

На правах рукописи



ИВЕКЕЕВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

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

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Магнитогорск – 2021

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

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Николаев Александр Аркадьевич

Официальные оппоненты:

Михеев Георгий Михайлович

доктор технических наук, доцент, «Чебоксарский институт (филиал) Московского политехнического университета», профессор кафедры электрических систем, физики и математики, (г. Чебоксары)

Маклаков Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Южно-Уральский государственный университет, доцент кафедры мехатроники и автоматизации, (г. Челябинск)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», (г. Липецк)

Защита состоится 17.12.2021 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.111.04 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

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

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.111.04
канд. техн. наук, доцент

Одинцов Константин Эдуардович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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.

За последние 30 лет большую популярность получило строительство компактных металлургических предприятий, доля выпуска стали в которых на сегодняшний день составляет порядка 16-20 % от общего объема производства. В своем составе они имеют дуговые сталеплавильные печи (ДСП) высокой мощности и производительности, установки ковш-печь (УКП), машины для высокоскоростной разливки стали и агрегаты для прокатки и обработки полосы. Электроприводы прокатных станов, установленных на данных предприятиях, включают в себя мощные синхронные или асинхронные двигатели (СД и АД), регулирование которых происходит с помощью преобразователей частоты (ПЧ) с активными выпрямителями (АВ). Особенностью работы данных электроприводов является их высокая чувствительность к провалам напряжения, возникающим во внешней питающей сети, что приводит к броскам тока на входе АВ, превышающих уставку срабатывания защиты, и уменьшению уровня напряжения в звене постоянного тока.

На сегодняшний день отсутствуют научно обоснованные технические решения, позволяющие обеспечить устойчивую работу электроприводов прокатных станов при провалах напряжения. Анализ существующих способов показал, что все они основаны либо на изменении алгоритмов регулирования в системе управления АВ, предусматривающих предупреждение по сетевому напряжению, либо на приобретении дорогостоящего электрооборудования, способного на время действия провала напряжения перевести питание чувствительных потребителей на резервный источник. В ряде случаев возможности таких мероприятий ограничены, особенно при глубоких провалах напряжения (более 20%).

Таким образом, проблема обеспечения устойчивой работы электроприводов прокатных станов в условиях частого возникновения провалов напряжения является актуальной 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.

В данном диссертационном исследовании предложен способ демпфирования провалов напряжения, основанный на использовании собственных резервов реактивной мощности уже установленных в системе электроснабжения статических тиристорных компенсаторов (СТК), функционирующих в комплексе со сверхмощными ДСП. Данное решение 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 экономических потерь, вызванных провалами напряжения.

Степень разработанности. Исследования эффективного применения компенсирующих устройств, а также разработки способов повышения эффективности функционирования электроприводов на базе современных ПЧ с АВ отражены в трудах отечественных и зарубежных ученых, таких как: Г.Я. Вагин, В.М. Пулин, Г.М. Михеев, В.В. Черепанов, А.Н. Шпиганович, А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмшин, А.С. Махлаков, 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 представленных исследованиях не учитываются первопричины возникновения провалов напряжения и не рассматриваются особенности их распространения по внутриводской 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 дуговых сталеплавильных печей.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ влияния провалов напряжения в системах внутриводского 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 содержит контуры регулирования напряжения, имеющие в своём составе пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы (ПИД-регуляторы), а также блок диагностики провалов напряжения.

3. Разработана инженерная методика выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов, *отличающаяся* от известных тем, что она позволяет определить номинальную мощность СТК с учетом дополнительной функции компенсации провалов напряжения.

4. Разработаны новые режимы работы систем внутриводского электроснабжения компактных металлургических заводов, *отличающиеся* от известных объединением секций шин среднего напряжения электросталеплавильного и прокатного комплексов для реализации функций демпфирования провалов напряжения с помощью СТК электродуговых печей.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, могут применяться на компактных металлургических предприятиях, в состав которых входят электросталеплавильный и прокатный комплексы, включающие в себя ДСП, УКП, СТК и электроприводы прокатных станов, выполненные на базе ПЧ с АВ. Исходя из этого, практическая и теоретическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанная усовершенствованная система управления статическим тиристорным компенсатором дуговой сталеплавильной печи, обеспечивает демпфирование провалов напряжения в системе внутриводского электроснабжения, вызванных однофазными короткими замыканиями во внешней питающей сети глубиной $\delta U_t = 10-30\%$, и отличается от существующих тем, что она имеет в своем составе контуры регулирования фазных напряжений с ПИД регуляторами и блок диагностики провалов напряжения.

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

3. Предложенные режимы работы систем внутриводского электроснабжения компактных металлургических предприятий являются значимыми для теории электроснабжения, т.к. позволяют повысить устойчивость работы электроприводов прокатных станов на базе ПЧ с АВ в условиях возникновения внешних провалов напряжения.

Объектом исследования в работе является электротехнический комплекс, включающий в себя дуговую сталеплавильную печь, установку печь-ковш, статический тиристорный компенсатор и электроприводы прокатных станов, выполненные на базе ПЧ с АВ.

Предметом исследования является система управления статическим тиристорным компенсатором, входящим в состав электротехнического комплекса, а также электроприводы прокатных станов на базе ПЧ с АВ.

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), 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 месте расположения районной электроэнергетической системы.

2. Усовершенствованная система управления СТК, обеспечивающая функции демпфирования провалов напряжения в системе внутриводского электроснабжения металлургического предприятия.

3. Инженерная методика выбора параметров СТК для промышленных предприятий, позволяющая на основе имеющихся статистических данных о провалах напряже-

ния, 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 правомерностью исходных положений и предпосылок; корректным применением математических методов моделирования; повторяемостью результатов экспериментов, полученных на однотипных объектах в разное время; соответствием результатов исследования результатам, опубликованным в научной литературе по схожей тематике другими авторами; результатами экспериментальных исследований разработанных алгоритмов управления в промышленных условиях на сверхмощной ДСП-250 (300 МВА), СТК 330 МВАр и электроприводах стана 1750 горячей прокатки, функционирующих на металлургическом заводе ЗАО «ММК Metalurji» (г. Искендерун, Турция).

Соответствие паспорту специальности. Задачи, решаемые в рамках данной диссертационной работы, соответствуют области исследования, обозначенной в паспорте специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», а именно п. 1 - «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем» и п. 3 – «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Апробация результатов диссертационной работы. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на XLIII, XLIV, XLV, XLVIII международных научно-практических конференциях «ФЁДОРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ» («Национальный исследовательский университет "МЭИ», г. Москва); 71-ой, 74-ой, 75-ой, 76-ой и 78-ой международных научно-технических конференциях «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» («Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск); международной конференции «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); международной уральской конференции по электроэнергетике «2020 INTERNATIONAL URAL CONFERENCE ON ELECTRICAL POWER ENGINEERING, URALCON 2020» (Chelyabinsk, 22–24 сентября 2020 года).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в РФ (проект №FZRU-2020-0011).

Публикации. Теоретические и практические результаты, полученные в ходе диссертационных исследований опубликованы в **17** печатных работах, из них **3 научные статьи** в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, **2** научные публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus. Кроме указанных работ получен патент на полезную модель и опубликована научная монография.

Структура и объем работы. Структура диссертации включает в себя введение, пять основных глав, заключения и списка литературы из **105** наименований. Работа изложена на **137** страницах основного текста, содержит **61** рисунок, **25** таблиц и приложения объемом **13** страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено описанию актуальности решаемой проблемы, её научной новизне. Помимо этого, намечены цели и задачи, показана теоретическая и практическая значимость выполненной работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе литературного обзора произведен анализ существующих устройств компенсации реактивной мощности, применяемых в системах электроснабжения электросталеплавильных комплексов, и рассмотрены некоторые виды существующих конфигураций схем электроснабжения действующих металлургических заводов. Результаты обзора показали, что в структуре каждого завода присутствует электросталеплавильный комплекс, включающий в себя ДСП, УКП и СТК, а также прокатный комплекс с главными электроприводами прокатных станов, выполненных на базе современных ПС с АВ. Отмечено, что в настоящее время доля СТК среди всех компенсирующих устройств, установленных в системах электроснабжения ДСП высокой и сверхвысокой мощности, составляет 90%.

В качестве объекта исследования был принят к рассмотрению стан 1750 горячей прокатки предприятия ЗАО «ММК Metalurji», в рамках которого проведен анализ влияния провалов напряжения на работу ПЧ с АВ (рис. 1). Показано, что 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 ($I_{cp} = 1500$ А) и напряжения в звене постоянного тока ($U_{cp.min} = 4600$ В и $U_{cp.max} = 5100$ В).

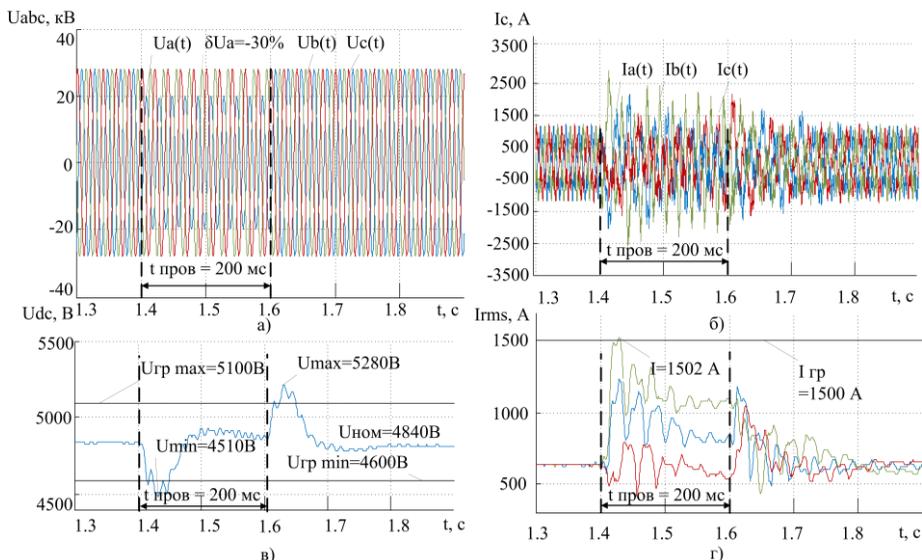


Рис. 1 Графики, иллюстрирующие работу ПЧ с АВ при провалах напряжения
 а) фазные напряжения на стороне 380 кВ; б) фазные токи на входе преобразователя частоты; в) напряжения в звене постоянного тока; г) действующие значения токов на входе преобразователя частоты

Произведен обзор наиболее известных способов ограничения влияния провалов напряжения на работу электроприводов стана. Для каждого способа проведен сравнительный анализ, выделены достоинства и недостатки.

Следует отметить, что повышение устойчивости работы главных электроприводов прокатного стана за счет применения специальных алгоритмов управления ПЧ с АВ не всегда могут быть реализованы на действующих установках из-за закрытой структуры систем управления силовых преобразователей. Не для всех фирм-производителей ПЧ с АВ возможно использование дополнительных функциональных блоков, позволяющих реализовать описанные в работе алгоритмы управления активным выпрямителем и автономным инвертором напряжения. Помимо этого, 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.

Во второй главе выполнен анализ конфигурации системы электроснабжения металлургического предприятия ЗАО ММК «Metalurji». Приведена схема электроснабжения предприятия с графически представленным распределением провалов напряжения во внутривзаводской распределительной сети (рис. 2)

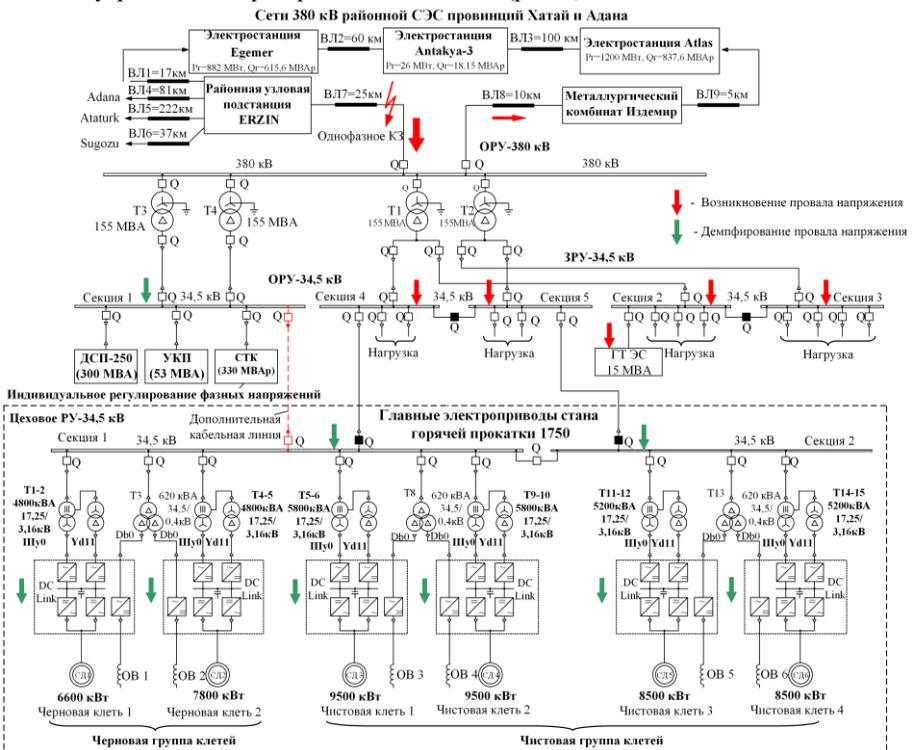


Рис.2 Распределение провалов напряжения во внутривзаводской системе электроснабжения 34,5 кВ предприятия ЗАО ММК «Metalurji»

В соответствии с поставленной задачей на основании реальных осциллограмм токов и напряжений произведен анализ распределения провалов напряжения по глубине и длительности. Определено, что наиболее часто возникают провалы напряжения глубиной $\delta U_i = 10 \div 50\%$ и длительностью $t_{пров} = 50 \div 100$ мс (рис. 3). Для определения причин возникновения провалов напряжения была принята к рассмотрению гипотеза о влиянии климатических особенностей на надежность работы СЭС.

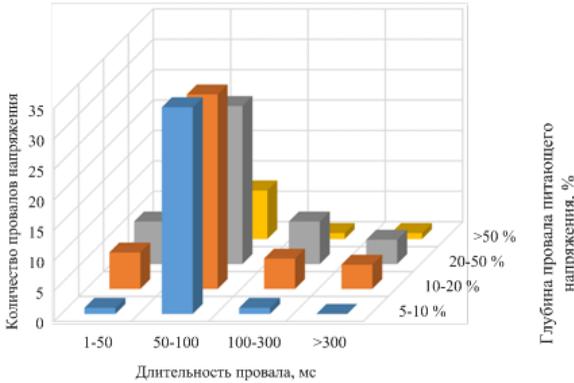


Рис.3 График распределения провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ металлургического завода ЗАО «ММК METALURJI» в период за 2012-2014г

Для подтверждения данной гипотезы была качественным образом исследована зависимость провалов напряжения от неблагоприятных погодных условий в период за 2013 год (рис.4) путем сопоставления годовых графиков распределения данных событий.

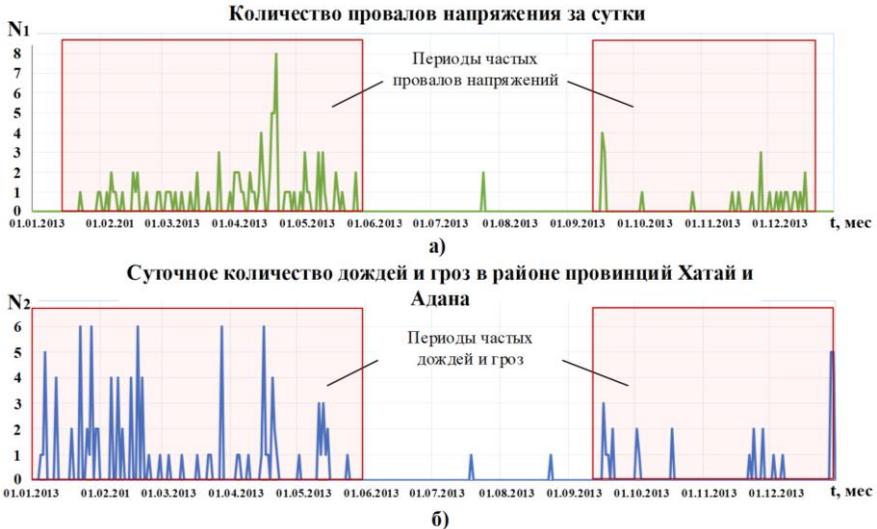


Рис.4 Графики возникновения провалов напряжения в течение 2013 года (а) и выпадения дождей с грозами в районе провинций Хатай и Адана (б)

Как видно из рис. 4 наблюдается совпадение максимальной частоты возникновения обоих событий во времени, что позволяет сделать вывод о зависимости провалов напряжения от грозовой активности в месте расположения исследуемого энергорайона района Турции.

Третья глава диссертационного исследования посвящена разработке усовершенствованной системы управления СТК и исследованию режимов компенсации провалов напряжения с использованием резерва реактивной мощности. Для реализации предложенного способа произведен пересмотр существующих алгоритмов управления тиристорно-реакторной группой (ТРГ), предусматривающий быстрое действующую диагностику провала напряжения и осуществление индивидуального поддержания фазного напряжения с последующим возвратом системы управления в исходное состояние. Функциональная схема разработанной системы управления представлена на рис. 5.

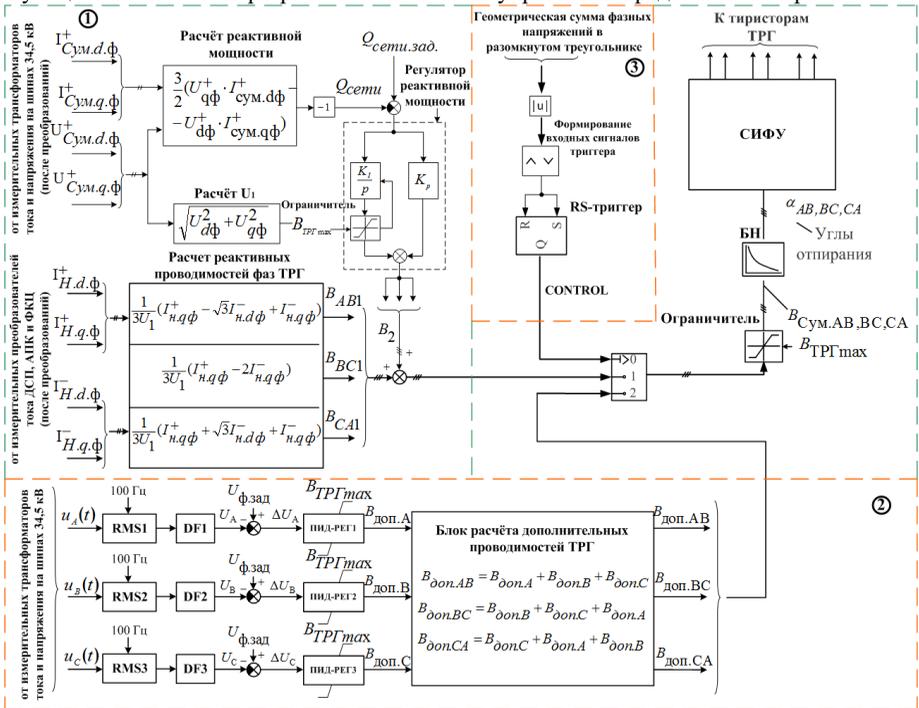


Рис.5 Функциональная схема усовершенствованной системы управления СТК 330 МВАр с переключающейся структурой

В усовершенствованном варианте системы управления СТК блоки, выполняющие классические функции, расположены в контуре 1 и представляют из себя прямой и обратный каналы регулирования. Прямой канал предназначен для расчета требуемых значений проводимостей фаз ТРГ на основе разложения тока нагрузки на *d-q* составляющие для прямой и обратной последовательностей. Функция обратного канала заключается в сравнении фактической и реальной величин реактивной мощности и создания корректирующего сигнала для формирования общего задания на реактивную мощность в узле нагрузки.

Контур регулирования напряжения 2 предназначен для расчёта дополнительных проводимостей фаз ТРГ на основе мгновенных значений фазных токов и напряжений электросталеплавильного комплекса. Фактически действие этого контура основано на работе трех индивидуальных ПИД регуляторов фазных напряжений. Интегральная часть данного регулятора обеспечивает выход на нулевую ошибку регулирования. Пропорционально-дифференциальная часть обеспечивает необходимое быстрое действие в переходных режимах: период возникновения провала и период восстановления напряжения. Дополнительный блок диагностики провалов напряжения 3 определяет момент переключения системы управления СТК с классической структуры на новую с контурами регулирования фазных напряжений и обратно.

Для исследования эффективности разработанной системы управления СТК в программе Matlab в приложении Simulink разработана модель комплекса «ДСП–УКП–СТК», на которой искусственно воспроизводились провалы напряжения различной глубины и длительности. Временные диаграммы изменения напряжения 34,5 и 380 кВ, показывающие реакцию СТК на провал напряжения глубиной 23% и длительность 200 мс, приведены на рис. 6.

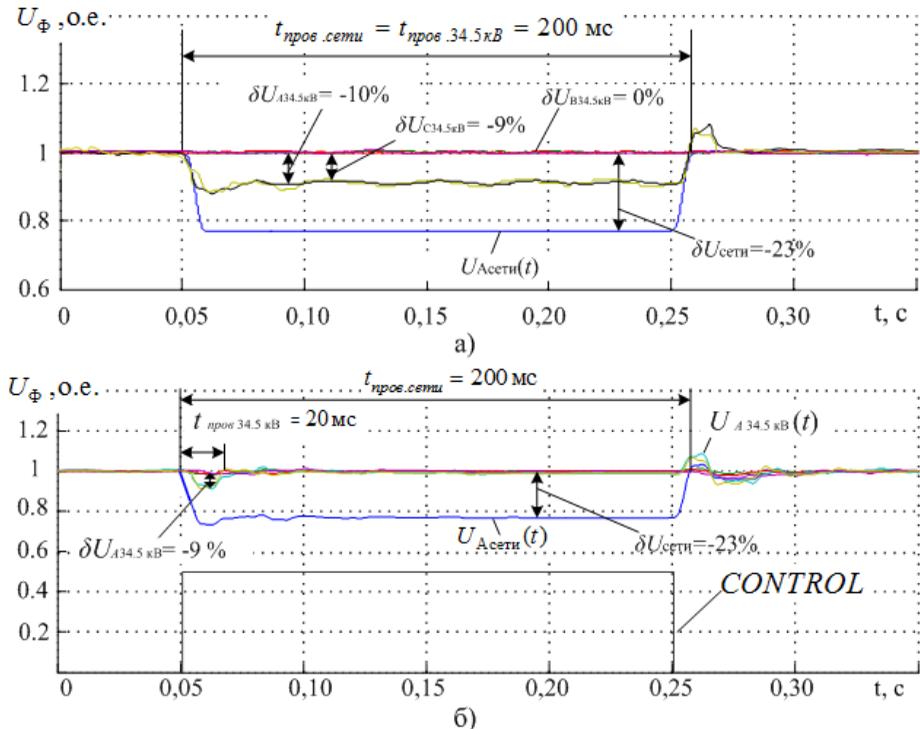


Рис. 6 Временные диаграммы изменения напряжения на шинах 34,5 и 380 кВ, показывающие реакцию СТК на провал напряжения при использовании **классической** (а) и **усовершенствованной** (б) системы управления

Анализ результатов исследований показал, что при использовании классической системы управления СТК с регулятором реактивной мощности имеет место неправиль-

ная реакция СТК на несимметрию напряжения, и компенсатор в этом случае лишь частично уменьшает глубину провала в сети 34,5 кВ до 10% (рис. 6, а). 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 усовершенствованной системы управления за счет активации индивидуальных контуров регулирования фазных напряжений с ПИД регуляторами удается полностью восстановить напряжение на шинах 34,5 кВ за время равное 20 мс (рис. 6, б). Наличие дифференциальной составляющей обеспечивает отсутствие значительного перерегулирования фазных напряжений в моменты возникновения и исчезновения провала. Благодаря новым элементам осуществляется формирование корректирующих сигналов на реактивные проводимости отдельных фаз ТРГ $B_{0onAB,BC,CA}$, которые изменяют результирующие значения $B_{\Sigma AB,BC,CA}$ так, чтобы исключить несимметрию напряжения на секции распределительного устройства 34,5 кВ.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что новая система управления СТК позволяет обеспечить демпфирование провалов напряжения, возникающих в системе электроснабжения предприятия.

В четвертой главе диссертационного исследования произведена разработка инженерной методики выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом новых дополнительных функций демпфирования провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети.

На основе анализа различных типов схем электроснабжения электросталеплавильных и прокатных комплексов было показано, что однофазный провал напряжения, возникающий во внешней питающей сети, при трансформации на низкую сторону сетевого трансформатора с группой соединения обмоток $Y/\Delta-11$ меняет свой вид.

Для анализа изменения уровня напряжения на шинах 34,5 кВ на разработанной имитационной модели комплекса «ДСП-СТК» были получены действующие значения фазных и линейных напряжений 34,5 кВ при различных значениях глубины провала напряжения в сети 380 кВ. Полученные результаты показали, что при провале напряжения в фазе А сети 380 кВ напряжение в сети 34,5 кВ в фазах А и С снижается, а в фазе В остается на прежнем уровне. Процесс трансформации однофазного провала напряжения на вторичную сторону сетевого трансформатора рассмотрен с помощью векторных диаграмм (рис. 7). Описанное явление было учтено при разработке изменений в классической системе управления СТК.

Далее, согласно поставленной в диссертационном исследовании задаче, для разработки инженерной методики оценки установленной мощности СТК, была определена расчетная зависимость требуемой величины реактивной мощности, необходимой для выполнения функций демпфирования провалов напряжения различной глубины. Для этого была рассмотрена упрощенная схема электроснабжения электросталеплавильного и прокатного комплексов (рис. 8). Данная схема включает в себя следующие основные элементы: источник напряжения, активное и индуктивное сопротивления сети, сетевого трансформатора и нагрузка, представленная агрегатами ДСП, СТК, УКП и главными электроприводами прокатного стана. Все основные параметры приведены к низкой стороне сетевого трансформатора Т1 (рис. 8, б).

Для определения требуемой величины реактивной мощности с помощью векторных диаграмм токов и напряжений, была получена формула для определения потери напряжения в линии 34,5 кВ:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot \left(\frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s_34.5кВ}}{\sqrt{3} \cdot U_{s_34.5кВ}} + \frac{Q_{\Sigma} \cdot X_{s_34.5кВ}}{\sqrt{3} \cdot U_{s_34.5кВ}} \right) = \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{s_34.5кВ} + Q_{\Sigma} \cdot X_{s_34.5кВ}}{U_{s_34.5кВ}}. \quad (1)$$

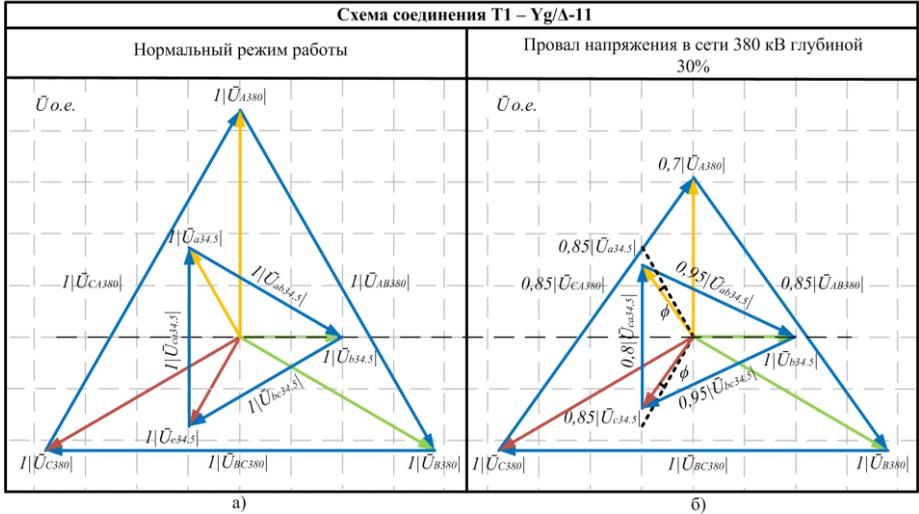


Рис. 7 Векторные диаграммы напряжений на секциях распределительных устройств 34,5 и 380 кВ, при нормальной работе сети (а) и при однофазном провале напряжения на стороне 380 кВ (б)

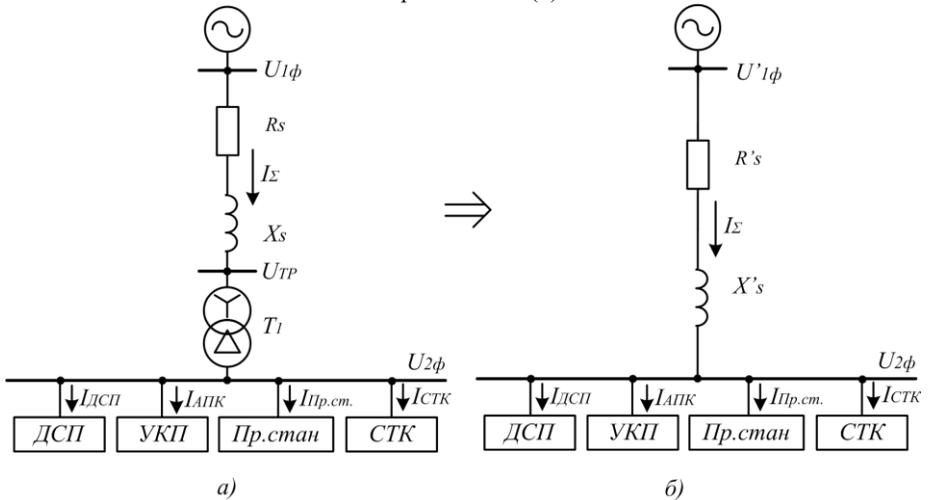


Рис. 8 Упрощённая схема системы электроснабжения электросталеплавильного комплекса завода ЗАО «ММК Metalurji» и её схема замещения

После перехода от абсолютной к относительной потере напряжения и представления сопротивления сети как:

$$X_{S_{34,5кВ}} = \frac{U_{S_{34,5кВ}}^2}{S_{кз_{34,5кВ}}}, \quad (2)$$

получена необходимая зависимость $Q_{СТК} = f(\delta U_{380})$:

$$Q_{СТК} = S_{кз_{34,5кВ}} \cdot (\delta U_{380} - \frac{P_{\Sigma} \cdot R_{S_{34,5кВ}}}{U_{S_{34,5кВ}}^2}) + Q_{ДСП}, \quad (3)$$

где $S_{кз_{34,5кВ}}$ - мощность короткого замыкания сети 34,5 кВ, МВА; $\delta U_{380кВ}$ - величина провала напряжения в сети 380 кВ, о.е., связанная с провалом напряжения в сети 34,5 кВ соотношением $\delta U_{380} = 0,5 \cdot \delta U_{34,5}$, из-за влияния группы соединения сетевых трансформаторов 380/34,5 кВ Y/Δ-11; P_{Σ} - суммарная активная мощность ДСП, УКП и главных электроприводов прокатного стана, МВт; $R_{S_{34,5кВ}}$ - активное сопротивление сети 34,5 кВ, Ом; $U_{S_{34,5кВ}}$ - напряжение сети 34,5 кВ; $Q_{ДСП} = Q_{СТК} - Q_{\Sigma}$ - реактивная мощность ДСП, МВАр.

В полученной формуле есть два параметра, которые зависят от уровня напряжения в сети: P_{Σ} и $Q_{ДСП}$. Для определения данных зависимостей на разработанной имитационной модели исследуемого электротехнического комплекса были искусственно воссозданы однофазные и трехфазные провалы напряжения в сети 380 кВ различной глубины (от 0 до 100 %). Полученные результаты моделирования представлены на рис. 9.

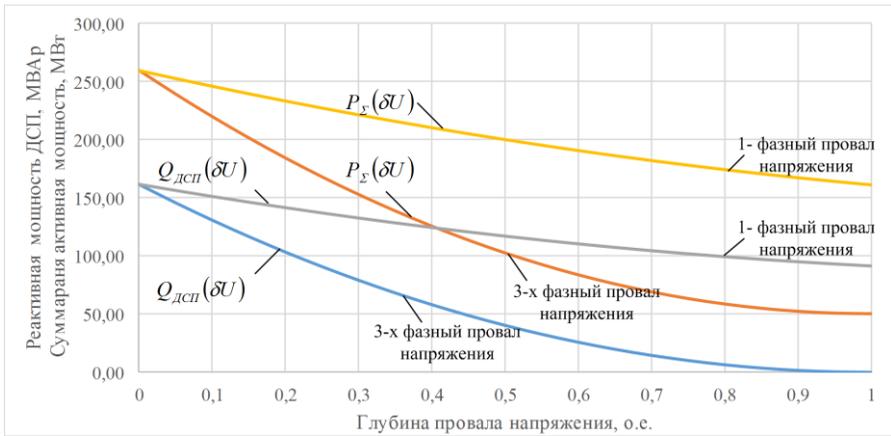


Рис. 9 Функции изменения суммарной активной мощности $P_{\Sigma}(\delta U)$ и реактивной мощности ДСП $Q_{ДСП}(\delta U)$ от глубины однофазного и трехфазного провалов напряжения

Аппроксимация характеристик (рис. 9), представлена с помощью регрессионных уравнений:

- для случая с однофазным провалом напряжения:

$$P_{\Sigma}(\delta U_{380}) = 32,469 \cdot \delta U_{380}^2 - 110,42 \cdot \delta U_{380} + 165,87; \quad (4)$$

$$Q_{ДСП}(\delta U_{380}) = 37,872 \cdot \delta U_{380}^2 - 108,16 \cdot \delta U_{380} + 161,82; \quad (5)$$

- для случая с трехфазным провалом напряжения:

$$P_{\Sigma}(\delta U_{380}) = 166,06 \cdot \delta U_{380}^2 - 332,12 \cdot \delta U_{380} + 166,06; \quad (6)$$

$$Q_{ДСП}(\delta U_{380}) = 161,64 \cdot \delta U_{380}^2 - 323,27 \cdot \delta U_{380} + 161,64. \quad (7)$$

После их подстановки в выражение (3) получим:

- при однофазном провале напряжения:

$$Q_{СТК} = (37,872 - 32,469 \cdot \frac{R_{s_34,5кВ} \cdot S_{кз_34,5кВ}}{U_{s_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U_{380}^2 + (S_{кз_34,5кВ} - 108,16 + 110,42 \cdot \frac{R_{s_34,5кВ} \cdot S_{кз_34,5кВ}}{U_{s_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U_{380} + (161,82 - 165,87 \cdot \frac{R_{s_34,5кВ} \cdot S_{кз_34,5кВ}}{U_{s_34,5кВ}^2}). \quad (8)$$

- при трехфазном провале напряжения:

$$Q_{СТК} = (161,64 - 166,06 \cdot \frac{R_{s_34,5кВ} \cdot S_{кз_34,5кВ}}{U_{s_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U_{380}^2 + (S_{кз} - 323,27 + 332,12 \cdot \frac{R_{s_34,5кВ} \cdot S_{кз_34,5кВ}}{U_{s_34,5кВ}^2}) \cdot \delta U_{380} + (161,64 - 166 \cdot \frac{R_{s_34,5кВ} \cdot S_{кз_34,5кВ}}{U_{s_34,5кВ}^2}). \quad (9)$$

Зависимость $Q_{ДСП} = f(\delta U_{380})$ при однофазном и трехфазном провалах напряжения приведена на рис. 10.

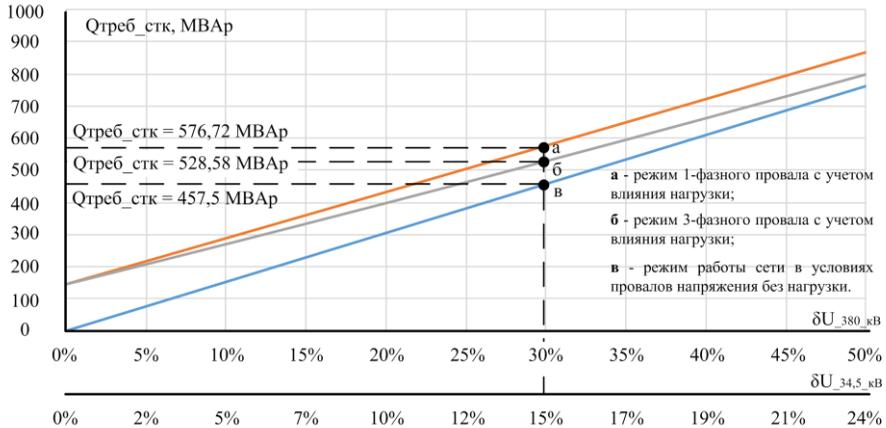


Рис. 10 Графики зависимостей требуемой реактивной мощности СТК от глубины однофазных (а) и трехфазных (б) провалов напряжения при включенном и отключенном (в) состоянии ДСП, УКП и приводов прокатного стана

Как было отмечено 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 величин:

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

При включенном состоянии ДСП-250:

$$U_{a34,5кВ} = 0,9 \cdot U_{\text{ном}_34,5кВ}; U_{b34,5} = 1 \cdot U_{\text{ном}_34,5кВ}; U_{c34,5} = 0,9 \cdot U_{\text{ном}_34,5кВ}.$$

Минимальная глубина провала напряжения в сети 380 кВ, которая способна вызвать превышение допустимого действующего значения тока на входе АВ (выше 1500 А), составляет 30% (15% на стороне 34,5 кВ). 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 предложена методика выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом новых дополнительных функций демпфирования провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети. Суть 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 исходные данные в выражение (3) и определить требуемое количество реактивной мощности СТК, необходимое для поддержания напряжения во внутривзаводской сети выше установленного порогового значения.

Для устойчивой работы электроприводов прокатных станов должна быть обеспечена параллельная работа прокатного и электросталеплавильного комплексов. В рамках исследуемого объекта рекомендована прокладка дополнительной кабельной линии между шинами 34,5 кВ ГПП и цехового распределительного устройства 34,5 кВ (рис. 2).

В **пятой главе** выполнена проверка эффективности предложенных в диссертации мероприятий. На данном этапе была проанализирована демпфирующая способность СТК 330 МВАр с усовершенствованной системой управления электрическим режимом в условиях фактических провалов напряжения, произошедших в сети 380 кВ в период 2012-2014 г.

Исследовались три характерных режима, которые были реализованы на ранее разработанной имитационной модели: 1) работающая ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр; 2) отключенная ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК 330 МВАр; 3) работающая ДСП-250 с классической системой управления СТК 330 МВАр.

В ходе проведения эксперимента оценивалась способность СТК 330 МВАр восстанавливать уровень напряжения в сети 34,5 кВ при провалах напряжения в сети 380 кВ. Результат проверки показал, что в первом случае может быть скомпенсировано 67% всех провалов напряжения, случившихся за исследуемый период. Во втором случае, при отключенной ДСП - 77%. В третьем варианте, с классической системой управления, компенсации не происходит. Здесь необходимо отметить, что только 39% всех провалов напряжения, не вызвали снижения напряжения на шинах распределительного устройства 34,5 кВ ниже, чем на 10%. Демпфирующая способность СТК 330 МВАр отражена на рис.11.

Для определения процента скомпенсированных провалов напряжения с учетом различных режимов работы ДСП-250, было определено фактическое время работы печи, которое равно разнице между календарным временем и режимными простоями с ППР, ч:

$$T_{\text{факт}} = T_{\text{календ}} - T_{\text{режим}} - T_{\text{ППР}} \quad (10)$$

Согласно данным ЗАО «ММК Metalurji» среднее фактическое время работы ДСП-250 равно 6968 часов из 8760 возможных часов в году. В табл. 1 приведена оценка времени работы ДСП-250 и демпфирующей способности СТК 330 МВАр.

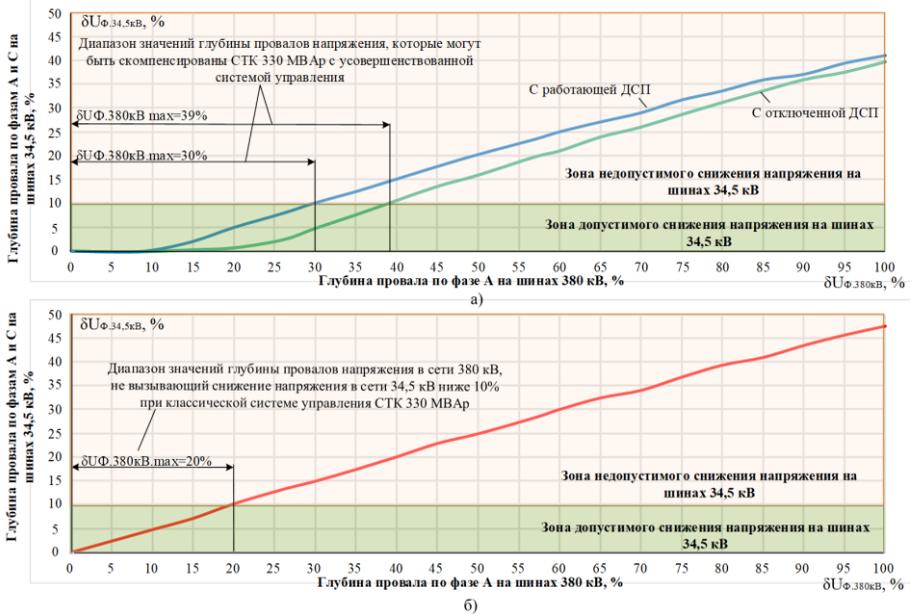


Рис.11. Демпфирующая способность СТК 330 МВАр при: а) работающей и отключенной ДСП-250 с усовершенствованной системой управления СТК; б) включенной ДСП-250 с классической системой управления СТК

Таблица 1 – Оценка времени работы ДСП-250 и демпфирующей способности СТК 330 МВАр

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 %

На основании данных в табл. 1 был выполнен расчет вероятности компенсации провалов напряжения с учетом фактического времени работы ДСП-250:

$$P = T_{\text{раб.ном.}} \cdot P_{\text{вкл.ДСП}} + T_{\text{откл.}} \cdot P_{\text{откл.ДСП}} = 0,67 \cdot 0,7955 + 0,77 \cdot 0,2045 = 0,69 \text{ о.е.} \quad (11)$$

где $T_{\text{раб.ном.}}$ – среднее номинальное время работы ДСП-250 в году, о.е.; $T_{\text{откл.}}$ – среднее время в году в течение которого ДСП-250 отключена, о.е.; $P_{\text{вкл.ДСП}}$ – среднегодовой процент скомпенсированных провалов напряжения при включенной ДСП-250, о.е.; $P_{\text{откл.ДСП}}$ – среднегодовой процент скомпенсированных провалов напряжения при отключенной ДСП-250, о.е.

Таким образом, предложенные научно обоснованные технические решения позволяют обеспечить в 69% случаев возникновения провалов напряжения устойчивую работу электроприводов прокатного стана 1750 на базе ПЧ с АВ без аварийных отключений.

Разработанные способы и алгоритмы управления рекомендованы для расширенного применения на компактных металлургических предприятиях с одинаковым уровнем напряжения в прокатных и электросталеплавильных комплексах. По факту проведенных исследований подписан акт об использовании результатов диссертации на предприятии ЗАО «ММК Metalurji». Ожидаемый технический эффект, основанный на снижении времени внеплановых простоев прокатного стана 1750 из-за влияния провалов напряжения, составляет 20 часов в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Проведен анализ влияния провалов напряжения в системах внутриводского электроснабжения компактного металлургического предприятия на работу главных электроприводов прокатного стана, выполненного на базе ПЧ с АВ. Доказано, что при возникновении провалов напряжения во внешней питающей сети с глубиной более 30% и длительностью 150-300 мс возникают аварийные отключения преобразователей частоты из-за выхода за пределы допустимых границ действующих значений токов на входе АВ и снижения напряжения в звене постоянного тока. Аварийные отключения ПЧ с АВ приводят к остановкам прокатного стана, следствием которых является серьезный экономический ущерб для металлургического предприятия.

2. Разработана имитационная модель электротехнического комплекса «ДСП-УКП-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. Разработана усовершенствованная система управления СТК дуговой сталеплавильной печи, обеспечивающая демпфирование провалов напряжения в системе внутриводского электроснабжения, дополненная контурами регулирования напряжения, имеющими в своём составе пропорционально-интегрально-дифференцирующие регуляторы, и контуром диагностики провалов напряжения в питающей сети.

3. 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. Так, с помощью полученной математической зависимости $Q_{СТК} = f(\delta U_{380})$, на примере однофазного и трехфазного провалов напряжения глубиной 30% рассчитано требуемое значение реактивной мощности для случаев с включенной и отключенной нагрузкой в виде ДСП, УКП и главных электроприводов стана горячей прокатки.

4. Даны рекомендации по построению систем внутриводского электроснабжения компактных металлургических предприятий. Доказана возможность включения на параллельную работу электроприемников прокатных станков и электросталеплавильного комплекса, при которой секции шин электросталеплавильного и прокатного комплексов объединены между собой.

5. Проведена оценка предложенных решений на примере предприятия ЗАО «ММК Metalurji». Определена демпфирующая способность СТК 330 МВАр, обозначены границы допустимых значений глубины провалов напряжений во внешней питающей сети, которые могут быть скомпенсированы с учетом реализации предложенных рекомендаций. С учетом фактического времени работы ДСП-250, вероятность того, что напряжение на шинах 34,5 кВ после провала напряжения в сети 380 кВ будет восстановлено, составляет 69%.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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.

2. Николаев, А.А. Разработка методики оценки резервов реактивной мощности статических тиристорных компенсаторов промышленных предприятий для компенсации провалов напряжения / А.А. Николаев А.А., **В.С. Ивекеев**, И.А. Ложкин // Электротехнические системы и комплексы. – 2019. – №44. – С. 16-26.

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

Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus

4. 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.

5. 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.

Публикации в материалах международных конференций

6. 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 «Фёдоровские чтения – 2015»: – М.: Издательский Дом МЭИ, 2015. – С. 198-201.

7. Николаев, А.А. Исследование провалов напряжения металлургического завода ЗАО «ММК METALURJ» и способы их локализации / А.А. Николаев, Г.П. Корнилов, **В.С. Ивекеев** // Сборник трудов XLIII Международной научно-практической конференции «Фёдоровские чтения – 2015»: – М.: Издательский Дом МЭИ, 2013. – С. 16-18.

8. Николаев, А.А. Исследование статического тиристорного компенсатора сверхмощной дуговой сталеплавильной печи с целью обеспечения устойчивости электроэнергетической системы и внутривзаводского электроснабжения / А.А. Николаев, И.А. Ложкин, **В.С. Ивекеев** // Сборник трудов XLIV Международной научно-практической конференции "Фёдоровские чтения – 2014": – М.: Издательский Дом МЭИ, 2014. – С. 106-109.

9. 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 «Фёдоровские чтения – 2018»: – М.: Издательский Дом МЭИ, 2018. – С. 205-213.

10. 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 «Фёдоровские чтения – 2018»: – М.: Издательский Дом МЭИ, 2018. – С. 218-223.

11. Николаев А.А., Анализ влияния коротких замыканий в электрической сети 380 кВ на провалы напряжения в системе внутривозовского 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»: – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та. – 2016. – С. 155-158.

12. 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** // Сборник трудов 75-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования»: – 2017. – С. 205-207.

Публикации в других периодических изданиях

13. 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.

14. 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.

15. 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 06.07.2021).

16. 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.

17. 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.

Патенты РФ

1. 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.

Научные монографии

2. Николаев, А.А. Повышение эффективности работы электродуговых печей за счет применения новых алгоритмов управления реактивной мощностью статических тиристорных компенсаторов: монография / А.А. Николаев, В.В. Анохин, **В.С. Ивекеев**. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, – 2018. – 229 с.