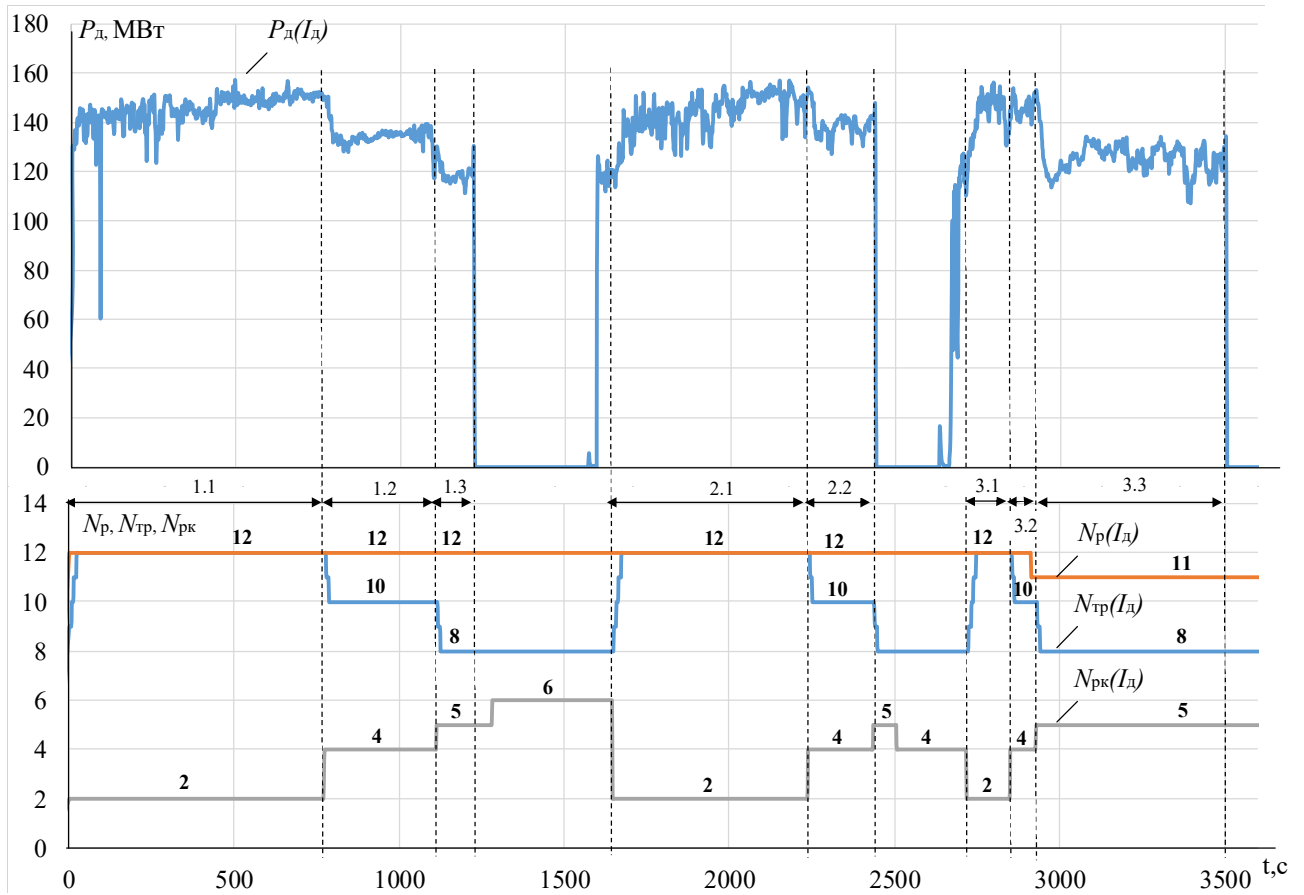


Рисунок 3.35 – График изменения мощности дуги  $P_d$ , ступеней трансформатора  $N_{tr}$ , реактора  $N_p$  и рабочей кривой  $N_{pk}$  за период одной плавки

Далее, на основе распределения Стьюдента определен доверительный интервал для математического ожидания:

$$MX - \Delta \leq MX \leq MX + \Delta; \quad (3.18)$$

где:  $\Delta$  - предельная ошибка выборки:

$$\Delta = t_p \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}. \quad (3.19)$$

Для доверительной вероятности  $p=0,95$  величина  $t=1,97$ . После подстановки данного значения и выполнения расчетов получается, что границы допустимых значений равны:

$$0,605 - 1,97 \cdot \frac{0,049}{\sqrt{300}} \leq MX \leq 0,605 + 1,97 \cdot \frac{0,049}{\sqrt{300}};$$

$$0,599 \leq MX \leq 0,61.$$

Рабочая точка  $I_{\partial}$  на расчетной характеристике равна 0,604. Следовательно, расчетное значение тока дуги с вероятностью 0,95 находится в диапазоне доверительных значений.

Графики расчетных характеристик с областями фактических рабочих точек представлены на рисунке 3.36.

Результаты проверки при  $p=0,95$  приведены в Таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Результаты проверки адекватности имитационной модели

Номер участка на хар-ке $P_{\partial}(t)$	Оцениваемый параметр	Доверительный интервал	Фактическое значение параметра
1.1	Рд, о.е.	(0,486;0,49)	0,487
	Id, о.е.	(0,599;0,610)	0,604
1.2	Рд, о.е.	(0,411;0,484)	0,444
	Id, о.е.	(0,677;0,796)	0,743
1.3	Рд, о.е.	(0,35;0,435)	0,392
	Id, о.е.	(0,71;0,883)	0,797
2.1	Рд, о.е.	(0,465;0,502)	0,496
	Id, о.е.	(0,586;0,635)	0,61
2.2	Рд, о.е.	(0,415;0,506)	0,461
	Id, о.е.	(0,677;0,825)	0,751
3.1	Рд, о.е.	(0,436;0,541)	0,489
	Id, о.е.	(0,589;0,657)	0,593
3.2	Рд, о.е.	(0,427;0,538)	0,483
	Id, о.е.	(0,65;0,818)	0,734
3.3	Рд, о.е.	(0,398;0,44)	0,419
	Id, о.е.	(0,771;0,855)	0,813

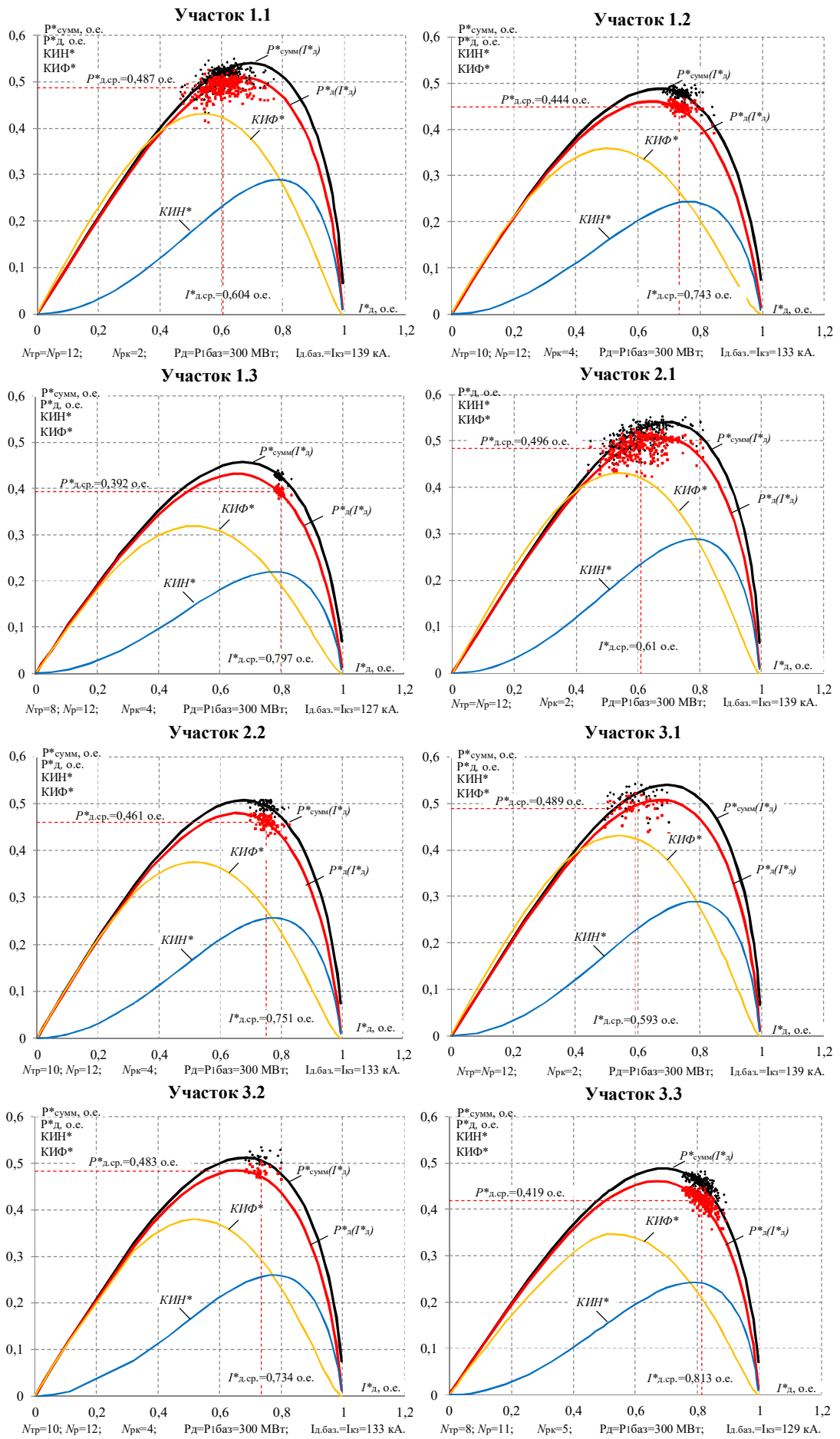


Рисунок 3.36 – График электрических характеристик ДСП-250



### 3.5. Выводы по главе

1. Разработана имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК» ЗАО «ММК Metalurji», в которой реализованы модели электрической дуги и электрического контура ДСП-250; модель СТК 330 МВАр, включающая в себя модели ТРГ и ФКЦ; модель системы управления электрическим режимом СТК и ДСП.

2. Проведен качественный анализ генерирующей способности СТК 330 МВАр. На основе полученного распределения токов прямой и обратной последовательной ДСП-250 и сопоставления его с областью рассеивания фактических токов сделан вывод о возможности дополнительного генерирования реактивной мощности в сеть 34,5 кВ в размере 50 МВАр.

3. С целью реализации функции демпфирования провалов напряжения средствами СТК 330 МВАр были переработаны алгоритмы работы существующей системы управления статическим тиристорным компенсатором. Усовершенствованная модель системы управления СТК включает в себя контур диагностики провалов напряжения в питающей сети и контур регулирования напряжения, выполненного на базе ПИД-регулятора. Результат исследований показал, что СТК 330 МВАр способен снижать однофазные провалы напряжения глубиной до 23% с длительностью до нескольких секунд до величины, позволяющей сохранить работоспособность АВ при работающей ДСП-250.

4. С учетом разработанной системы управления СТК 330 МВАр проведено исследование переходных процессов токов на входе активного выпрямителя и напряжения в звене постоянного тока в процессе демпфирования провалов напряжения. Доказано, что в этом случае напряжение в звене постоянного тока поддерживается на заданном уровне, а сетевые токи сохраняют свою величину и симметрию по фазам.

5. Проведена проверка адекватности результатов моделирования. Для фактических значений тока и мощности дуги с помощью распределения Стьюдента определены допустимые интервалы. Результат проверки показал, что расчетные значения, полученные на модели, не выходят за границы указанных интервалов.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА СТК ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ И ПРОКАТНЫХ КОМПЛЕКСОВ С УЧЕТОМ ФУНКЦИИ ДЕМПФИРОВАНИЯ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ**

Как было определено в ходе представленных выше исследований, СТК 330 МВАр способен производить демпфирование провалов напряжения после выполнения определённых мероприятий по усовершенствованию существующей системы управления. Для того чтобы произвести количественную оценку реактивной мощности, требуемой для демпфирования провалов напряжения, а также разработать исходя из этого новую методику выбора СТК, необходимо провести дополнительные исследования.

В сетях сверхвысоких напряжений (330-750 кВ) существуют следующие виды повреждений:

- трехфазное короткое замыкание;
- двухфазное короткое замыкание;
- двухфазное короткое замыкание на землю (две фазы соединяются между собой и замыкаются на землю);
- однофазное короткое замыкание.

Трехфазное КЗ характеризуется увеличением тока всех трех фаз и снижением напряжения. Таким образом, это симметричный режим и величина уровня напряжения при этом режиме работы находится на одинаковом уровне по всем фазам. Данный вид короткого замыкания является наиболее тяжелым для энергосистемы и должен быть, как можно быстрее отключен.

При двухфазном КЗ напряжение в двух фазах снижается. Токи проходят только в повреждённых фазах. В неповрежденной фазе ток отсутствует. Напряжение в неповрежденной фазе в два раза больше по модулю, чем напряжение в поврежденных фазах и имеет противоположный знак. Помимо этого существует еще двухфазное короткое замыкание на землю. Токи и напряжения при этом ведут себя точно так же, как и в предыдущем случае.

Однако этот вид повреждений в сетях с заземленной нейтралью является более опасным, т. к. линейные напряжения в месте короткого замыкания снижаются более значительно, чем при обычном двухфазном КЗ.

Однофазное КЗ – это вид короткого замыкания, обусловленный возникновением электрической связи одной из фаз с «землей». Данный вид КЗ существует только в сетях с глухозаземленной нейтралью. В сетях с изолированной нейтралью значение тока в поврежденной фазе относительно невелико, при этом напряжение в поврежденной фазе стремится к нулю, а в двух неповрежденных увеличивается в  $\sqrt{3}$  раза. Данный факт допускает дальнейшую эксплуатацию сети до момента обнаружения повреждения. Другая картина наблюдается в сетях с глухозаземленной нейтралью. Ток в данном случае ограничивается только сопротивлением источника питания, поэтому он является током КЗ. В этом случае поврежденный участок сети должен быть немедленно отключен средствами релейной защиты и автоматики [88, 89].

В результате исследований представленных в предыдущей главе была определена генерирующая способность СТК 330 МВАр, действующего на территории металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji». Данное решение потребовало помимо пересмотра существующей системы управления СТК еще и объединения шин электросталеплавильного и прокатного комплексов. Опираясь на полученные результаты, становится возможной разработка нового подхода к проектированию систем внутривозовского электроснабжения компактных металлургических заводов, позволяющая на ранних стадиях выбора параметров компенсирующего устройства заложить в СТК необходимый запас реактивной мощности, чтобы повысить устойчивость работы систем автоматизированного электропривода в условиях возникновения провалов напряжения.

Данная глава посвящена разработке методики выбора СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом функции демпфирования провалов напряжения. Исходные данные для анализа были получены на промышленной площадке металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji».

#### 4.1. Влияние конфигурации схемы электроснабжения предприятия на характер однофазных провалов напряжений

Рассмотренные в параграфе 1.2 существующие типы конфигураций схем электроснабжения металлургических заводов с электросталеплавильными и прокатными комплексами свидетельствуют о том, что зачастую высоковольтные сетевые трансформаторы имеют схему соединения обмоток  $Y/\Delta$ . В этой связи однофазные провалы напряжения, возникающие во внешней питающей сети, при трансформации во внутризаводскую сеть определенным образом меняют свой характер [90, 91]. Для исследования данного процесса с помощью разработанной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» (Рисунок 3.2) были получены осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ в момент возникновения однофазного напряжения глубиной  $\delta U = -30\%$  и длительностью  $t_{\text{пров}} = 200$  мс (Рисунок 4.1).

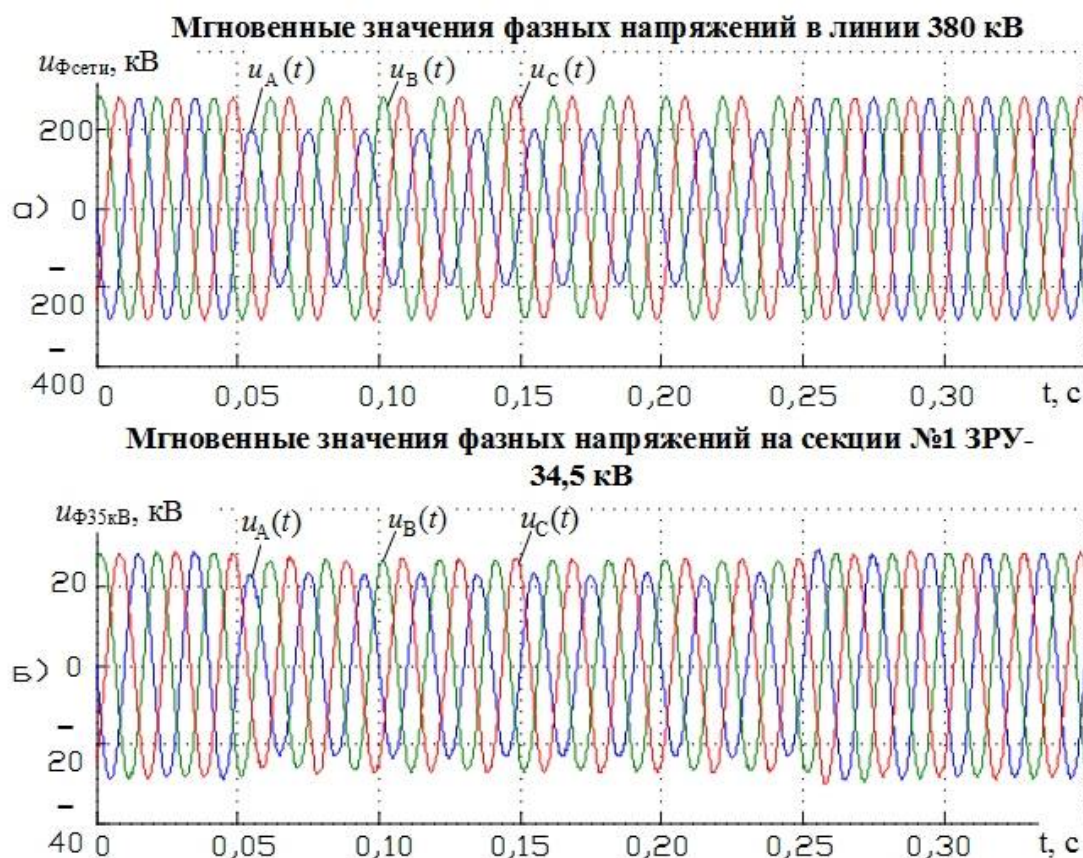


Рисунок 4.1 – Осциллограммы мгновенных значений напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ, иллюстрирующие особенности преобразования провала напряжения на сетевом трансформаторе 380/34,5 кВ

Достоверность полученных результатов подтверждается реальными осциллограммами токов и напряжений, полученных на ГПП предприятия ЗАО «ММК Metalurji» (Рисунок 2.4).

Как можно видеть из Рисунка 4.1 при снижении напряжения в фазе А сети 380 кВ происходит снижение напряжения в сети 34,5 кВ по всем фазам. Подробнее этот процесс иллюстрируют векторные диаграммы напряжений на секциях 380 и 34,5 кВ, при нормальной работе сети и при однофазном провале напряжения по стороне 380 кВ (Рисунок 4.2)

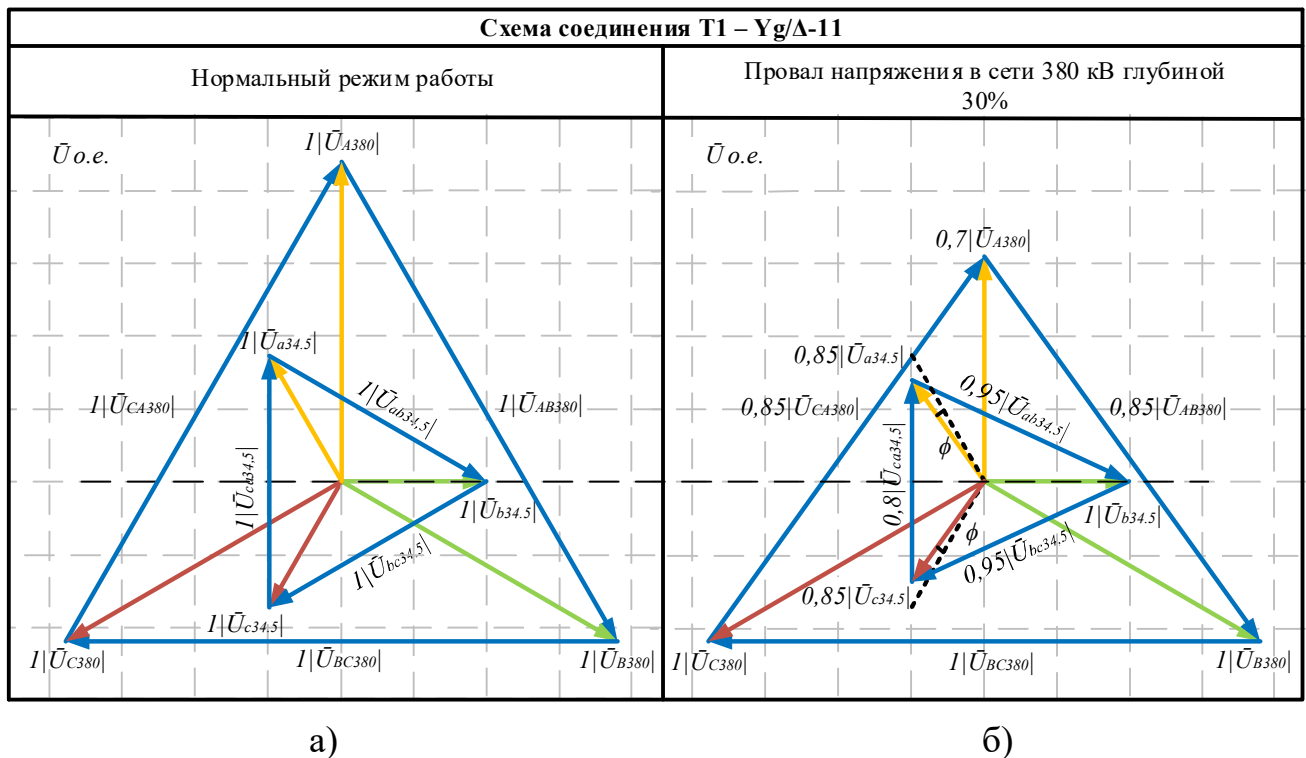


Рисунок 4.2 – Векторные диаграммы напряжений на секциях распределительных устройств 380 и 34,5 кВ, при нормальной работе сети (а) и при однофазном провале напряжения по стороне 380 кВ (б)

Из полученных векторных диаграмм видно, что при трансформации однофазного провала напряжения на вторичной обмотке сетевого трансформатора меняются длины векторов фазных напряжений: из однофазного провала глубиной 30% на шинах 380 кВ возникают двухфазные падения напряжения глубиной 21,49-17,74% и однофазное 8,45% в электрической сети 34,5 кВ. Данная особенность была учтена при разработке усовершенствованных алгоритмов

демпфирования провалов напряжения посредством использования резервов реактивной мощности СТК.

#### 4.2. Разработка методики выбора мощности СТК для выполнения дополнительных функций по демпфированию провалов напряжения

Как известно, протекание переменного тока по линиям электропередач сопровождается возникновением индуктивного сопротивления, которое обуславливает разность напряжений в начале и конце линий [92, 93]. Для вывода формулы требуемого значения реактивной мощности  $Q_{СТК}$  рассмотрим упрощённую схему системы электроснабжения промышленного предприятия ЗАО «ММК Metalurji» и её схему замещения (Рисунок 4.3, а, б).

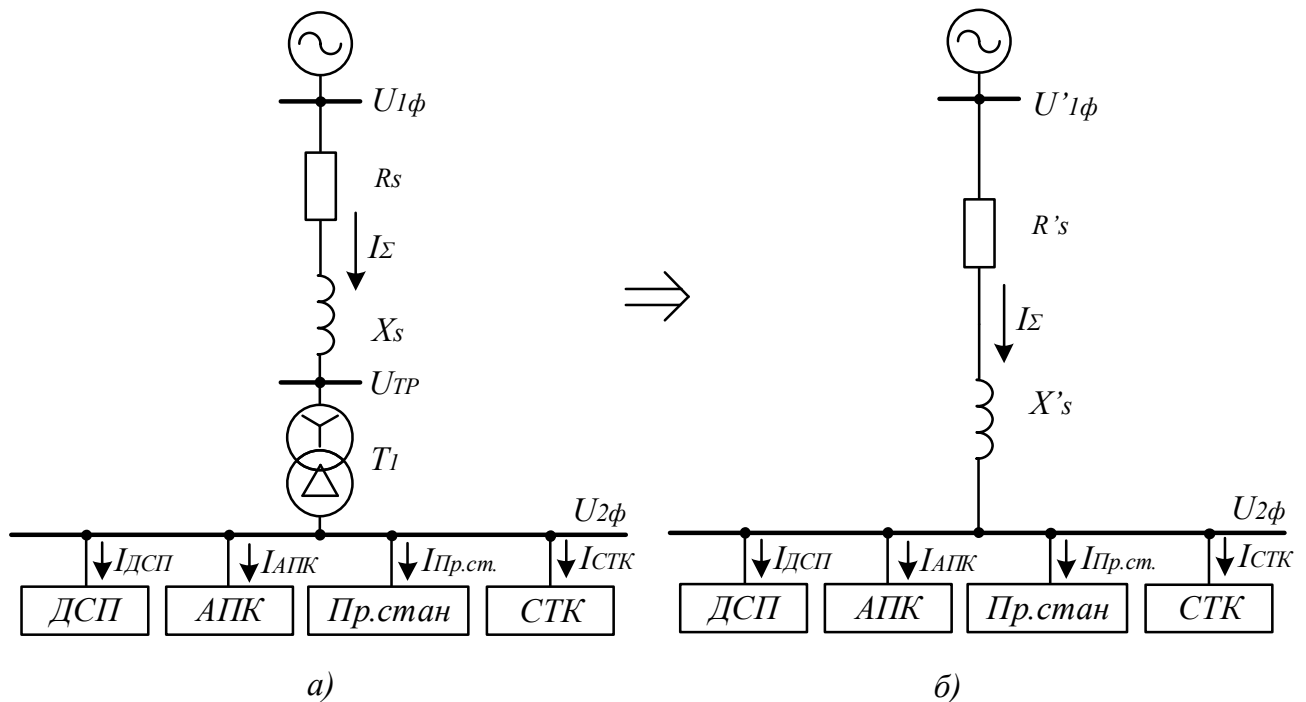


Рисунок 4.3 – Упрощённая схема системы электроснабжения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji» и её схема замещения

Определим потерю напряжения в ЛЭП 380 кВ. Для этого с помощью имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» построим векторную диаграмму токов и напряжений (Рисунок 4.5).

Для наглядности в ходе построения были увеличены значения сопротивлений линии. Рассмотрим этапы построения всех векторов.

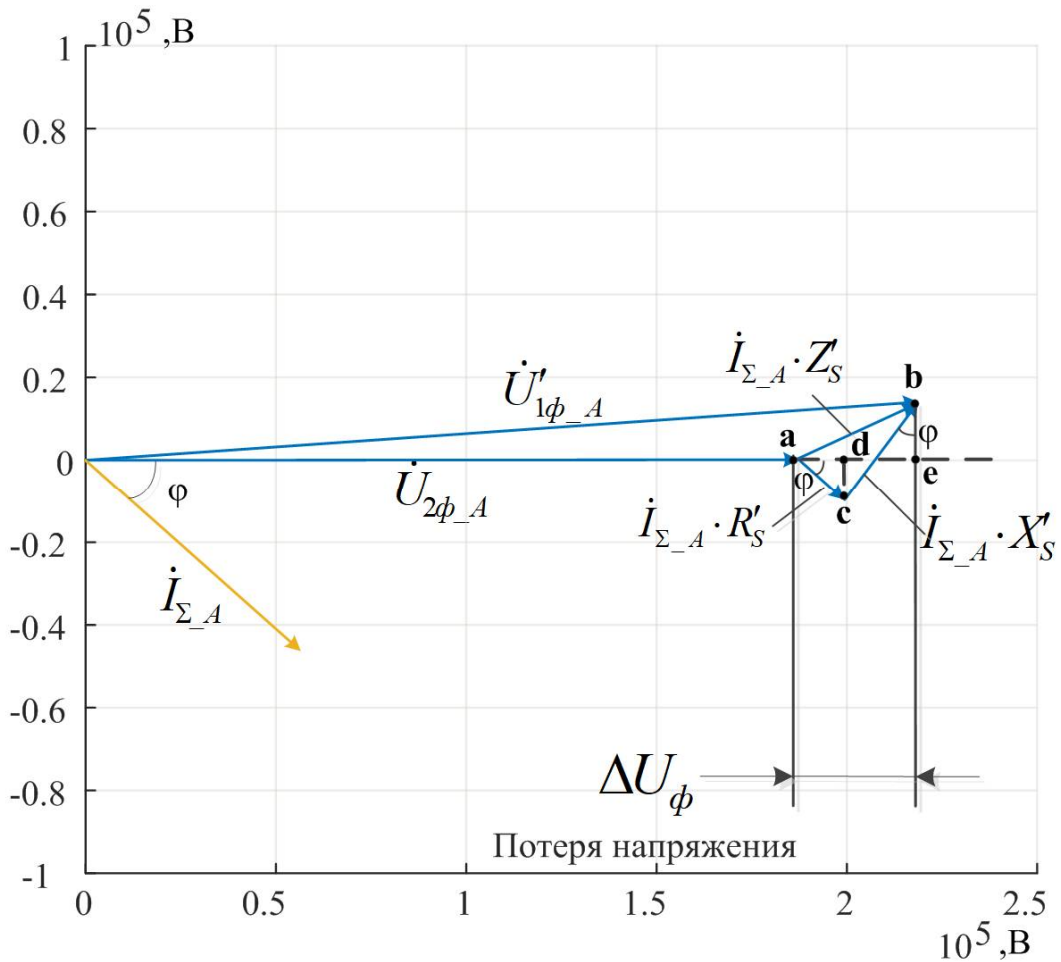


Рисунок 4.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений фазы А, характеризующие потери в питающей линии 380 кВ завода ЗАО «ММК Metalurji»

На Рисунке 4.5 показаны вектор напряжения в конце линии ( $\dot{U}_{2\phi\_A}$ ), и под углом  $\varphi$  вектор суммарного тока нагрузки фазы А –  $\dot{I}_{\Sigma\_A}$ . Чтобы найти напряжение в начале линии необходимо построить треугольник падений напряжения. Для этого из конца вектора  $\dot{U}_{2\phi\_A}$ , параллельно току  $\dot{I}_{\Sigma\_A}$ , откладывается вектор падения напряжения на активной составляющей сопротивления линии – вектор  $\dot{I}_{\Sigma\_A} \cdot R'_S$  (отрезок  $ac$ ). Перпендикулярно данному вектору строится вектор падения напряжения на реактивной составляющей сопротивления линии – вектор  $\dot{I}_{\Sigma\_A} \cdot X'_S$  (отрезок  $cb$ ). Геометрическая сумма векторов  $I \cdot R_S$  и  $I \cdot X_S$  даст полное падение напряжение в линии  $\dot{I}_{\Sigma\_A} \cdot Z'_S$ . Соединив точку  $O$  с концом вектора  $\dot{I}_{\Sigma\_A} \cdot Z'_S$  получим вектор

напряжения в начале линии  $\dot{U}'_{2\phi\_A}$ . Таким образом, падение напряжения в линии определяется как геометрическая разность между напряжениями в начале и конце линии.

Если пренебречь поперечной составляющей, то отрезок  $ae$  представляет собой алгебраическую разность между напряжением в начале и конце линии и называется **потерей напряжения**  $\Delta U_\phi$ .

Из векторной диаграммы видно, что вектор потерь напряжения состоит из отрезков  $ad$  и  $de$ :

$$\Delta U_\phi = ad + de; \quad (4.1)$$

где:

$$ad = \dot{I}_{\Sigma\_A} \cdot R'_S \cdot \cos(\varphi); \quad (4.2)$$

$$de = \dot{I}_{\Sigma\_A} \cdot X'_S \cdot \sin(\varphi). \quad (4.3)$$

Следовательно, получим следующее выражение:

$$\Delta U_\phi = I \cdot R_S \cdot \cos(\varphi) + I \cdot X_S \cdot \sin(\varphi). \quad (4.4)$$

Переходя от фазных напряжений к линейным, а также умножив и поделив каждое слагаемое на  $\sqrt{3} \cdot U$  получим окончательную формулу для определения потери напряжения в линии:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \left( \frac{P_\Sigma \cdot R_{s\_34,5кВ}}{\sqrt{3} \cdot U_{s\_34,5кВ}} + \frac{Q_\Sigma \cdot X_{s\_34,5кВ}}{\sqrt{3} \cdot U_{s\_34,5кВ}} \right) = \frac{P_\Sigma \cdot R_{s\_34,5кВ} + Q_\Sigma \cdot X_{s\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}}. \quad (4.5)$$

Относительная потеря напряжения будет равна:

$$\delta U = \delta U_{34,5кВ} = 2\delta U_{380кВ} = \frac{\Delta U}{U_{s\_34,5кВ}}, \quad (4.6)$$

где соотношение  $\delta U_{34,5кВ} = 2\delta U_{380кВ}$  обусловлено влиянием группы соединения сетевых трансформаторов 380/34,5 кВ на глубину провала напряжения при его трансформации со стороны первичной обмотки на вторичную.

Представим сопротивление сети как:



$$X_{s\_34,5кВ} = \frac{U_{s\_34,5кВ}^2}{S_{кз\_34,5кВ}}. \quad (4.7)$$

Тогда получим:

$$\Delta U = \frac{P \cdot R_{s\_34,5кВ} + Q \cdot \frac{U^2}{S_{кз\_34,5кВ}}}{U_{s\_34,5кВ}}. \quad (4.8)$$

Выражение для потери напряжения с учетом дополнительной активной нагрузки в относительных единицах будет иметь вид:

$$\delta U = \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2} + \frac{Q_{\Sigma}}{S_{кз\_34,5кВ}}. \quad (4.9)$$

Выразим из полученной формулы  $Q_{\Sigma}$ :

$$\frac{Q_{\Sigma}}{S_{кз\_34,5кВ}} = \delta U - \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}; \quad (4.10)$$

$$Q_{\Sigma} = S_{кз\_34,5кВ} \cdot \left( \delta U - \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2} \right). \quad (4.11)$$

Определим требуемое значение реактивной мощности  $Q_{СТК}$ :

$$Q_{СТК} - Q_{ДСП} = S_{кз\_34,5кВ} \cdot \left( \delta U - \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2} \right). \quad (4.12)$$

$$Q_{СТК} = S_{кз\_34,5кВ} \cdot \left( \delta U - \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2} \right) + Q_{ДСП}. \quad (4.13)$$

В представленной формуле:

$$P_{\Sigma} = P_{ДСП} + P_{АПК} + P_{ПР.СТАНА}; \quad (4.14)$$

$$Q_{\Sigma} = Q_{СТК} - Q_{ДСП}; \quad (4.15)$$

$$\cos(\varphi) = 0,72 - 0,8. \quad (4.16)$$

На имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» (Рисунок 3.2) были смоделированы трехфазные и однофазные провалы напряжения в сети 380 кВ различной глубины [94, 95]. В момент протекания провала напряжения записывались значения активной, реактивной и полной

мощности ДСП-250, мощности дуги и потерь активной мощности в зависимости от глубины провала напряжения, выраженной в относительных единицах (Приложение В). Полученные значения были обработаны в программном пакете MS Excel, в ходе чего построены соответствующие графики для трехфазного и однофазного провала напряжения (Рисунок 4.6, а - б). По данным характеристикам определены соответствующие уравнения регрессии, описывающие данные кривые.

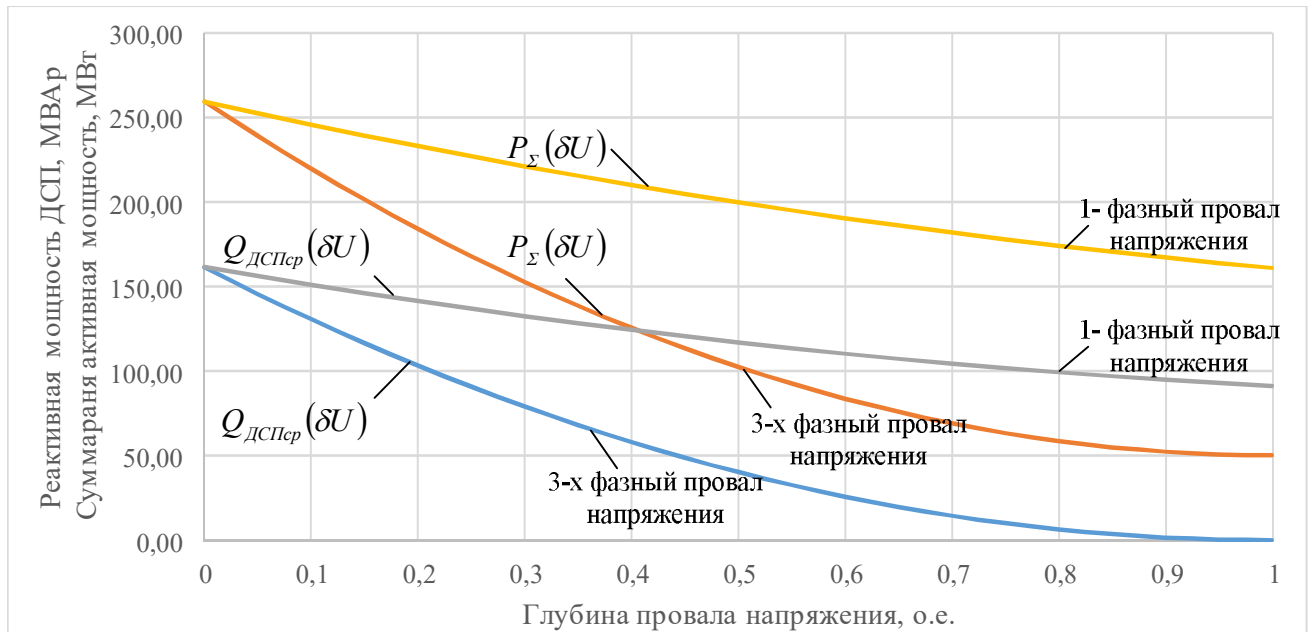


Рисунок 4.6 – Функции изменения суммарной активной мощности -  $P_{\Sigma}(\delta U)$  и реактивной мощности ДСП -  $Q_{ДСП}(\delta U)$  от глубины однофазного и трехфазного провалов напряжения

На данном этапе необходимо отметить, что трехфазный провал напряжения является наиболее тяжелым режимом работы по сравнению с однофазным, поскольку может быть вызван трехфазным коротким замыканием. В свою очередь однофазный провал напряжения более сложный с точки зрения моделирования и расчетов. В приведенных исследованиях рассматриваются два варианта КЗ.

По характеристикам (Рисунок 4.6) получены соответствующие уравнения регрессии:

- для случая с однофазным повалом напряжения:

$$P_{\Sigma}(\delta U) = 32,469 \cdot \delta U^2 - 110,42 \cdot \delta U + 165,87; \quad (4.17)$$

$$Q_{ДСП}(\delta U) = 37,872 \cdot \delta U^2 - 108,16 \cdot \delta U + 161,82; \quad (4.18)$$

- для случая с трехфазным повалом напряжения:

$$P_{\Sigma}(\delta U) = 166,06 \cdot \delta U^2 - 332,12 \cdot \delta U + 166,06; \quad (4.19)$$

$$Q_{ДСПср}(\delta U) = 161,64 \cdot \delta U^2 - 323,27 \cdot \delta U + 161,64. \quad (4.20)$$

Подставим полученные уравнения в выведенную ранее формулу (4.13):

- для случая с однофазным повалом напряжения:

$$Q_{СТК} = S_{кз\_34,5кВ} \cdot \left( \delta U - \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot (32,469 \cdot \delta U^2 - 110,42 \cdot \delta U + 165,87)}{U_{s\_34,5кВ}^2} \right) + \quad (4.21)$$

$$+ 37,872 \cdot \delta U^2 - 108,16 \cdot \delta U + 161,82;$$

- для случая с трехфазным повалом напряжения:

$$Q_{СТК} = S_{кз\_34,5кВ} \cdot \left( \delta U - \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot (166,06 \cdot \delta U^2 - 332,12 \cdot \delta U + 166)}{U_{s\_34,5кВ}^2} \right) + \quad (4.22)$$

$$+ 161,64 \cdot \delta U^2 - 323,27 \cdot \delta U + 161,64.$$

После упрощения получим:

- для случая с однофазным повалом напряжения:

$$Q_{СТК} = (37,872 - 32,469 \cdot \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot S_{кз\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U^2 + \quad (4.23)$$

$$+ (S_{кз\_34,5кВ} - 108,16 + 110,42 \cdot \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot S_{кз\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U +$$

$$+ (161,82 - 165,87 \cdot \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot S_{кз\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}).$$

- для случая с трехфазным повалом напряжения:

$$Q_{СТК} = (161,64 - 166,06 \cdot \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot S_{кз\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U^2 + \quad (4.24)$$

$$+ (S_{кз\_34,5кВ} - 323,27 + 332,12 \cdot \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot S_{кз\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U +$$

$$+ (161,64 - 166 \cdot \frac{R_{s\_34,5кВ} \cdot S_{кз\_34,5кВ}}{U_{s\_34,5кВ}^2}).$$

Произведем проверку полученных выражений посредством сравнения характеристики  $Q_{СТК} = f(\delta U)$  полученной непосредственно с комплексной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» и в результате расчетов по выражениям (4.23) и (4.24).

Построим на одном графике зависимость  $Q_{СТК} = f(\delta U)$ , полученную с помощью математических формул для однофазного и трехфазного провалов напряжения. Для этого подставим в формулы (4.23) и (4.24) различные значения глубины провала напряжения (Рисунок 4.7).

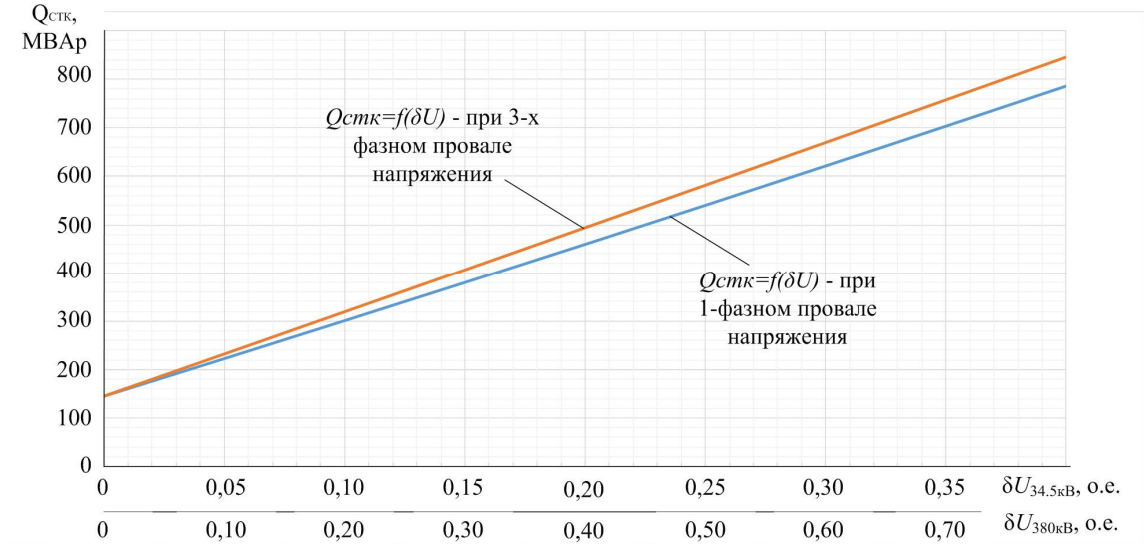


Рисунок 4.7 – Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от провалов напряжения при однофазном и трехфазном провалах, полученных с помощью математических формул

Теперь представим на одном графике зависимость  $Q_{СТК} = f(\delta U)$ , полученную с помощью имитационной модели для однофазного и трехфазного провалов напряжения (Рисунок 4.8).

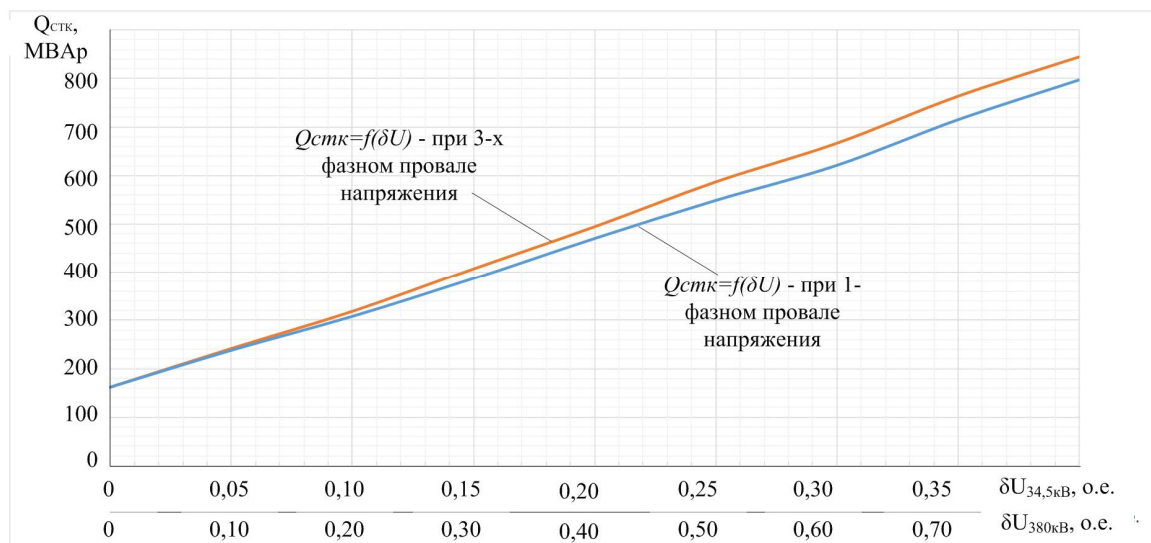


Рисунок 4.8 – Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от провалов напряжения при однофазном и трехфазном провалах, полученных с помощью имитационной модели

Таким образом, характеристики, полученные с помощью моделирования и расчетным путем, совпадают. Погрешность составила 2,6 %.

По результатам исследований, проведенных на математической модели (рисунок 4.8), определим разницу между графиками  $Q_{СТК} = f(\delta U)$  для случая с однофазным и трехфазным провалами напряжения. Ошибка в данном случае меняется от 1% до 7% относительного отклонения и в среднем находится на уровне 5,64%. Данное обстоятельство обусловлено несимметричными режимами работы СТК. Представим данную разницу графически на Рисунке 4.9.

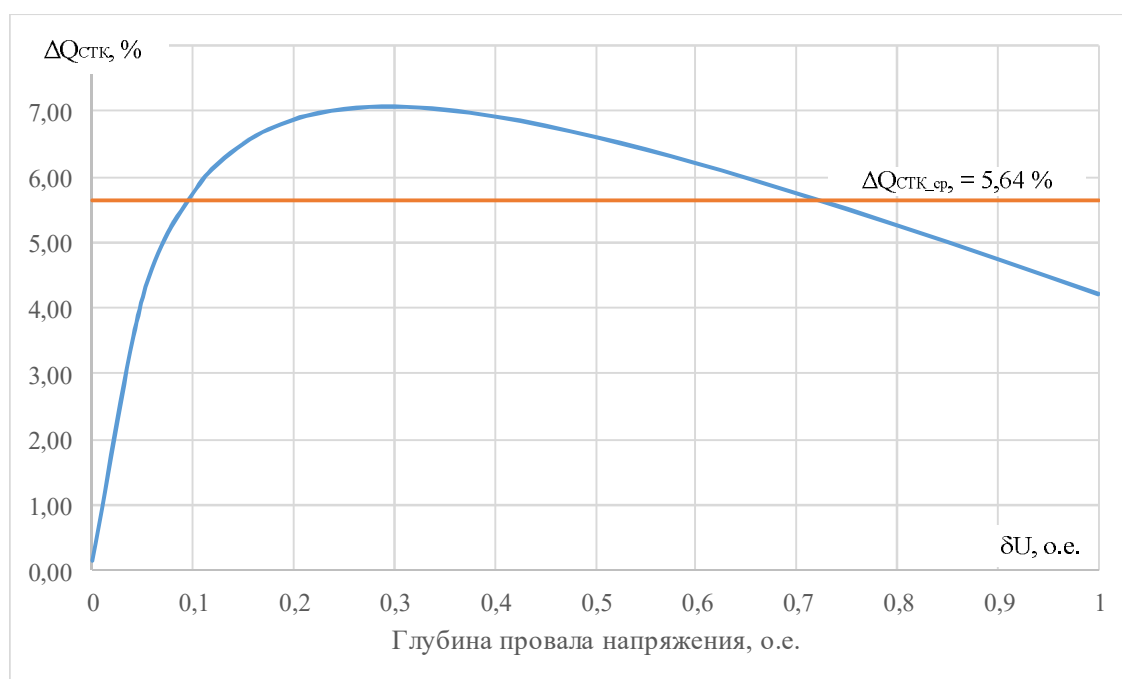


Рисунок 4.9 – Погрешность между графиками  $Q_{СТК} = f(\delta U)$  с однофазным и трехфазным провалами напряжения, полученных с помощью имитационной модели

Графически зависимость  $Q_{СТК} = f(\delta U_{380})$  при однофазном и трехфазном провалах напряжения показана на рисунке 4.10.

Как было сказано ранее, на главной понизительной подстанции (ГПП) предприятия установлен компенсатор мощностью 330 МВАр. Результаты моделирования показали, что при отключенном состоянии ДСП-250 СТК способен восстановить напряжение на шинах 34,5кВ после провала напряжения глубиной 30% на шинах 380 кВ до величины:

$$U_{a34,5кВ} = 0,95 \cdot U_{ном\_34,5кВ}; U_{b34,5} = 1 \cdot U_{ном\_34,5кВ}; U_{c34,5} = 0,95 \cdot U_{ном\_34,5кВ} \cdot$$

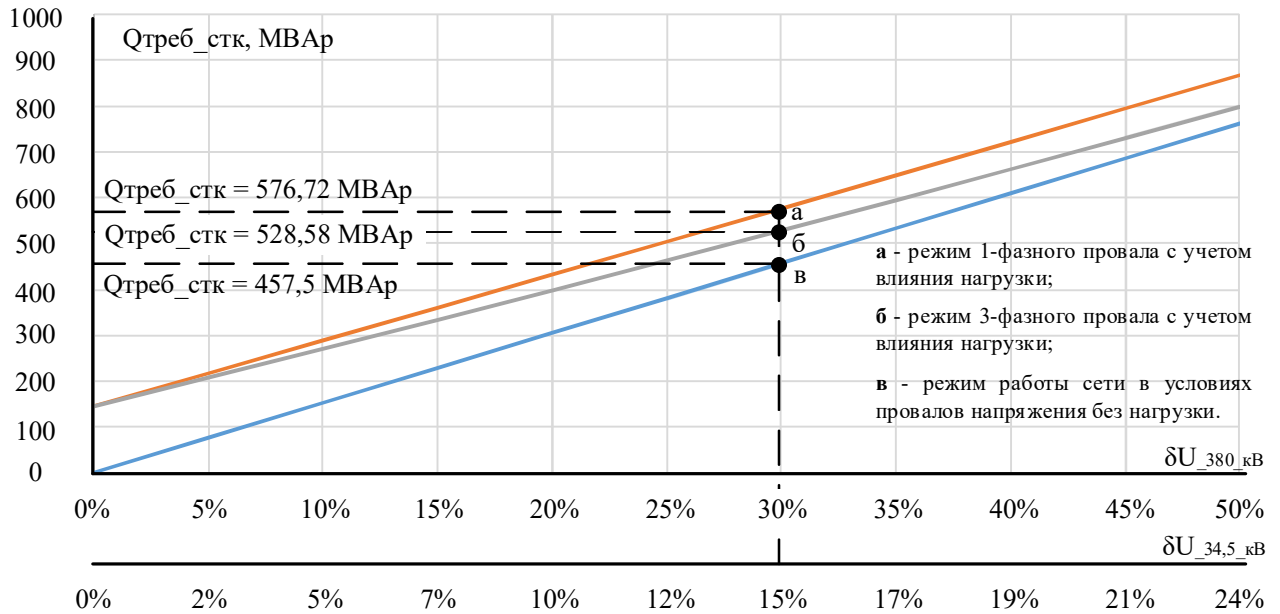


Рисунок 4.10 – Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от глубины однофазных (а) и трехфазных (б) провалов напряжения при включенном и отключенном (в) состоянии ДСП, УКП и приводов прокатного стана

При включенном состоянии ДСП-250:

$$U_{a34,5\text{кВ}} = 0,9 \cdot U_{\text{ном}_{34,5\text{кВ}}}; U_{b34,5} = 1 \cdot U_{\text{ном}_{34,5\text{кВ}}}; U_{c34,5} = 0,9 \cdot U_{\text{ном}_{34,5\text{кВ}}}.$$

Минимальная глубина провала напряжения в сети 380 кВ, которая способна вызвать превышение допустимого действующего значения тока на входе АВ (выше 1500 А), составляет 30%. Следовательно, чтобы полностью скомпенсировать такой провал мощности СТК 330 МВАр недостаточно, но ее достаточно для того, чтобы снизить его глубину ниже порогового значения, не представляющего опасность для электроприводов прокатного стана.

Таким образом, была сформулирована методика выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом новых дополнительных функций демпфирования провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети. Суть данной методики заключается в следующем: зная параметры питающей сети, параметры электротехнического и прокатного комплексов и имея статистику наиболее часто встречающихся в энергосистеме провалов напряжения, можно подставить имеющиеся данные в выражение (4.13) и определить требуемое количество реактивной мощности СТК, необходимое для

поддержания напряжения во внутриваровской сети выше установленного порогового значения.

### 4.3. Выводы по главе

В четвертой главе диссертационного исследования произведена разработка новой методики выбора СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом функции демпфирования провалов напряжения, а именно:

1. На основе анализа различных типов конфигураций схем электроснабжения металлургических заводов с электросталеплавильными и прокатными комплексами было показано, что однофазный провал напряжения, возникающий во внешней питающей сети, при трансформации на низкую сторону сетевого трансформатора со схемой соединения обмоток  $Y/\Delta$  меняет свой характер. С помощью векторных диаграмм доказано, что при однофазном провале напряжения на шинах цехового РУ наблюдается несимметричный трехфазный провал напряжения.

2. Получена расчетная зависимость требуемой реактивной мощности СТК. С помощью математического моделирования, на примере электротехнического комплекса «ДСП-СТК» ЗАО «ММК Metalurji», получены характеристики активной, реактивной и полной мощности ДСП-250, мощности дуги и потерь активной мощности в зависимости от глубины провала напряжения, выраженной в относительных единицах. По данным зависимостям выведены уравнения регрессии, которые позволили получить коэффициенты для формулы, определяющей требуемое значение реактивной мощности СТК при однофазном и трехфазном провалах напряжения. Произведено сравнение результатов полученных в ходе вычисления по расчетной формуле и в ходе моделирования. Погрешность составила 2,6 %.

3. Посредством анализа зависимости  $Q_{СТК} = f(\delta U)$  для однофазного и трехфазного провалов напряжения получен коэффициент демпфирования, равный 1,0445. Данное обстоятельство позволило определить новую упрощенную методику выбора мощности СТК, позволяющую производить компенсацию провалов напряжения различной глубины с учетом выполнения классических функций СТК по компенсации реактивной мощности ДСП.

## ГЛАВА 5. ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННЫХ МЕРОПРИЯТИЙ, НАПРАВЛЕННЫХ НА ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОТВЕТСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ ПРИВОДОВ ПРОКАТНЫХ СТАНОВ

Решая проблему демпфирования провалов напряжения, затрагивается важнейшая характеристика качества объекта – это надежность. Данная характеристика оценивает вероятность того, что элемент или система будет выполнять свои функции в течение определенного периода времени и с заданными параметрами. Негативное влияние на данный параметр оказывает увеличение вероятности возникновения отрицательных событий и их последствий, которые могут быть определены одним термином – **риск**. Для снижения последствий рискованных событий существует ряд процедур, связанных с идентификацией, анализом рисков и принятия решений [96, 97].

Процесс возникновения провалов напряжения в СЭС металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji» имеет случайный характер и несет в себе риски, связанные с производственными потерями, безопасностью производства работ и финансовыми убытками [98, 99]. В предыдущих главах была проведена статистическая обработка данных, свидетельствующих об аварийных остановках стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» и предложена методика расчета требуемой реактивной мощности СТК необходимой для выполнения функций демпфирования провалов напряжения. Помимо этого подтверждена гипотеза о том, что СТК способен выполнять свои функции при параллельной работе ДСП и прокатного стана.

Настоящая глава посвящена оценке снижения рисков связанных с отказами главных электроприводов стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» вызванных с провалами напряжения в сети 380 кВ с учетом разработанных мероприятий, направленных на повышение надежности электроснабжения оборудования.



### **5.1. Оценка требуемой мощности СТК для снижения числа аварийных отключений электроприводов стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji» при провалах напряжения**

В третьей главе диссертации была рассмотрена усовершенствованная система управления электрическим режимом СТК 330 МВАр. Комплекс принятых решений позволяет производить идентификацию провала напряжения на шинах 380 кВ ГПП предприятия и с помощью контура пофазного регулирования поддерживать напряжение в точке общего подключения электросталеплавильного и прокатного комплексов на заданном уровне.

Следующим шагом исследования является определение процента провалов напряжения, которые могли быть скомпенсированы, если бы предложенная усовершенствованная система управления СТК функционировала ранее [100-102]. Для данной цели были рассмотрены фактические провалы напряжения, произошедшие в сети 380 кВ, питающей предприятие ЗАО «ММК Metalurji», в период с 2012 по 2014 года.

Исследовалось три характерных режима:

- работающая ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр с реализованной функцией демпфирования провалов напряжения;
- отключенная ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр с реализованной функцией демпфирования напряжения;
- включенная ДСП-250 с классической системой управления СТК 330 МВАр.

Для исследования была использована имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК» (Рисунок 3.2).

В блоке трехфазного программируемого источника напряжения 380 кВ (*Three-phase programmable voltage source*) вводились реальные значения величин глубины провалов напряжения, произошедших в исследуемом периоде. При этом снимались действующие значения фазных напряжений в сети 34,5 кВ и рассчитывались их отклонения от номинального значения. Провал считался скомпенсированным, если величина отклонения составляла менее 10%. Результаты исследований представлены в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты исследования демпфирующей способности СТК 330 МВАр при различных режимах работы

Исследуемый период времени		С работающей ДСП и усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр		С отключенной ДСП и усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр		С включенной ДСП и классической системой управления СТК 330 МВАр	
		шт	%	шт	%	шт	%
2012 год	Всего провалов	25	100,00%	25	100,00%	25	100,00%
	Устранено	16	<u>64,00%</u>	20	<u>80,0%</u>	13	<u>52,00%</u>
	Не устранено	9	36,00%	5	20,00%	12	48,00%
2013 год	Всего провалов	72	100,00%	72	100,00%	72	100,00%
	Устранено	50	<u>69,44%</u>	58	<u>80,56%</u>	46	<u>63,89%</u>
	Не устранено	22	30,56%	14	19,44%	26	36,11%
2014 год	Всего провалов	40	100,00%	40	100,00%	40	100,00%
	Устранено	26	<u>65,00%</u>	28	<u>70,00%</u>	25	<u>62,50%</u>
	Не устранено	14	35,00%	12	30,00%	15	37,50%
Всего за период	Всего провалов	137	100,00%	137	100,00%	137	100,00%
	Устранено	92	<u>67,15%</u>	106	<u>77,37%</u>	84	<u>61,31%</u>
	Не устранено	45	32,85%	31	22,63%	53	38,69%

Таким образом, по результатам исследований можно сделать вывод, что порядка 67% провалов напряжения, произошедших в период 2012 – 2014 г. могли бы быть скомпенсированы СТК 330 МВАр с учетом того, что ДСП-250 в момент возникновения провала функционирует. При отключенной ДСП-250 демпфирующая способность СТК увеличивается. В этом случае удалось бы скомпенсировать 77% всех провалов.

Далее необходимо оценить демпфирующую способность СТК исходя из фактического времени работы печи в году.

## 5.2. Оценка демпфирующей способности статического тиристорного компенсатора с учетом фактического времени работы ДСП-250

Как было показано ранее, система управления СТК в классическом ее исполнении не способна выполнять функции по компенсации провалов напряжения. При этом с усовершенствованной системой управления демпфирование провалов становится возможным. Здесь стоит заострить внимание на том, что компенсирующая способность СТК розница с учетом того включена

ли в это время ДСП или нет. Исходя из этого, становится актуальным вопрос расчета вероятности того, что тот или иной провал напряжения, возникший в течение года, будет скомпенсирован.

Рассмотрим время работы дуговой сталеплавильной печи за год. По информации, полученной из центрального диспетчерского комплекса ЗАО «ММК Metalurji», рассчитаем номинальное время работы ДСП-250. Неплановые и аварийные простои в данном случае не рассматриваются, поскольку при подобных простоях печь отключена, соответственно демпфирующая способность СТК становится больше.

Под номинальным временем работы понимается:

$$T_{\text{раб.ном.}} = T_{\text{календарь}} - T_{\text{ППР}} - T_{\text{режим}}, \quad (5.1)$$

где:  $T_{\text{календарь}}$  - число часов в году, ч;

$T_{\text{ППР}}$  - время, отведенное на планово-предупредительные ремонты, ч;

$T_{\text{режим}}$  - время режимных простоев, ч.

Исходя из данных работы ДСП за несколько лет, примем, что:

$$T_{\text{раб.ном.}} = 6968 \text{ ч, при } T_{\text{календарь}} = 8760 \text{ ч.}$$

Отсюда следует, что в среднем по году ДСП находится в отключенном состоянии:

$$T_{\text{откл}} = T_{\text{календарь}} - T_{\text{раб.ном.}} = 8760 - 6968 = 1792 \text{ ч.} \quad (5.2)$$

Переведем полученное время в относительные единицы и сравним с демпфирующей способностью СТК 330 МВАр в момент включенной и отключенной ДСП 250. Результаты расчета приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Оценка времени работы ДСП и демпфирующей способности СТК

Режим работы ДСП-250	Процент от календарного времени	Процент скомпенсированных провалов напряжения за 2012-2014 г.
ДСП-250 в работе	79,55 %	67 %
ДСП-250 отключена	20,45 %	77 %

Рассчитаем вероятность демпфирования провалов напряжения с учетом фактического времени работы ДСП по формуле:

$$P = T_{\text{раб.ном.}} \cdot P_{\text{вкл.ДСП}} + T_{\text{откл.}} \cdot P_{\text{откл.ДСП}}, \quad (5.3)$$

где  $T_{\text{раб.ном.}}$  – среднее номинальное время работы ДСП в году, о.е.;

$T_{\text{откл.}}$  - среднее время в году в течение которого ДСП отключена, о.е.;

$P_{\text{вкл.ДСП}}$  – среднегодовой процент скомпенсированных провалов напряжения при включенной ДСП, о.е.;

$P_{\text{откл.ДСП}}$  – среднегодовой процент скомпенсированных провалов напряжения при отключенной ДСП, о.е.

Подставив все значения в (5.3), получаем:

$$P = T_{\text{раб.ном.}} \cdot P_{\text{вкл.ДСП}} + T_{\text{откл.}} \cdot P_{\text{откл.ДСП}} = 0,67 \cdot 0,7955 + 0,77 \cdot 0,2045 = 0,69.$$

Таким образом, с учетом фактического времени работы ДСП-250 статический тиристорный компенсатор мощностью 330 МВАр способен скомпенсировать 69% всех провалов напряжения.

Рассмотрим компенсирующую способность СТК 330 МВАр при работающей и отключенной ДСП-250 с усовершенствованной и классической системами управления электрическим режимом, с помощью коэффициента демпфирования (рисунок 5.1).

На имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК» (рисунок 3.2) была реализована работа всего комплекса в трех режимах:

- работающая ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр с реализованной функцией демпфирования провалов напряжения;
- отключенная ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр с реализованной функцией демпфирования напряжения;
- включенная ДСП-250 с классической системой управления СТК 330 МВАр.

Для каждого из режимов моделировались однофазные провалы напряжения глубиной  $\delta U$  от 0 до 100% (Приложение Г). Для каждого провала рассчитывался коэффициент демпфирования по формуле:

$$k = \frac{U_{34,5} - U_2}{U_{34,5}}, \quad (5.4)$$

где  $U_{34,5}$  – напряжения на шинах 34,5 кВ, кВ

$U_2$  – напряжение на шинах 34,5 кВ при возникновении провала напряжения в сети 380 кВ после работы системы демпфирования СТК 330 МВАр.

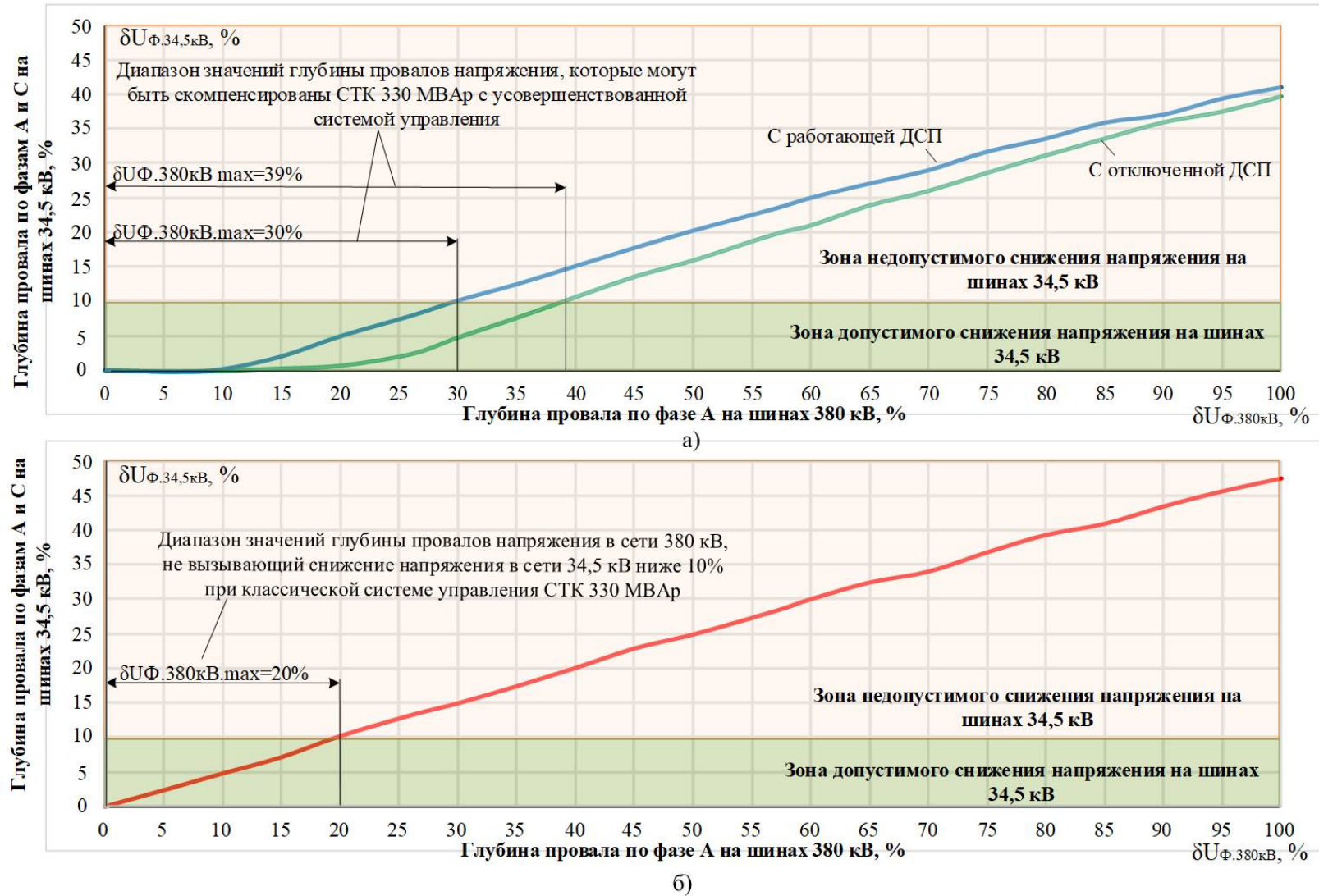


Рисунок 5.1 – Демпфирующая способность СТК 330 МВАр при: а) работающей и отключенной ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК; б) включенной ДСП с классической системой управления СТК

Как можно видеть из рисунка 5.1 (а) при работе усовершенствованной системы управления СТК диапазон значений глубины однофазных провалов напряжения в сети 380 кВ  $\delta U_{380\text{кВ}}$ , которые могут быть успешно скомпенсированы, составляет:

- при работающей ДСП-250: от 0 до 30%;
- при отключенной ДСП-250: от 0 до 39%.

Необходимо отметить, что при использовании классической системы управления СТК и параллельной работе электросталеплавильного и прокатного комплексов провалы глубиной  $\delta U_{380\text{кВ}} \leq 20\%$  не вызывали бы отключения электроприводов стана горячей прокатки 1750 (рисунок 5.1, б).

Увеличение демпфирующей способности СТК и рост процента скомпенсированных провалов напряжения можно получить, увеличив установленную мощность СТК, применив упрощенную методику, описанную в главе 4 на стадии проектирования. В этом случае при перенастройке системы управления на пофазное регулирование напряжения удастся добиться повышение надежности электроснабжения ответственных электроприемников.

### **5.3. Проверка возможности параллельной работы ДСП и главных электроприводов прокатного стана 1750**

Реализация способа демпфирования однофазных провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети предприятия ЗАО «ММК Metalurji» подразумевает параллельную работу агрегатов стана 1750 горячей прокатки с дуговой сталеплавильной печью и установкой ковш-печь.

При подключении дополнительной нагрузки на секцию 34,5 кВ ГПП необходимо оценить степень увеличения загрузки двух сетевых трансформаторов Т3 и Т4 380/34,5 кВ. С учетом, что СТК 330 МВАр в продолжительном режиме обеспечивает поддержание нулевой реактивной мощности комплекса, изменение коэффициента загрузки трансформаторов Т3 и Т4 будет обусловлена только увеличением потребления активной мощности.

Суммарная мощность приводов стана 1750 горячей прокатки составляет:

$$P_{\text{пр.стан.}} = P_{\text{ЭП.черн.клеть1}} + P_{\text{ЭП.черн.клеть2}} + P_{\text{ЭП.чист.клеть1}} + P_{\text{ЭП.чист.клеть2}} + P_{\text{ЭП.чист.клеть3}} + P_{\text{ЭП.чист.клеть4}} = 6,6 + 7,8 + 9,5 + 9,5 + 8,5 + 8,5 = 50,4 \text{ МВт}, \quad (5.6)$$

где  $P_{ЭП.черн.клеть1-2}$  и  $P_{ЭП.чист.клеть1-4}$  – номинальные мощности электроприводов черновых и чистовых клетей стана горячей прокатки 1750.

В исходном режиме коэффициент загрузки Т3 и Т4 при условии  $Q_{СТК} = 0$  МВАр и существующем ограничении по потреблению активной мощности ДСП ( $P_{ДСПmax} = 150$  МВт) составляет:

$$K_{3\_1} = \frac{S_{ПТ.ДСП.огр.} \cdot \cos(\varphi)_{ДСП.ном.} + S_{ПТ.УКП.ном.} \cdot \cos(\varphi)_{УКП.ном.}}{2 \cdot S_{ном}} = \quad (5.6)$$

$$= (200 \cdot 0,75 + 53 \cdot 0,82) / 2 \cdot 155 = 0,62.$$

С учетом дополнительной нагрузки прокатного комплекса получим:

$$K_{3\_2} = \frac{S_{ПТ.ДСП.огр.} \cdot \cos(\varphi)_{ДСП.ном.} + S_{ПТ.УКП.ном.} \cdot \cos(\varphi)_{УКП.ном.} + P_{пр.стан.}}{2 \cdot S_{ном}} = \quad (5.7)$$

$$= (200 \cdot 0,75 + 53 \cdot 0,82 + 50,4) / 2 \cdot 155 = 0,79.$$

В формулах 5.6-5.7:

$S_{ПТ.ДСП.огр.}$  - мощность печного трансформатора ДСП 250 в условиях ограничения потребляемой активной мощности, МВА;

$\cos(\varphi)_{ДСП.ном.}$  - коэффициент мощности печного трансформатора ДСП 250;

$S_{ПТ.УКП.ном.}$  - мощность печного трансформатора установки печь-ковш, МВА;

$\cos(\varphi)_{УКП.ном.}$  - коэффициент мощности печного трансформатора установки печь-ковш;

$S_{ном}$  - номинальная мощность сетевого трансформатора, установленного на ГПП предприятия, МВА.

При отсутствии ограничения на потребление активной мощности ДСП-250, накладываемом со стороны электроснабжающей организации, максимальный коэффициент загрузки будет равен:

$$K_{3\_3} = \frac{S_{ПТ.ДСП.ном.} \cdot \cos(\varphi)_{ДСП.ном.} + S_{ПТ.УКП.ном.} \cdot \cos(\varphi)_{УКП.ном.} + P_{пр.стан.}}{2 \cdot S_{ном}} = \quad (5.8)$$

$$= (300 \cdot 0,75 + 53 \cdot 0,82 + 50,4) / 2 \cdot 155 = 1,03.$$

Однако, необходимо отметить, что одновременное потребление номинальных мощностей ДСП, УКП и прокатного стана является маловероятным из-за циклических графиков электрических нагрузок ДСП-250, УКП и группы

прокатных клетей. Поэтому средняя величина коэффициента загрузки будет находиться около оптимального значения  $K_{загр.} = 0,7$ . Таким образом, включение электроприводов клетей прокатного стана на параллельную работу с электросталеплавильным комплексом возможно при существующих мощностях сетевых трансформаторов.

Также в случае параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов необходимо обеспечивать согласованную работу прокатного стана и ДСП для исключения работы АВ в кратковременные периоды сильных искажений напряжения. Например, при включении ненагруженного печного трансформатора в сети 34,5 кВ могут возникать провалы напряжения из-за броска тока намагничивания. Также при включении фильтрокомпенсирующих цепей (ФКЦ) СТК в сети возникают кратковременные перенапряжения, величина которых может достигать 30% от номинального уровня. Поэтому необходимо исключить работу прокатного стана в моменты включения печного трансформатора или ФКЦ СТК во избежание аварийного отключения ПЧ с АВ.

Исследования, посвященные повышению устойчивости работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутации электрооборудования электросталеплавильного комплекса отражены в работах [103-105]. В рамках данных исследований, была разработана математическая модель ПЧ с АВ для варианта алгоритма ШИМ с удалением выделенных гармоник. Таким образом, производились исследования работы АВ при нормальном режиме работы и в случаях возникновения провалов напряжения в питающей сети. При этом проводился анализ сетевых токов на входе активного выпрямителя и напряжения в звене постоянного тока.

Основная идея указанных выше исследований заключается в усовершенствовании существующей системы управления АВ, которая смогла бы обеспечить повышение устойчивости ПЧ с АВ в случае параллельной работы с ДСП за счет потребления реактивной мощности из питающей сети. Для этого в существующую систему управления АВ добавлен блок сравнения уровня напряжения питающей сети и напряжения на входе АВ, в котором происходит формирование тока задания по реактивной составляющей. Предложенное решение сможет обеспечить надежную работу ПЧ с АВ в моменты коммутации ФКЦ СТК с сетью.

Также в моменты включения печного трансформатора на холостом ходу, при бросках тока намагничивания, в качестве дополнительных мероприятий авторами было предложено использовать усовершенствованную систему



управления АВ при алгоритмах ШИМ с двухконтурной системой управления. В данном случае броски тока не будут оказывать критического воздействия на систему управления АВ.

В результате описанных решений достигается снижение амплитуд бросков тока и отклонений напряжений в звене постоянного тока ПЧ-АВ ниже значений уставок срабатывания защиты.

Предложенные рекомендации по усовершенствованию системы регулирования СТК предусматривают преобразования в системе электроснабжения (Рисунок 5.2).

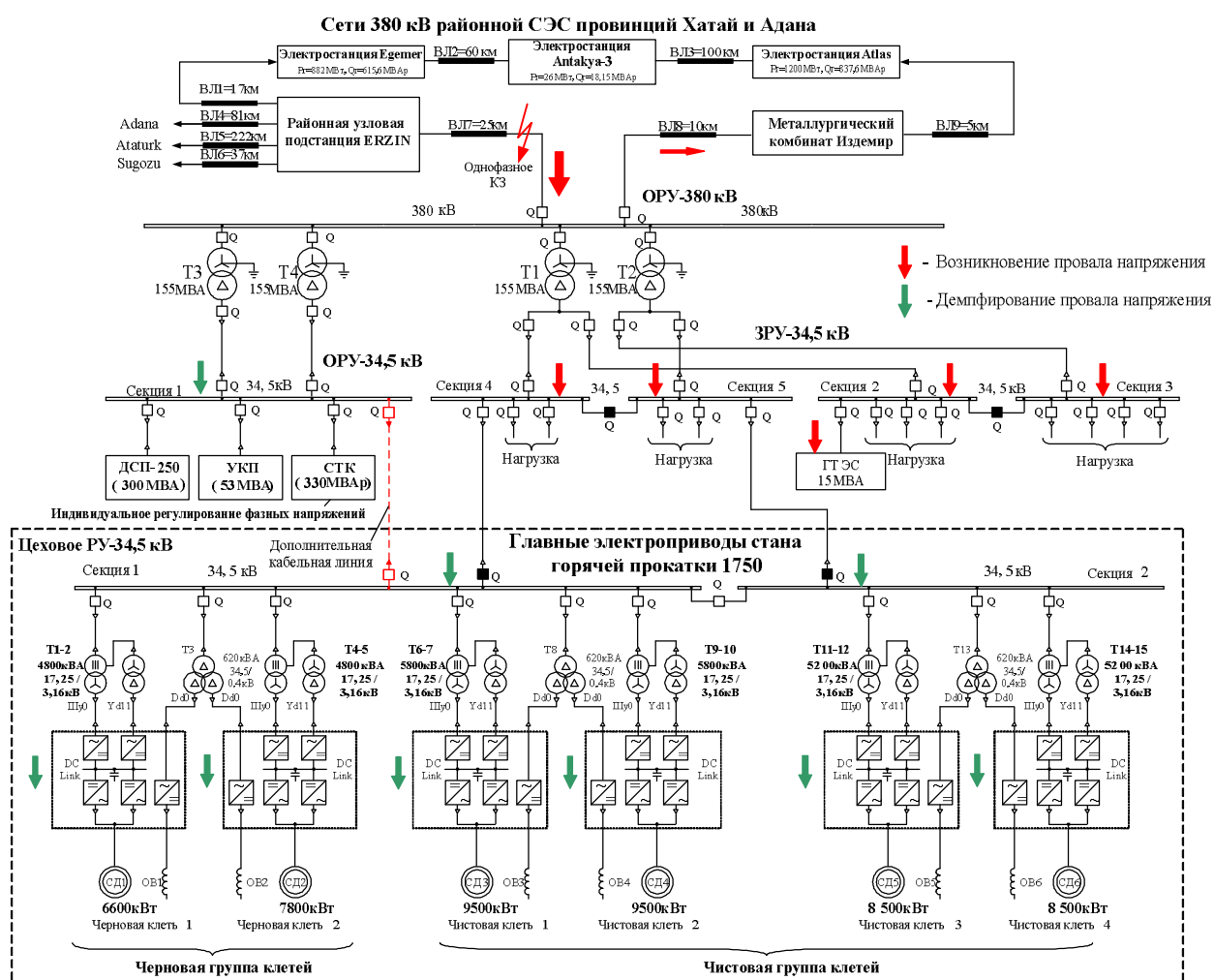


Рисунок 5.2 – Преобразованная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji»

Таким образом, реализация функций демпфирования провалов напряжения возможна за счет прокладки дополнительной кабельной линии между ОРУ-34,5 кВ сталеплавильного комплекса и РУ-34,5 кВ стана 1750 горячей прокатки, что обеспечит их параллельную работу. Как видно из распределения провалов напряжения во внутривародской сети (Рисунок 5.2) провалы напряжения во

внешней питающей сети 380 кВ не приведут к отключению главных приводов прокатных клетей.

#### **5.4. Выводы по главе**

1. Проведена оценка требуемой мощности СТК 330 МВАр необходимой для снижения числа отказов электроприводов стана 1750 горячей прокатки ЗАО «ММК Metalurji», вызванных однофазными провалами напряжения. Определено, что с усовершенствованными алгоритмами управления при включенной ДСП-250 СТК способен скомпенсировать 67% процентов всех провалов напряжения, а при отключенной порядка 77%.

2. Выполнен анализ компенсирующей способности СТК 330 МВАр с учетом фактического времени работы ДСП-250. Результат показал, что вероятность компенсации всех провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети 380 кВ, составляет 0,69 или 69%.

3. Произведена проверка коэффициента загрузки сетевых трансформаторов 155 МВА, установленных на ГПП предприятия ЗАО «ММК Metalurji». С учетом объединения шин распределительных устройств прокатного и сталеплавильного комплексов на параллельную работу произойдет увеличение суммарной мощности на 50,4 МВт. Учитывая ограничения по потреблению активной мощности ДСП, установленные электроснабжающей организацией завода, и за циклических графиков электрических нагрузок ДСП-250, УКП и группы прокатных клетей, коэффициент загрузки сетевых трансформаторов 155 МВА составляет 0,7.

4. Представлена преобразованная однолинейная схема электроснабжения металлургического завода ЗАО «ММК Metalurji», отличительной особенностью, которой является прокладка дополнительной кабельной линии, соединяющей шины ОРУ-34,5 кВ сталеплавильного комплекса и РУ-34,5 кВ стана 1750 горячей прокатки, обеспечивая тем самым их параллельную работу. Отмечено, что при реализации предложенные мероприятия должна быть исключена работа клетей прокатного стана 1750 в моменты включения печного трансформатора или ФКЦ СТК во избежание аварийного отключения ПЧ с АВ.

5. Эффективность предложенных научных решений подтверждена актом об использовании результатов диссертации в рамках предприятия ЗАО «ММК Metalurji» (Приложение Д).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ влияния провалов напряжения в системах внутризаводского электроснабжения на работу мощных электроприемников металлургического предприятия.

2. Разработана имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК», включающая в себя все основные элементы данной системы и отражающая реальные физические процессы, протекающие в моменты провалов напряжения. Определены пределы генерирования реактивной мощности при работающей и отключенной печи.

3. Доказана возможность включения на параллельную работу электроприемники прокатных станов и электросталеплавильного комплекса, при которой секции шин электросталеплавильного и прокатного комплексов объединены между собой, а также дана оценка возможности функционирования ПЧ с АВ и ДСП в условиях сильной несимметрии и колебаний напряжения, вызванных работой дуговой печи.

4. Разработана усовершенствованная система управления СТК дуговой сталеплавильной печи, обеспечивающая демпфирование провалов напряжения в системе внутризаводского электроснабжения, дополненная контурами регулирования напряжения, имеющими в своём составе пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы, и контуром диагностики провалов напряжения в питающей сети.

5. Разработана методика выбора СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом функций демпфирования провалов напряжения, заключающаяся в прогнозировании необходимого количества реактивной мощности, которую необходимо заложить в СТК, для обеспечения бесперебойного электроснабжения и безаварийного производства.

6. Даны рекомендации по построению систем внутризаводского электроснабжения компактных металлургических предприятий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций : учебник для вузов / Б.Н. Неклепаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.
2. ФГБУ ВНИИ Труда: Metallurgy. Аналитическая справка: Москва, 2019 – URL: <http://spravochnik.rosmintrud.ru> (дата обращения: 03.05.2021). – Текст: электронный.
3. Целиков, А.И. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т.3 Машины и агрегаты для производства и отделки проката: учебник для вузов / А.И. Целиков, П.И. Полухин, В.М. Гребенник [и др.] ; - М.: Металлургия, 1988. – 680 с.
4. BUSINESS GUIDE (Металлургия): Тематическое приложение к газете «Коммерсантъ» / Газета "Коммерсантъ". – 2006. №91. – С. 30.
5. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
6. Карташев, И.И. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов, Ю.В. Шаров, А.Ю. Воробьев – М.: Издательский дом МЭИ, 2006 – 320 с.
7. Корнилов, Г.П. Компенсирующие устройства в системах промышленного электроснабжения / Г.П. Корнилов, А.С. Карандаев, А.А. Николаев, А.Н. Шеметов, Т.Р. Храмшин, В.Р. Храмшин, А.Г. Медведев // Монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – 2012. – 235 с.
8. Корнилов, Г.П. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей широкого класса / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Д.Ю. Пястолова // Электротехнические системы и комплексы. – 2016. – № 1 (30). – С. 34-38.
9. Zhao, Z.Y. Application of TCR-Type SVC in Power Substation and Electric Arc Furnaces / Z.Y. Zhao, C.H. Chen, S.X. Bao, T.X. Fang, X.H. Wang // Proceedings

of the Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES, – New Orleans, LA, USA, – 2010. – pp. 1-4.

10. Zhao, Z.Y. Operation Test and Industrial Application of SVC for Mitigation Flicker from Electric Arc Furnace / Z.Y. Zhao, C.H. Chen, S.X. Bao, X.H. Wang // Proceedings of the Electricity Distribution, 2008. CIGRE 2008. China International Conference on. Guangzhou. China. 2009. pp.1-3. DOI: 10.1109/ CIGRE.2008.5211750.

11. Grünbaum, R. SVC for Maintaining of Power Quality in the Feeding Grid in Conjunction with an Electric Arc Furnace in a Steel Plant / R. Grünbaum, D. Dosi, L. Rizzani // Proceedings of the Electricity Distribution, 2005. CIGRE 2005. 18th International Conference and Exhibition on. Turin. – Italy. – 2010. – pp.1-5.

12. Morello, S. Installation, Startup and Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade / S. Morello, T.J. Dionise, T.L. Mank // Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting, – 2015. – IEEE. Addison, TX, USA. – pp. 1-9.

13. Grünbaum, R. Powerful Reactive Power Compensation of a Very Large Electric Arc Furnace / R. Grünbaum, P. Ekström , A.A. Hellström // Proceedings of the Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on. – Istanbul, Turkey. – 2013. – pp. 277-282.

14. Deaconu, S.I., Comprehensive Analysis for Modernization of 100 t Electric Arc Furnace for Steel Production / S.I. Deaconu, M. Topor, G.N. Popa, P. Iosif // Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE. – Houston. TX. USA. – 2009. – pp.1-6.

15. Kashani, M.G. SVC and STATCOM Application in Electric Arc Furnace Efficiency Improvement / M.G. Kashani, S. Babaei, S. Bhattacharya // Proceedings of the Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2013 4th IEEE International Symposium on. Rogers, – AR, USA. 2013. – pp. 1-7.

16. Liu, Y.W. Improvement of Power Quality by using Advanced Reactive Power Compensation / Y.W. Liu, S.I. Rau, C.J. Wu, W.J. Lee. // Proceedings of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS), – 2016 IEEE/IAS 52nd. – Detroit, MI, USA. 2016. – pp. 1-6.

17. Grünbaum, R. STATCOM, a Prerequisite for a Metl Shop Expansion – Performance Experiences / R. Grünbaum, T. Gustafsson, J.P. Hasler, T. Larsson, M. Lahtinen // Power Tech Conference Proceedings. – IEEE. – Bologna. Italy. – 2003. – pp.1-6.

18. Larsson, T. SVC Light: a utility's aid to restructuring its grid / T. Larsson, R. Grünbaum., B. Ratering-Schnitzler // Proceedings of the Power Engineering Society Winter Meeting, – 2000. – IEEE. – pp. 2577-2581.

19. Grünbaum, R. Voltage Source Converters for maintaining of power quality and stability in power distribution / R. Grünbaum // Proceedings of the Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on. Dresden. Germany. – 2005. – pp. 1-10.

20. Mazzanti, G. The State of the Art about Electric Arc Furnaces for Steel Use and the Compensation of their Perturbing Effects on the Grid / G. Mazzanti, L. Lusetti, A. Fragiaco // Proceeding of the Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2012 International Symposium on. Sorrento. –Italy. – pp. 1277-1282.

21. White, R.S. Design, Analysis and Operation of the Electrical Distribution System for a Modern Electric Arc Furnace and Ladle Melt Furnace / R.S. White, T.J. Dionise, J.A Baron // Proceedings of the Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. – IEEE. Houston, TX, USA. – 2009. – pp. 1-7.

22. Hingorani, N. G. Understanding FACTS. Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems / N.G. Hingoran, L. Gyugyi // IEEE Press book. – 2000. – 432 p.

23. Кабышев, А.В., Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / А.В. Кабышев // Томск: Изд-во Томского политехнического университета, – 2012. – 234 с.

24. Ольшванг, М.В. Фильтрокомпенсирующие цепи статических компенсаторов / М.В. Ольшванг, Е.В. Рычков, К.Е. Ананиашвили, В.С. Чуприков. // Электричество. – 1990. №1. – С. 23-29.

25. 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.
26. Depommier, B. Static Var Compensator Upgrade in a Steel Mill / B. Depommier, J. Stanley // Proceedings of the Power Engineering Society General Meeting, 2003, – IEEE. – Toronto. Ont. Canada. – 2003. – pp. 362-365.
27. Chen, C.S. Mitigation of Voltage Fluctuation for an Industrial Customer with Arc Furnace /C.S. Chen, H.J. Chuang, C.T. Hsu, S.M. Tseng // Proceedings of the Power Engineering Society Summer Meeting. – Vancouver. BC. Canada. – 2001. – pp. 1610-1615.
28. Benton, J.S. Virtual Instrument Measures Harmonic Filter Duty / J.S. Benton // IEEE Computer Applications in Power. – Vol. 8, Issue 4, – 1995. – pp. 43-46.
29. Mehrabah, B. SVC Refurbishment for Smart Grid Power Quality Enhancement and Life Extension / B. Mehraban, 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.
30. 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.
31. Yano, M. Suppression and Measurement of Arc Furnace Flicker with a Large Static Var Compensator / M. Yano, M. Takeda, S. Yuya, S. Sueda // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-98. Issue 6. 1979.
32. Wei, W. Application of Hybrid Active Power Filter in Net short's Harmonic Suppression of Electric Arc Furnace / W. Wei, P. Xue, L. Wei // Proceedings of the Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on. Beijing. China. 2009. pp. 898-901.
33. Bhonsle, D.C., Design and Analysis of Composite Filter for Power Quality improvement of Electric Arc Furnace / D.C. Bhonsle, R.B. Kelkar // Proceedings of the

Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS), 2013 3rd International Conference on. Istanbul. Turkey. 2013. pp. 1-10.

34. Храмшин, Т.Р. Обеспечение электромагнитной совместимости мощных электротехнических комплексов / Т.Р. Храмшин, И.Р. Абдулвелеев, Г.П. Корнилов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. Т. 15. №1. – С. 82-93.

35. Николаев, А.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 1 / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // Электротехнология. – 2014. №5. – С. 15-22.

36. Николаев, А.А. Исследование режимов работы дуговых сталеплавильных печей в комплексе со статическими тиристорными компенсаторами реактивной мощности. Часть 2 / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, И.А. Якимов // Электротехнология. – 2014. №6. – С. 9-13.

37. 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.

38. Храмшин, Т.Р. Способы повышения устойчивости электроприводов непрерывных производств при провалах напряжения / Т.Р. Храмшин, Г.П. Корнилов, Д.С. Крубцов, А.А. Николаев, О.И. Карандаева, П.Ю. Журавлев // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика». – 2014. Вып. 14. №2. – С. 80-87.

39. Haijun, T. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition / T. Haijun, H. Di // Advances in Electronic Engineering, Communication and management. Lecture Notes in Electrical Engineering. – Vol.139. – 2012. – pp. 267-272.

40. Haijun, T. Study of Control Strategy Based Dual-PWM Converter under Unbalanced Input Voltage Condition / T. Haijun, H. Di // Advances in Electronic Engineering, Communication and management. Lecture Notes in Electrical Engineering. – Vol.139. – 2012. – pp. 267-272.



41. Карташев И.И., Плакида А.В., Хромышев Н.К. Анализ провалов напряжения в электрических сетях 100/220 кВ / И.И. Карташев, А.В. Плакида, Н.К. Хромышев // Электричество. – 2005. – № 4. – С. 2-8.

42. Шпиганович, А.Н. Провалы напряжения в электрических системах предприятий / А.Н. Шпиганович, И.С. Муров // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 2-4 (7). – С. 6-7.

43. Николаев, А.А. Анализ провалов напряжения в районных электрических сетях 380 кВ провинций 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.

44. 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.

45. Корнилов, Г.П. Особенности электроснабжения металлургического завода «ММК-Metalurji» / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, А.В. Ануфриев, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев, В.Б. Славгородский // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. № 20. – С. 235-238.

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

47. Николаев, А.А. Анализ влияния коротких замыканий в электрической сети 380 кВ на провалы напряжения в системе внутриводского электроснабжения металлургического завода ЗАО "ММК METALURJI" (г. Искендерун, Турция) / А.А. Николаев, Е.С. Буксартов, А.С. Даниленко, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев // 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.

48. 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.

49. Николаев, А.А. Анализ влияния различных алгоритмов ШИМ активных выпрямителей многоуровневых ПЧ на устойчивость работы при провалах напряжения / А.А. Николаев, И.Г. Гилемов, А.С. Денисевич // Электротехнические системы и комплексы. – 2018. №3 (40). – С.55-62.

50. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электротехнического комплекса «дуговая сталеплавильная печь – статический тиристорный компенсатор»: Монография. – Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им Г.И. Носова, – 2017. – 318 с.

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

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

53. Farhan B. Space Vector Pulse Width Modulation Technique Based Design and Simulation of a Three-Phase Voltage Source Converter System / B. Farhan // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2014. №9. P. 1304-1307.

54. Гасияров, В.Р. Моделирование трехуровневого преобразователя частоты с фиксированной нейтралью при алгоритме ШИМ с удалением выделенных гармоник / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов, А.С. Маклаков // Электротехнические системы и комплексы. – 2017. №1 (34). – С.4-9.

55. 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. – №2. С.3-9.

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

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

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

59. 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.

60. Николаев, А.А. Исследование причин возникновения колебаний мощности в энергосистеме и разработка способов их устранения / А.А. Николаев, И.А. Ложкин, В.В. Анохин, В.С. Ивекеев // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2016. Т. 3. № 1. С. 48-55.

61. Матура, Р.М. Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности / Под ред. Р.М. Матура - М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 160 с.

62. Карташёв, И.И. Статические компенсаторы реактивной мощности в электрических системах: Пер. тематического сб. рабочей группы Исследовательского Комитета №38 СИГРЭ / Под ред. И.И. Карташёва - М.: Энергоатомиздат. – 1990. – 174 с.

63. Корнилов, Г.П. Математическая модель комплекса дуговая сталеплавильная печь – статический компенсатор реактивной мощности. Часть 1. // Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин / Создание и внедрение корпоративных информационных систем (КИС) на промышленных предприятиях

Российской Федерации: Сб. докл. второй международной конференции по КИС. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», – 2007. – С. 278-286.

64. Корнилов, Г.П. Способы моделирования электрического контура дуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмшин // Энергетика и энергоэффективные технологии: Сб. докл. по итогам научно-технической конференции, посвященной 50-летию ЛГТУ. – Липецк: ГОУ ВПО «ЛГТУ». – 2006. – С. 34–41.

65. 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.

66. Свенчанский, А.Д. Электрические промышленные печи: Дуговые печи и установки специального нагрева: Учебник для вузов / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жердев, А.М. Кручинин и др.; под ред. Свенчанского А.Д.. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат. – 1981. – 296 с.

67. Миронова, А.М. Энерготехнологическая эффективность дуговых сталеплавильных печей. Учеб. пособие / А.М. Миронова, Ю.М. Миронов // Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та. – 1999. – 154 с.

68. Корнилов, Г.П. Исследование электрического контура дуговой сталеплавильной печи на математической модели / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Ю. Вахитов // Сборник докладов 66-ой научно-технической конференции по итогам НИР за 2007-2008. – Т.2. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2008. С.69–72.

69. Миронов, Ю.М. Закономерности электрических режимов дуговых сталеплавильных печей / Ю.М. Миронов // Электричество. – 2006. № 6. – С. 56 – 62.

70. Рудцов, В.П. Параметры дугового разряда и их влияние на эффективность работы электротехнологических установок / В.П. Рудцов, И.Ю. Дмитриев, А.Р. Минеев // Электричество. – 2000. № 8. – С. 40-45.

71. Тельный, С.И. К теории трехфазной дуговой печи с непроводящей подиной / С.И. Тельный // Электричество. – 1948. №12. С. 38 – 42.

72. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи [Текст] / А.А. Николаев - дис. канд. техн. наук : 05.09.03 : защищена [Место защиты: Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова].- Магнитогорск, 2009.- 205 с.: ил.

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

74. 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.

75. 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.

76. Patent 6674267 United States of America, Int. Cl. G05F 1/70. Method and a device for compensation of the consumption of reactive power by an industrial load [Text] / Lennart Wernersson; Assignee ABB AB (Vasteras (SE)). – Appl. No. 10/032,557; filed 2.01.2002; date of patent 6.01.2004.

77. Разинцев В.И. Электрогидравлические усилители мощности / В.И. Разинцев - М: Машиностроение. – 1980. – 120 с.

78. Басков, С.Н. Разработка и исследование автоматизированных электроприводов черновой клетки толстолистого стана в режимах регулируемого формоизменения прокатываемого металла / С.Н. Басов - : Дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 М., 1999.

79. Николаев, А.А. Исследование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи с целью обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и внутриводского электроснабжения / А.А. Николаев, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев // Сборник трудов XLIV Международной

научно-практической конференции "ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2014": – М.: Издательский Дом МЭИ. – 2014. – С. 106-109.

80. Николаев, А.А. Использование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи для обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и повышения надежности внутривозовского электроснабжения / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин, В.Е. Котышев, М.М. Тухватуллин // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – №1. – С. 59-69. URL: <http://www.indust-engineering.ru/issues/2014/2014-1-8.pdf> (дата обращения 03.07.2021).

81. Патент РФ на полезную модель № RU 180656 U1, МПК H02J 3/18. Система управления статическим тиристорным компенсатором/ А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, В.В. Анохин // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова". Дата регистрации: 23.11.2017. Дата публикации: 20.06.2018.

82. 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.

83. Николаев, А.А. Повышение эффективности функционирования электроприводов прокатного стана при параллельной работе с электросталеплавильным комплексом / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, В.С. Ивекеев, М.В. Буланов // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Сборник трудов 76-ой международной научно-технической конференции, – 2018. – С. 334-335.

84. Николаев, А.А. Разработка усовершенствованного алгоритма демпфирования колебаний мощности в электроэнергетической системе за счет

статических 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.

85. Николаев, А.А. Разработка новых алгоритмов управления реактивной мощностью статического тиристорного компенсатора, обеспечивающих улучшенные режимы работы дуговой сталеплавильной печи / А.А. Николаев, В.В. Анохин, И.А. Ложкин, В.С. Ивекеев // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: Сборник трудов 75-ой международной научно-технической конференции, – 2017. – С. 205-207.

86. Nikolaev, A.A. Development and Analysis of the Improved Algorithm Effectiveness for Oscillation Damping in the Electric Power System Using SVC / A.A. Nikolaev, I.A. Lozhkin, V.S. Ivekeev // Proceedings of the 2019 IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry : Research and Practice (PEAMI). – Magnitogorsk, Russia. – 5-6 Oct. 2019. – pp. 127-133.

87. Nikolaev, A.A. Comparative Analysis of Modern Electric Control Systems of Electric Arc Furnaces / A.A. Nikolaev; P.G. Tulupov; V.S. Ivekeev // 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). Chelyabinsk, Russia. – 22-24 Sept. 2020. – pp. 464 - 468.

88. Шабад, М.А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей / М.А. Шабад. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, – 1985. – 296 с.

89. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование станций и подстанций : учебник для техникумов / Л.Д. Рожкова, В.С. Козулин. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.

90. Шпиганович, А.Н. Провалы напряжения в электрических системах предприятий / А.Н. Шпиганович, И.С. Муров // Национальная Ассоциация Ученых. – 2015. – № 2-4 (7). – С. 6-7.

91. Фишман, В.С. Провалы напряжения в сетях промышленных предприятий // Новости электротехники, – 2004. – №5 (29). – С. 15-19

92. Идельчик, В. И. Электрические системы и сети: учеб. для вузов / В. И. Идельчик. – Москва : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
93. Боровиков, В. А. Электрические сети энергетических систем / А. В. Боровиков, В. К. Косарев, Г. А. Ходот. – Ленинград: Энергия, – 1977. – 392 с.
94. Николаев, А.А. Методика оценки коэффициента демпфирования провалов напряжения при использовании резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов промышленных предприятий / А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин // Сборник трудов XLVIII Международной научно-практической конференции "ФЕДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ – 2018": – М.: Издательский Дом МЭИ, 2018. – С. 218-223.
95. Николаев, А.А. Разработка методики оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения / А.А. Николаев, В.С. Ивекеев, И.А. Ложкин // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – №44. – С. 16-26.
96. ГОСТ Р ИСО 31000-210. Менеджмент риска. Принципы и руководство. – М.: Стандартиформ, 2018. – 27 с.
97. ГОСТ 27.310-95 ССНТ Анализ видов, последствий и критичности отказов техники. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1998.
98. 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.
99. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий / Б.И. Кудрин - М.: Интернет инжиниринг, – 2005. – 672 с.
100. Михайлов, В.В. Надежность электроснабжения промышленных предприятий / В.В. Михайлов – М.: Энергоиздат, 1982 – 130 с.
101. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман - Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2001. – 479 с.
102. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2003. – 256 с.



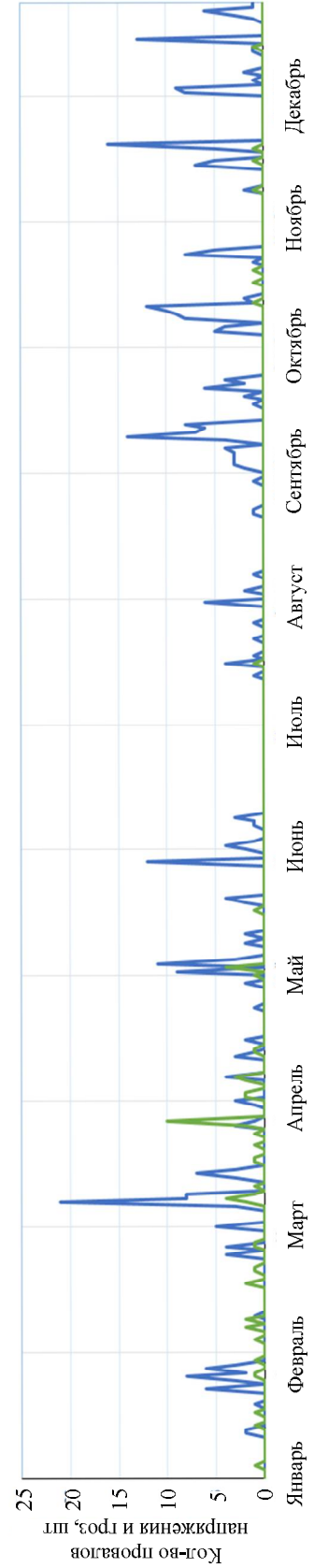
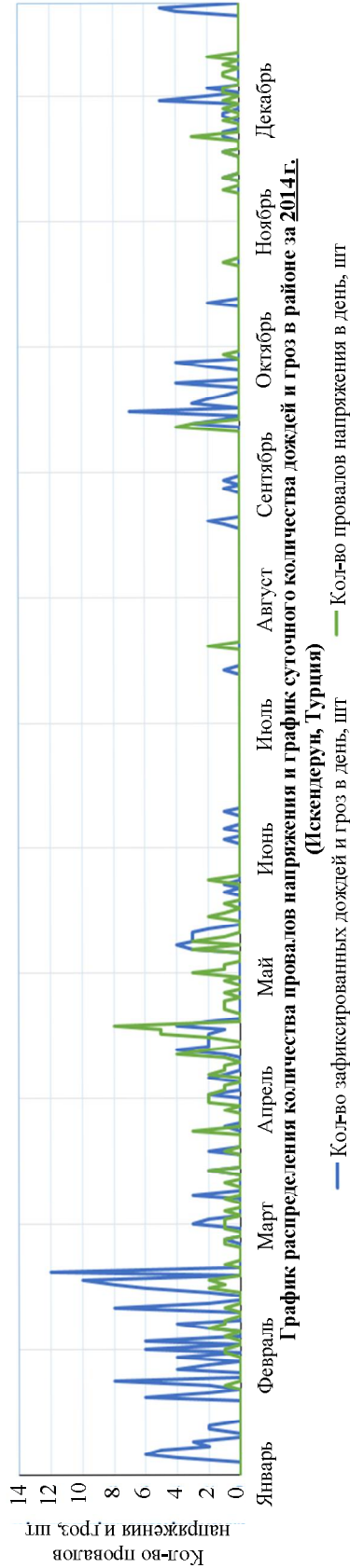
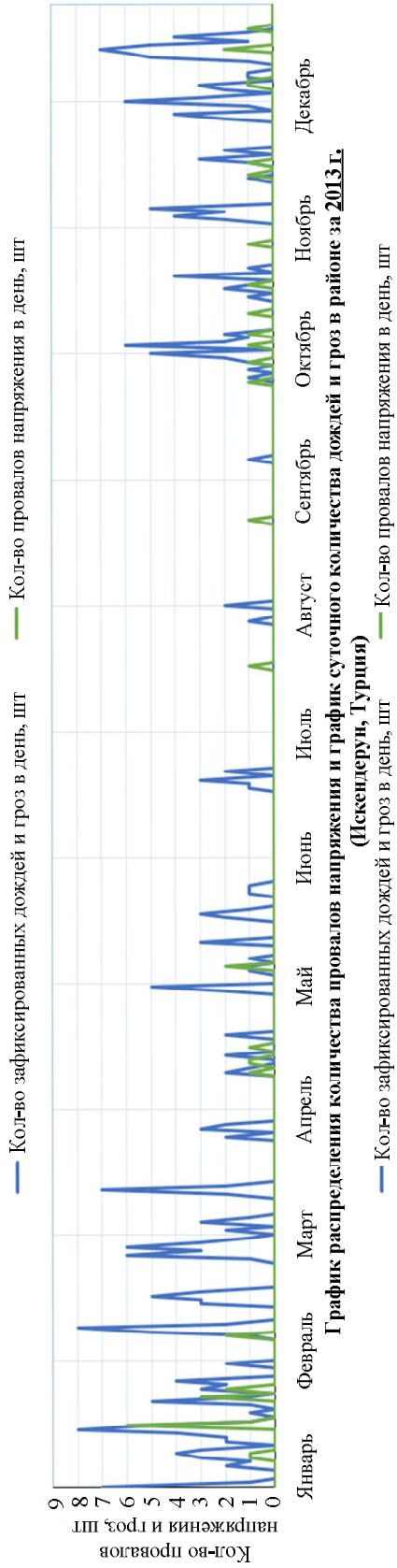
103. Николаев, А.А. Повышение устойчивости преобразователей частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения и параллельной работе с дуговой сталеплавильной печью / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, И.А. Ложкин, В.А. Лаптова // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 3 (48). – С. 33-40.

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.

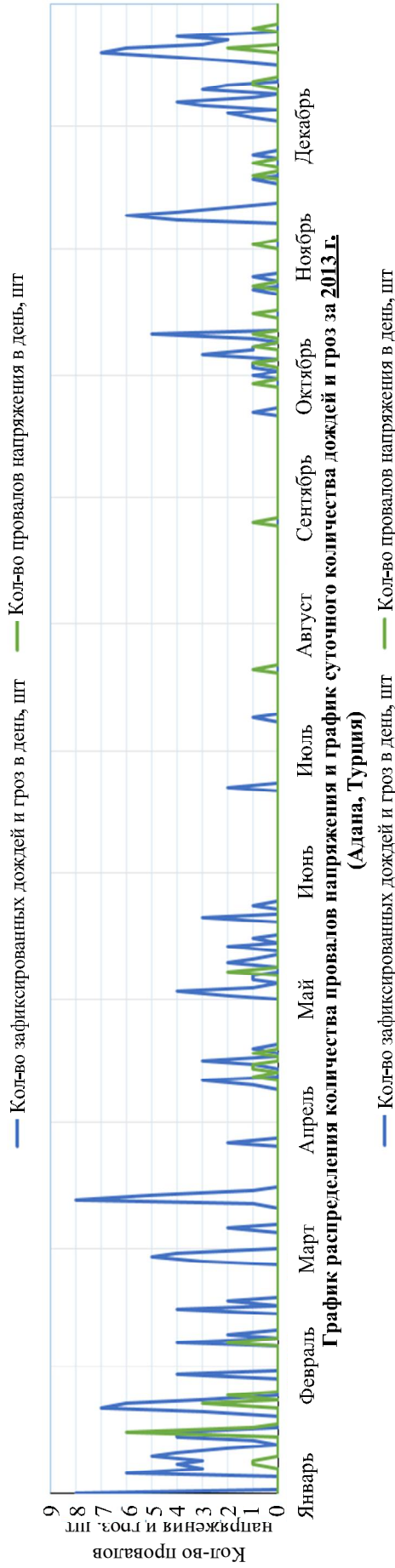
105. Николаев, А.А. Повышение устойчивости работы преобразователей частоты с активными выпрямителями при коммутациях электрооборудования электросталеплавильного комплекса / А.А. Николаев, А.С. Денисевич, В.С. Ивекеев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2019. №5. – С. 48-58.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

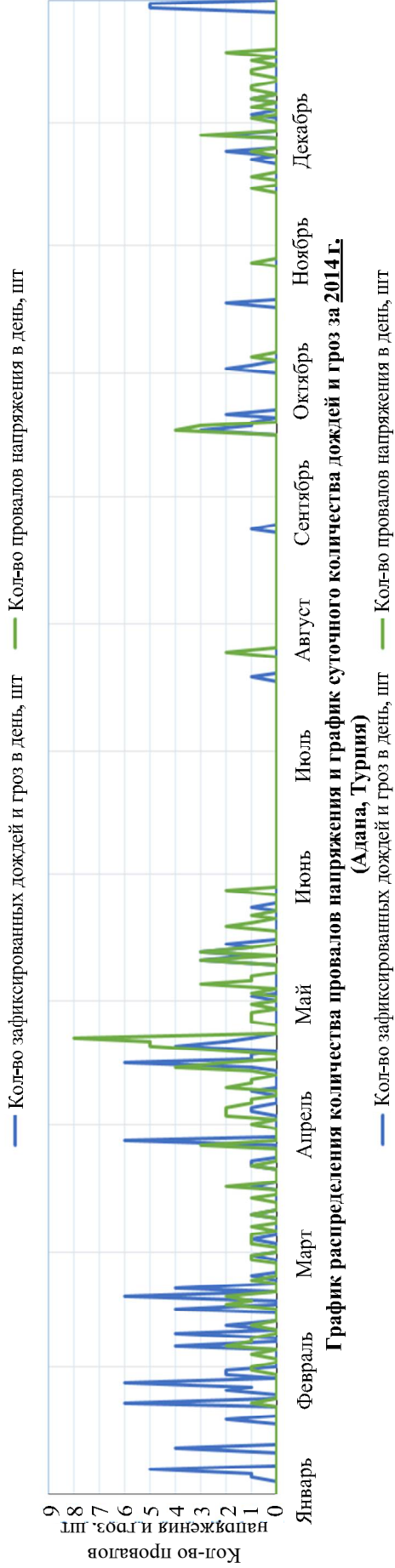
График распределения количества провалов напряжения и график суточного количества дождей и гроз в районе за 2012 г.  
(Искендерун, Турция)



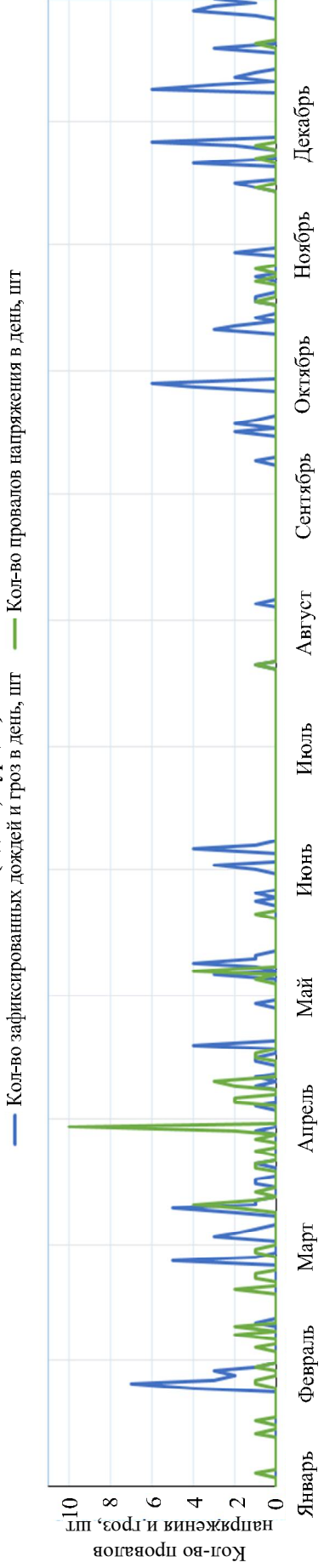
**График распределения количества провалов напряжения и график суточного количества дождей и гроз за 2012 г.**  
(Адана, Турция)



**График распределения количества провалов напряжения и график суточного количества дождей и гроз за 2013 г.**  
(Адана, Турция)



**График распределения количества провалов напряжения и график суточного количества дождей и гроз за 2014 г.**  
(Адана, Турция)



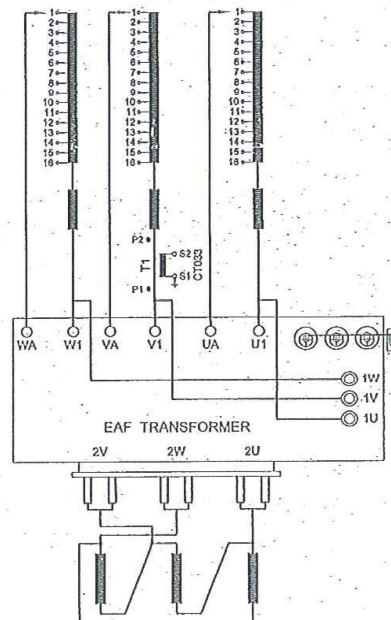
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Test Certificates No: 3317247-0			
Customer : MMK - ATAKAŞ / DANIELI	RATING PLATE	Page No : 3 / 20	Serial No.: 317247
Rated Power(MVA): 300	Standard : IEC 60076-1 (2000)	Vector Group: Dd0	Cooling Type: ODWF
	Rated Voltage(kV): 34,5 / 1,683....1,119		



ELECTRIC ARC FURNACE TRANSFORMER									
MANUFACTURER AREVA ENERJİ ENDÜSTRİSİ A.Ş. 41410 GEBZE / KOCAELİ - TÜRKİYE									
NO.	317247	YEAR OF MANUFACTURE	2010	REFERENCE STANDARD	IEC 60076				
RATED POWER	300 MVA	CONNECTION GROUP	Dd0	KIND OF TRANSFORMER	FURNACE				
SERVICE TYPE:	CONTINUOUS	FREQUENCY	50 Hz	NUMBER OF PHASES	3				
POS.	RATED POWER (kVA)	VOLTAGE (V)		CURRENT (A)		U <sub>k</sub> (%)		SHORT-CIRCUIT CURRENT (kA)	
		HV	LV	HV	LV	HV	LV	HV	LV
16	300000	34500	1693	$\sqrt{3} \times 2899,8$	$\sqrt{3} \times 59420,3$	12,42	40,42	828,7	
13	300000	34500	1668	$\sqrt{3} \times 2899,8$	$\sqrt{3} \times 63738,1$	14,68	34,20	752,4	
1	214054	34500	1119	$\sqrt{3} \times 2068,2$	$\sqrt{3} \times 63768,1$	23,13	15,49	477,5	
INSULATION LEVEL			U1 250 AC 95 / U1 - AC 10 kV		TOTAL WEIGHT	285 t			
WINDING TEMPERATURE RISE			65 K		WEIGHT OF COPPER	48 t			
OIL TEMPERATURE RISE			60 K		OIL WEIGHT	76 t			
COOLING METHOD			ODWF		MAX. TEMPERATURE OF WATER	34 °C		MAX. AMBIENT TEMPERATURE 45 °C	
HEAT EXCHANGER:			YKDH 1000		MADE:	GEA RENZMAN		WATER FLOW RATE OF COOLER 73.1 m <sup>3</sup> /hour	
OIL / WATER PRESSURE DROP:			350 / 300 mbar		INLET / OUTLET TEMP OF WATER:	34 / 48 °C		INLET / OUTLET TEMP OF OIL: 80 / 70 °C	
TANK, COOLERS AND CONSERVATOR ARE VACUUM PROOF.									
WATER FLOW OF LV COPPER TUBE			1,87 l/s						
ON-LOAD TAP-CHANGER			MR 3 x RI 3003-72,5C-10160		NOMINAL CURRENT	3000 A		Um	72,5 kV
CURRENT TRANSFORMER			T1		RATED POWER	10 VA		RATIO	3600 / 2 A
					CLASS	C13			

POS.	TAP-CHANGER CONNECTION	RATED POWER (kVA)	PRIMARY		SECONDARY	
			VOLTAGE (V)	CURRENT (A)	VOLTAGE (V)	CURRENT (A)
16	16	300000	34500	$\sqrt{3} \times 2899,8$	1683	$\sqrt{3} \times 59420$
15	15				1643	$\sqrt{3} \times 60870$
14	14				1605	$\sqrt{3} \times 62319$
13	13	1568		$\sqrt{3} \times 63768$		
12	12	$\sqrt{3} \times 2834$			1633	
11	11	286957			$\sqrt{3} \times 2773$	1500
10	10	278873			$\sqrt{3} \times 2694$	1458
9	9	271233			$\sqrt{3} \times 2621$	1418
8	8	261000			$\sqrt{3} \times 2551$	1380
7	7	257143			$\sqrt{3} \times 2481$	1344
6	6	250633			$\sqrt{3} \times 2422$	1310
5	5	242845			$\sqrt{3} \times 2347$	1270
4	4	235714			$\sqrt{3} \times 2277$	1232
3	3	228902			$\sqrt{3} \times 2212$	1197
2	2	221228			$\sqrt{3} \times 2137$	1158
1	1	214054			$\sqrt{3} \times 2068$	1119





3805573


MADE IN TURKEY

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: 3317247-0													
Customer : MMK - ATAKAŞ / DANIELI		Three-phase, Electrical Arc Furnace Transformer				Page No : 7 / 20							
Rated Power(MVA): 300,0						Serial No.: 317247							
Rated Frequency(Hz): 50		Rated Voltage(kV): 34,5 / 1,683....1,119				Vector Group: Dd0							
						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 Mean (V)	No-load current					No-load loss						
		phase 1U	phase 1V	phase 1W	Average	Guaranteed	Measured Pm	Corrected Pc	Guaranteed				
		(A)					(%)	(kW)					
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 <sup>2</sup> *R Loss	Stray Loss	I <sup>2</sup> *R Loss	Stray Loss	Load Loss	Guar.	
			Meas.	Guar.									Temperature: 29,6 °C
HV	LV		(%)			(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	-	212,2	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	696,7	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 60076-3 (2000) §11 )					Short-duration induced AC withstand voltage test ( IEC 60076-3 (2000) §12.3 )								
Applied winding	Applied voltage	Frequency	Duration	Result	Induced winding	Test voltage	Frequency	Duration	Result				
	(kV)	(Hz)	(Sec.)			(kV)	(Hz)	(Sec.)					
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. UNAL 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(MVA): 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**

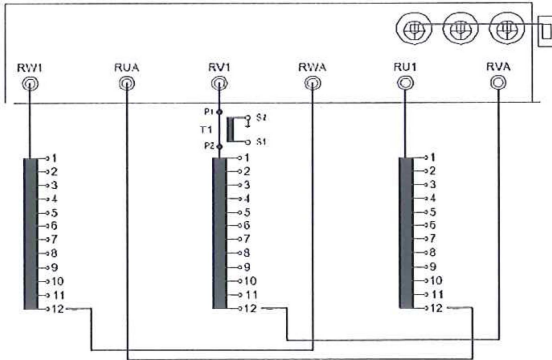
MANUFACTURER AREVA ENERJİ A.Ş. 41410 GEBZE / KOCAELİ - TÜRKİYE					
SERIAL NO.	317249	YEAR OF MANUFACTURE	2010	NUMBER OF PHASES	3
REFERENCE STANDARD	IEC60076				
RATED POWER	35266,7 MVA	COOLING METHOD	OFWF	INSULATION LEVEL	LI 250 AC 85 kV
CONNECTION GROUP	III (Δ)		SERVICE	CONTINUOUS	FREQUENCY 50 Hz


POS	OLTC TAPS	POWER (kVA)		VOLTAGE DROP (V / Phase)	CURRENT (A)	REACTANCE (Ω / Phase)	
12	12	100	35287	4053	2890	1,411	1,261
11	11	80	31758	3652		1,120	0,989
10	10	80	28230	3248		0,852	0,726
9	9	70	24701	2841		0,570	0,425
8	8	60	21172	2435		0,287	0,160
7	7	50	17644	2029		0,071	
6	6	40	14115	1623			
5	5	30	10586	1217			
4	4	20	7057	812			
3	3	11	3882	446			
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 UX)
MAXIMUM COOLING WATER INLET TEMPERATURE	34 °C	WATER FLOW OF COOLER	29,94 m³/hour		
HEAT EXCHANGER	WKDH 315 DIN	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	3 x R1 3003 - 72,5°C 12120	RATED CURRENT	3000 A	Um	72,5 kV	SERIAL NO : 1083717	
CURRENT TRANSFORMERS	T1	BURDEN	10 VA	TURN RATIO	3600 / 2 A	CLASS	CL3





3805672
MADE IN TURKEY


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





Test Certificates No: 3317249-0		 AREVA														
Customer : DANIELI / MMK - ATAKAŞ			MEASUREMENT OF REACTANCE AND LOSS										Page No : 6/14			
Rated Power(MVAr): 35,287													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 <sub>RU1</sub>	V <sub>RV1</sub>	V <sub>RW1</sub>	I <sub>RU1</sub>	I <sub>RV1</sub>	I <sub>RW1</sub>	X <sub>RU1</sub>	X <sub>RV1</sub>	X <sub>RW1</sub>	L <sub>RU1</sub>	L <sub>RV1</sub>	L <sub>RW1</sub>	X <sub>ave.</sub>	X <sub>calc.</sub>	L <sub>Ave.</sub>	L <sub>calc.</sub>
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	2,228
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 <sup>2</sup> R Loss	Stray Loss	<sup>2</sup> iR Loss	Stray Loss	Load Loss	Guar.				
Position	(A)	(V)	Meas.	Guar.	(MVA)	Temperature: 28,5 °C			Temperature: 75 °C							
	(A)	(V)	ohm/phase		(MVA)	(kW)										
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.ÜNAL Test Lab. Supervisor					CUSTOMER OR REPRESENTATIVE: 						
DATE: 18.06.2010					DATE: 18.06.2010					DATE:						

ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Электрические параметры ДСП-250 при однофазном провале напряжения в фазе А**

dU, o.e.	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
U <sub>В</sub>	842,77	800,63	758,49	716,35	674,22	632,08	589,94	547,80	505,66	463,52	421,39	379,25	337,11	294,97	252,83	210,69	168,55	126,42	84,28	42,14	0,00
U <sub>Л,А,В</sub>	634,44	613,83	590,03	569,85	545,70	526,42	503,24	483,29	461,05	440,32	418,82	396,72	376,59	353,31	334,35	314,20	290,93	269,50	249,30	225,44	204,30
U <sub>Л,В,В</sub>	634,59	626,05	625,42	616,09	616,16	606,95	605,98	598,37	595,63	590,35	585,90	584,41	577,17	577,46	569,76	567,39	565,74	558,92	555,76	551,71	546,60
U <sub>Л,С,В</sub>	632,36	630,59	622,41	619,06	612,94	607,92	604,34	597,34	596,09	587,31	587,68	578,36	579,14	569,92	570,32	561,08	561,84	552,73	553,67	545,62	547,29
I <sub>Л,А,КА</sub>	9155	88,84	85,41	82,68	79,31	76,57	73,33	70,49	67,37	64,42	61,40	58,26	55,41	52,09	49,41	46,06	43,23	40,05	37,19	34,03	31,14
I <sub>Л,В,КА</sub>	91,72	90,73	90,19	89,22	88,75	87,84	87,33	86,54	85,96	85,32	84,68	84,19	83,51	83,13	82,44	82,05	81,51	81,05	80,53	80,03	79,49
I <sub>Л,С,КА</sub>	91,70	90,89	90,23	89,40	88,78	87,91	87,35	86,47	85,96	85,09	84,62	83,87	83,34	82,73	82,12	81,53	81,12	80,44	80,06	79,57	79,25
Y <sub>А,АСТ,СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>В,ВСТ,СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>С,ССТ,СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>А,АСТ,СМ</sub>	117,99	118,06	117,97	118,01	117,99	118,00	118,01	118,00	118,01	118,00	118,01	118,01	118,01	118,01	118,00	118,00	118,01	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>В,ВСТ,СМ</sub>	118,00	118,00	117,99	118,00	118,00	118,00	117,98	118,00	117,97	117,99	117,97	117,97	117,97	118,00	117,98	118,00	117,98	118,00	118,00	118,00	117,99
Y <sub>С,ССТ,СМ</sub>	118,00	117,98	118,02	118,00	118,01	118,01	118,05	118,01	118,06	118,01	118,06	118,00	118,05	118,00	118,03	118,00	118,01	118,00	118,00	118,00	118,01
P <sub>Л,А,МВТ</sub>	52,84	48,56	44,21	40,30	36,35	32,83	29,32	26,09	22,99	20,07	17,34	14,76	12,40	10,15	8,16	6,28	4,63	3,12	1,81	0,67	-0,28
P <sub>Л,В,МВТ</sub>	52,97	53,03	53,62	53,66	54,22	54,27	54,79	54,84	55,30	55,35	55,75	55,96	56,16	56,51	56,53	56,82	57,06	57,10	57,33	57,28	57,43
P <sub>Л,С,МВТ</sub>	52,86	51,78	50,41	49,31	47,91	46,78	45,52	44,21	43,09	41,59	40,57	39,02	37,95	36,40	35,22	33,61	32,56	30,77	29,71	27,87	26,77
ΔP <sub>Л,А,МВТ</sub>	2,46	2,31	2,14	2,00	1,84	1,72	1,58	1,46	1,33	1,22	1,10	0,99	0,90	0,80	0,72	0,62	0,55	0,47	0,41	0,34	0,28
ΔP <sub>Л,В,МВТ</sub>	2,46	2,41	2,38	2,33	2,31	2,26	2,23	2,19	2,16	2,13	2,10	2,08	2,04	2,02	1,99	1,97	1,95	1,92	1,90	1,88	1,85
ΔP <sub>Л,С,МВТ</sub>	2,46	2,42	2,39	2,34	2,31	2,26	2,24	2,19	2,16	2,12	2,10	2,06	2,03	2,01	1,98	1,95	1,93	1,90	1,88	1,86	1,84
P <sub>А,МВТ</sub>	55,30	50,87	46,35	42,30	38,19	34,55	30,89	27,55	24,32	21,29	18,45	15,75	13,30	10,95	8,88	6,90	5,17	3,59	2,22	1,01	0,00
P <sub>В,МВТ</sub>	55,44	55,44	56,00	55,99	56,53	56,53	57,02	57,03	57,46	57,49	57,85	58,03	58,20	58,54	58,52	58,80	59,01	59,03	59,23	59,15	59,29
P <sub>С,МВТ</sub>	55,32	54,20	52,79	51,65	50,22	49,04	47,76	46,40	45,26	43,71	42,67	41,08	39,99	38,40	37,19	35,56	34,49	32,66	31,59	29,72	28,61
Q <sub>А,МВАР</sub>	53,81	49,71	45,26	41,46	37,42	33,90	30,28	27,05	23,86	20,94	18,14	15,50	13,12	10,78	8,79	6,83	5,13	3,57	2,21	1,02	0,00
Q <sub>В,МВАР</sub>	53,86	52,66	51,40	50,19	48,98	47,79	46,53	45,46	44,11	43,19	41,79	40,82	39,57	38,49	37,46	36,39	35,17	34,38	33,14	32,41	31,19
Q <sub>С,МВАР</sub>	53,96	54,12	54,73	54,86	55,47	55,53	56,03	56,19	56,57	56,85	57,14	57,52	57,74	58,19	58,37	58,79	59,03	59,41	59,63	60,11	60,35
S <sub>А,МВА</sub>	77,16	71,13	64,79	59,23	53,47	48,40	43,26	38,61	34,07	29,86	25,87	22,10	18,68	15,37	12,49	9,70	7,29	5,06	3,13	1,43	0,00
S <sub>В,МВА</sub>	77,30	76,46	76,01	75,19	74,80	74,03	73,60	72,93	72,44	71,90	71,37	70,95	70,38	70,06	69,48	69,15	68,69	68,31	67,87	67,45	66,99
S <sub>С,МВА</sub>	77,28	76,60	76,04	75,34	74,82	74,09	73,62	72,87	72,44	71,71	71,31	70,69	70,23	69,72	69,21	68,71	68,37	67,79	67,47	67,06	66,79
P <sub>МВТ</sub>	166,06	160,52	155,15	149,94	144,94	140,12	135,67	130,98	127,04	122,49	118,97	114,86	111,49	107,89	104,59	101,25	98,67	95,27	93,03	89,88	87,90
P <sub>Л,МВТ</sub>	158,68	153,37	148,24	143,26	138,48	133,88	129,63	125,14	121,38	117,02	113,67	109,73	106,51	103,06	99,90	96,71	94,25	90,98	88,85	85,81	83,92
ΔP <sub>МВТ</sub>	7,38	7,14	6,91	6,68	6,46	6,24	6,05	5,84	5,66	5,47	5,30	5,13	4,98	4,83	4,68	4,54	4,42	4,29	4,18	4,07	3,98
Q <sub>МВАР</sub>	161,63	156,49	151,39	146,51	141,87	137,22	132,83	128,70	124,54	120,97	117,07	113,85	110,43	107,46	104,62	102,01	99,33	97,36	94,98	93,54	91,54
S <sub>МВА</sub>	231,73	224,19	216,84	209,77	203,09	196,51	190,47	184,42	178,95	173,47	168,55	163,74	159,29	155,15	151,18	147,56	144,35	141,16	138,48	135,94	133,78

Электрические параметры ДСП-250 при трехфазном провале напряжения																					
dU, o.e.	0,00	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00
U <sub>B</sub>	842,77	800,63	758,49	716,35	674,22	632,08	589,94	547,80	505,66	463,52	421,39	379,25	337,11	294,97	252,83	210,69	168,55	126,42	84,28	42,14	0,00
U <sub>Л_А_В</sub>	634,34	602,63	570,91	539,19	507,48	475,76	444,04	412,32	380,61	348,89	317,17	285,46	253,74	222,02	190,30	158,59	126,87	95,15	63,43	31,71	0,00
U <sub>Л_В_В</sub>	634,59	602,86	571,13	539,40	507,67	475,94	444,21	412,48	380,75	349,02	317,30	285,57	253,84	222,11	190,38	158,65	126,92	95,19	63,46	31,73	0,00
U <sub>Л_С_В</sub>	632,41	600,79	569,17	537,55	505,93	474,30	442,68	411,06	379,44	347,82	316,20	284,58	252,96	221,34	189,72	158,10	126,48	94,86	63,24	31,62	0,00
I <sub>Л_А_кА</sub>	91,56	86,98	82,40	77,82	73,24	68,67	64,09	59,51	54,93	50,36	45,78	41,20	36,62	32,04	27,47	22,89	18,31	13,73	9,16	4,58	0,00
I <sub>Л_В_кА</sub>	91,71	87,13	82,54	77,96	73,37	68,79	64,20	59,61	55,03	50,44	45,86	41,27	36,69	32,10	27,51	22,93	18,34	13,76	9,17	4,59	0,00
I <sub>Л_С_кА</sub>	91,70	87,11	82,53	77,94	73,36	68,77	64,19	59,60	55,02	50,43	45,85	41,26	36,68	32,09	27,51	22,92	18,34	13,75	9,17	4,59	0,00
Y <sub>_А_СЕТ_СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>_В_СЕТ_СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>_С_СЕТ_СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>_А_АКТ_СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>_В_АКТ_СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
Y <sub>_С_АКТ_СМ</sub>	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00	118,00
P <sub>Л_А_МВТ</sub>	52,84	47,69	42,80	38,18	33,82	29,72	25,89	22,33	19,02	15,98	13,21	10,70	8,45	6,47	4,76	3,30	2,11	1,19	0,53	0,13	0,00
P <sub>Л_В_МВТ</sub>	52,97	47,81	42,91	38,27	33,90	29,80	25,96	22,38	19,07	16,02	13,24	10,73	8,48	6,49	4,77	3,31	2,12	1,19	0,53	0,13	0,00
P <sub>Л_С_МВТ</sub>	52,86	47,71	42,82	38,19	33,83	29,73	25,90	22,33	19,03	15,99	13,22	10,70	8,46	6,48	4,76	3,30	2,11	1,19	0,53	0,13	0,00
ΔP <sub>_А_МВТ</sub>	2,46	2,22	1,99	1,77	1,57	1,38	1,20	1,04	0,88	0,74	0,61	0,50	0,39	0,30	0,22	0,15	0,10	0,06	0,02	0,01	0,00
ΔP <sub>_В_МВТ</sub>	2,46	2,22	2,00	1,78	1,58	1,39	1,21	1,04	0,89	0,75	0,62	0,50	0,39	0,30	0,22	0,15	0,10	0,06	0,02	0,01	0,00
ΔP <sub>_С_МВТ</sub>	2,46	2,22	2,00	1,78	1,58	1,39	1,21	1,04	0,89	0,75	0,62	0,50	0,39	0,30	0,22	0,15	0,10	0,06	0,02	0,01	0,00
P <sub>_А_МВТ</sub>	55,30	49,91	44,79	39,95	35,39	31,10	27,10	23,36	19,91	16,73	13,82	11,20	8,85	6,77	4,98	3,46	2,21	1,24	0,55	0,14	0,00
P <sub>_В_МВТ</sub>	55,44	50,03	44,90	40,05	35,48	31,18	27,16	23,42	19,96	16,77	13,86	11,23	8,87	6,79	4,99	3,46	2,22	1,25	0,55	0,14	0,00
P <sub>_С_МВТ</sub>	55,33	49,93	44,81	39,97	35,41	31,12	27,11	23,37	19,92	16,74	13,83	11,20	8,85	6,78	4,98	3,46	2,21	1,24	0,55	0,14	0,00
Q <sub>_А_МВАР</sub>	53,81	48,57	43,59	38,88	34,44	30,27	26,37	22,74	19,37	16,28	13,45	10,90	8,61	6,59	4,84	3,36	2,15	1,21	0,54	0,13	0,00
Q <sub>_В_МВАР</sub>	53,86	48,61	43,63	38,92	34,47	30,30	26,39	22,76	19,39	16,29	13,47	10,91	8,62	6,60	4,85	3,37	2,15	1,21	0,54	0,13	0,00
Q <sub>_С_МВАР</sub>	53,96	48,70	43,71	38,98	34,53	30,35	26,44	22,80	19,42	16,32	13,49	10,93	8,63	6,61	4,86	3,37	2,16	1,21	0,54	0,13	0,00
S <sub>_А_МВА</sub>	77,16	69,64	62,50	55,75	49,38	43,40	37,81	32,60	27,78	23,34	19,29	15,63	12,35	9,45	6,94	4,82	3,09	1,74	0,77	0,19	0,00
S <sub>_В_МВА</sub>	77,29	69,76	62,61	55,84	49,47	43,48	37,87	32,66	27,83	23,38	19,32	15,65	12,37	9,47	6,96	4,83	3,09	1,74	0,77	0,19	0,00
S <sub>_С_МВА</sub>	77,28	69,75	62,60	55,84	49,46	43,47	37,87	32,65	27,82	23,38	19,32	15,65	12,36	9,47	6,96	4,83	3,09	1,74	0,77	0,19	0,00
P <sub>_МВТ</sub>	166,06	149,87	134,51	119,98	106,28	93,41	81,37	70,16	59,78	50,23	41,51	33,63	26,57	20,34	14,95	10,38	6,64	3,74	1,66	0,42	0,00
P <sub>Л_МВТ</sub>	158,67	143,20	128,53	114,64	101,55	89,25	77,75	67,04	57,12	48,00	39,67	32,13	25,39	19,44	14,28	9,92	6,35	3,57	1,59	0,40	0,00
ΔP <sub>_МВТ</sub>	7,38	6,66	5,98	5,34	4,73	4,15	3,62	3,12	2,66	2,23	1,85	1,50	1,18	0,90	0,66	0,46	0,30	0,17	0,07	0,02	0,00
Q <sub>_МВАР</sub>	161,64	145,88	130,92	116,78	103,45	90,92	79,20	68,29	58,19	48,89	40,41	32,73	25,86	19,80	14,55	10,10	6,47	3,64	1,62	0,40	0,00
S <sub>_МВА</sub>	231,74	209,14	187,71	167,43	148,31	130,35	113,55	97,91	83,42	70,10	57,93	46,93	37,08	28,39	20,86	14,48	9,27	5,21	2,32	0,58	0,00

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Дата возникновения провала напряжения	Глубина провала по фазе А на шинах 380 кВ, %	Максимальная глубина провала напряжения на шинах 34,5 после компенсации СТК 330 МВАр с усовершенствованной системой управления и с включенной ДСП, %	Максимальная глубина провала напряжения на шинах 34,5 после компенсации СТК 330 МВАр с усовершенствованной системой управления и с отключенной ДСП, %	Максимальная глубина провала напряжения на шинах 34,5 кВ с классической системой управления СТК 330 МВАр и с включенной ДСП, %
21.03.2014	6,0%	0,58%	0,35%	8,63%
08.01.2012	6,5%	0,72%	1,71%	8,83%
07.05.2014	7,0%	-0,11%	0,63%	9,03%
05.12.2013	8,0%	0,15%	0,18%	9,42%
17.01.2014	8,2%	-0,65%	0,26%	10,19%
06.02.2013	8,7%	-0,19%	-0,13%	10,38%
17.04.2014	9,0%	0,45%	0,12%	10,48%
07.02.2012	10,0%	0,01%	0,53%	11,61%
15.04.2012	10,8%	0,39%	-0,42%	11,77%
22.03.2013	11,0%	-0,44%	1,71%	11,83%
27.03.2013	12,0%	0,19%	0,13%	12,29%
04.10.2012	12,5%	-0,16%	-0,12%	12,53%
21.07.2012	13,0%	-0,16%	-0,31%	12,71%
22.04.2013	14,0%	-0,53%	1,34%	13,07%
11.12.2012	15,0%	-0,07%	3,04%	13,44%
12.04.2012	16,0%	-0,06%	-0,99%	14,44%
17.02.2013	17,0%	1,00%	-0,82%	15,17%
12.12.2012	18,0%	1,04%	2,16%	15,89%
30.03.2014	19,0%	1,49%	-0,30%	16,33%
16.01.2012	20,0%	2,39%	-0,27%	16,75%
21.07.2014	21,0%	2,51%	0,56%	16,97%
23.10.2012	21,6%	3,51%	0,48%	17,17%
15.04.2013	22,0%	3,10%	-0,33%	17,52%
17.01.2012	23,0%	4,19%	0,21%	17,90%
31.01.2013	26,0%	5,48%	-1,61%	20,39%
03.04.2013	27,0%	5,92%	0,52%	19,40%
23.01.2012	29,0%	7,01%	0,86%	20,93%
10.04.2014	30,0%	7,76%	0,86%	21,49%
26.08.2012	32,5%	8,66%	0,99%	22,61%
07.02.2013	33,0%	8,91%	-0,72%	22,81%
11.02.2013	34,0%	9,52%	-0,77%	23,17%
16.02.2013	35,0%	10,55%	-0,79%	22,98%
11.10.2012	37,0%	11,30%	1,11%	24,76%
25.01.2012	38,0%	11,93%	0,38%	25,80%
02.11.2012	38,6%	12,16%	-0,85%	25,97%
14.12.2013	39,0%	12,36%	-0,68%	26,11%
02.12.2013	40,0%	12,81%	0,76%	26,45%
08.05.2012	42,0%	14,09%	-0,18%	27,32%
09.12.2013	44,0%	15,02%	-1,18%	28,68%
16.10.2012	44,6%	15,35%	0,49%	28,80%
26.01.2014	45,0%	15,42%	0,61%	29,27%
19.11.2012	46,0%	15,95%	-0,29%	29,98%
04.02.2013	47,0%	16,44%	-0,01%	30,32%
12.04.2013	48,0%	16,67%	2,10%	30,67%
22.11.2012	49,0%	17,55%	2,17%	31,12%
22.02.2013	50,0%	18,26%	1,49%	31,45%
28.10.2013	54,0%	19,52%	4,60%	33,94%
27.02.2013	55,0%	20,54%	6,38%	34,36%
07.03.2013	57,0%	21,55%	7,32%	35,13%
20.12.2014	64,0%	25,07%	12,95%	38,79%
15.11.2014	65,0%	24,85%	13,41%	39,10%
25.11.2014	67,0%	26,13%	14,24%	39,42%
11.03.2014	77,0%	30,22%	20,71%	45,19%
21.05.2014	83,0%	33,08%	24,14%	48,07%
08.10.2012	100,0%	39,76%	35,06%	55,92%

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

 STEEL  
**MMK METALURJİ**  
 SANAYİ TİCARET VE LİMAN İŞL. A.Ş.  
 Özcan Mh. Alparatan Turizm Bulvarı No:342/91  
 Dörtöylü D: 095 005 5541 Tic. Sic. No:4292  
 Tel : (328) 311 11 11 / 311 11 10  
 09.05.2017 16:03:18  
 УТВЕРЖДАЮ  
 Генеральный директор  
 ЗАО «ММК Metalurji»  
 /Квасов Д.В./  
 М.П.  
 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

## АКТ

об использовании результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Ивекеева Владимира 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 Ивекеева В.С., проведенных в период с декабря 2011 г. по июнь 2015 г. на ЗАО «ММК Metalurji» в рамках договора о сотрудничестве между предприятием и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова».

За указанный период времени Ивекеевым В.С. был разработан и исследован **способ демпфирования провалов напряжения в системе внутриводского электроснабжения завода за счет использования резервов реактивной мощности статического тиристорного компенсатора СТК 330 МВАр сверхмощной дуговой сталеплавильной печи ДСП-250 (300 МВА)**. В соответствии с ним при возникновении провалов напряжения в районной энергосистеме провинций Хатай, Газиянтеп и Адана, вызванных главным образом короткими замыканиями в воздушных линиях электропередачи 380 кВ, СТК 330 МВАр может обеспечить устранение провалов напряжения в распределительной сети 34,5 кВ за счет кратковременной генерации реактивной мощности СТК в сеть и поддержания напряжения в нужной фазе на номинальном уровне.

Для реализации данного способа Ивекеевым В.С. на основании реальных осциллограмм токов и напряжений, полученных на ГПП предприятия ЗАО «ММК Metalurji», произведено исследование распределения провалов напряжения во внутриводской сети металлургического завода ЗАО ММК Metalurji». Определено, что наиболее часто возникают провалы напряжения глубиной  $\delta U_t = 10 - 50\%$  и длительностью  $t_{\text{пров}} = 50 - 100$  мс. Восстановленный годовой график возникновения провалов напряжения во внешней питающей сети позволил сделать вывод об их сезонном характере. В этой связи разработаны изменения в существующей системе управления СТК 330 МВАр, позволяющие реализовать функции компенсации провалов напряжения. Усовершенствованная модель системы управления СТК включает в себя контур диагностики провалов напряжения в питающей сети и контур регулирования напряжения, выполненного на базе ПИД-регулятора. Результаты исследований

показали, что СТК 330 МВАр способен устранять однофазные провалы напряжения глубиной до 30% с длительностью до нескольких секунд.

В условиях частых провалов напряжения, возникающих в районной энергосистеме турецких провинций Хатай, Газиантеп и Адана, применение разработанных мероприятий может обеспечить снижение количества аварийных остановов непрерывного стана горячей прокатки 1750, главные электроприводы которого построены на основе мощных преобразователей частоты с активными выпрямителями ACS6000 производства фирмы АВВ. Данные преобразователи имеют повышенную чувствительность к несимметричным провалам напряжения, что приводит к их низкой надежности работы при частых коротких замыканиях во внешней питающей сети 380 кВ, возникающие в периоды грозовой активности на юго-западе Турции.

Для обеспечения надежной работы электроприводов клеток непрерывного листового стана горячей прокатки 1750 Ивекеевым В.С. **было предложено объединение секций шин 34,5 кВ ОРУ-34,5 кВ электросталеплавильного комплекса и цехового распределительного устройства**, от которого получают питание понизительные трансформаторы преобразователей частоты ACS6000.

Дополнительно Ивекеевым В.С. разработана методика расчета номинальной мощности СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов, которая позволяет на стадии выбора параметров компенсирующего устройства заложить в СТК необходимый запас реактивной мощности, обеспечивая тем самым функции стабилизации напряжения при возникновении внешних провалов. Необходимые исходные данные для разработки резерва могут быть получены путем статистического анализа погодных условий и частоты возникновения провалов напряжения в данном регионе, зависящих от погодных условий в различное время года.

Технический эффект от внедрения результатов научных исследований заключается **в уменьшении количества простоев стана горячей прокатки 1750 на 20 часов в год, а также в снижении количества брака выпускаемой горячекатаной продукции. Вероятность компенсации всех провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети 380 кВ и с учетом фактического времени работы ДСП 250, составляет 75%.**