

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.111.04,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,  
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 17.12.2021 г. № 5

О присуждении Ивекееву Владимиру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение устойчивости работы электроприводов прокатных станов при провалах напряжения за счет применения статического тиристорного компенсатора» по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы принята к защите 30 сентября 2021 г. (протокол № 4) диссертационным советом Д 212.111.04, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 714/нк от 02.11.2012 г.

Соискатель Ивекеев Владимир Сергеевич, 4 июня 1992 года рождения. В 2015 году соискатель окончил магистратуру в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника». В 2019 году соискатель окончил обучение в аспирантуре ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по направлению подготовки 13.06.01 – Электро- и теплотехника.

Работает ведущим специалистом по цехам горячего проката в управлении технического обслуживания в ООО «Объединенная сервисная компания».

Диссертация выполнена на кафедре автоматизированного электропривода и мехатроники ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Николаев Александр Аркадьевич, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра автоматизированного электропривода и мехатроники, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

1. Михеев Георгий Михайлович – доктор технических наук, доцент, Чебоксарский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», кафедра информационных технологий, электроэнергетики и систем управления, профессор;

2. Маклаков Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра электропривода и мехатроники, доцент,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк, в своем положительном отзыве, подписанном Зацепиным Евгением Петровичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электрооборудование», указала, что диссертация Ивекеева Владимира Сергеевича «Повышение устойчивости работы электроприводов прокатных станов при провалах напряжения за счет применения статического тиристорного компенсатора» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациями в соответствии с п.п. 9 – 14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, представляет собой решение актуальной задачи повышения устойчивости работы электроприводов прокатных станов при провалах напряжения за счет применения статического тири-

сторного компенсатора, а её автор, Ивекеев Владимир Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы.

Соискатель имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы; в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus опубликовано 2 работы; в периодических изданиях опубликовано 5 работ; в сборниках материалов международных конференций опубликовано 7 работ. Общий объем публикаций составляет 9,6 печатных листов. Кроме того, по теме диссертации опубликована 1 научная монография и получен 1 Патент РФ на полезную модель. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя заключается в разработке новых алгоритмов и системы управления статического тиристорного компенсатора (СТК), позволяющих производить быстродействующую диагностику и компенсацию провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети; статистической оценке провалов напряжения, с помощью которой доказано их негативное влияние на работу основного металлургического оборудования прокатных станов; разработке инженерной методики выбора параметров СТК в зависимости от глубины провалов напряжения; исследовании режимов параллельной работы электросталеплавильного и прокатного комплексов.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

На диссертацию и автореферат поступило 8 отзывов, все положительные:

**1. Отзыв ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» г. Екатеринбург** (канд. техн. наук, доцент Костылев А.В., канд. техн. наук, доцент Ишматов З.Ф.): 1) В автореферате диссертации следовало бы привести дополнительно примеры компактных металлургических заводов с одинаковым уровнем напряжения прокатного и электросталеплавильного комплексов, а также их распространенность в современной промышленности; 2) На рис.4 приведены графики возникновения провалов напряжения в течение 2013 года и выпадения дождей с грозами в районе провинций Хатай и Адана для иллюстрации гипотезы о влиянии климатических особенностей региона на надежность системы электроснабжения. Однако не приведены убедительные доказательства такой связи. Более того, остается не ясным, как связано такое исследование с темой диссертации.

**2. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»** (канд. техн. наук, доцент Хазиева Р.Т.): 1) При проведении анализа распределения провалов напряжения во внешней питающей сети 380 кВ (стр. 9) следовало бы указать, какой процент фактически возникших провалов напряжения вызвал отключение главных приводов стана 1750 горячей прокатки; 2) В автореферате нет информации о том, какая предельная глубина провалов напряжения для существующего СТК 330 МВАр. Почему на рис. 6 воспроизведен провал глубиной 23%, а на рис. 10 глубиной 30%?

**3. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»** (д-р техн. наук, профессор Рогинская Л.Э., канд. техн. наук, доцент Горбунов А.С.): 1) В автореферате не представлены имитационные модели исследуемых электротехнических комплексов и систем управления, на

базе которых получены основные результаты диссертации 2) В качестве основных причин возникновения коротких замыканий во внешней сети 380 кВ в автореферате рассматривались неблагоприятные погодные условия в виде дождей, однако рассмотрению других причин не уделено достаточно внимания.

**4. Отзыв ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» г. Москва** (д-р техн. наук, доцент Шевырев Ю.В.): 1) Не приведена общая модель электротехнического комплекса «ДСП-СТК», по которой производилась разработка инженерной методики выбора параметров СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов. Хотя в тексте автореферата автор на нее постоянно ссылается; 2) На рис. 10 показаны зависимости требуемой реактивной мощности СТК от глубины однофазных и трехфазных провалов напряжения. Хотелось бы уточнить, почему для компенсации однофазного провала напряжения глубиной 30% требуется большее количество реактивной мощности, чем для компенсации трехфазного провала такой же глубины?

**5. Отзыв ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет»** (д-р техн. наук, профессор Черепанов В.В., канд. техн. наук, доцент Басманов В.Г.): Пункт 2 раздела «Научная новизна», по нашему мнению, не содержит научной новизны, но имеет практическую значимость. Его следует перенести в раздел «Теоретическая и практическая значимость работы».

**6. Отзыв ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»** (д-р техн. наук, профессор Колганов А.Р.): в п. 4 научной новизны указано, что разработаны новые режимы работы систем внутривзаводского электроснабжения компактных металлургических заводов. Хотя в тексте автореферата информация о новых режимах отсутствует. Каким образом учитывают наличие фактора сезонности данные режимы работы?

**7. Отзыв ЗАО «Консом СКС» г. Магнитогорск** (канд. техн. наук Демин А.С., канд. техн. наук Васильев А.Е.): 1) В работе часто применяется такой параметр сети как мощность короткого замыкания, при этом нигде не указана его величина на шинах 34,5 кВ. Каким образом она была посчитана? 2) В представ-

ленной имитационной модели усовершенствованной системы управления СТК, которая включает в себя контур регулирования напряжения с ПИД-регуляторами. Каким образом производился подбор коэффициентов в данном регуляторе?

**8. Отзыв ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»** (д-р техн. наук, профессор Сушков В.В., канд. техн. наук Лосев Ф.А.): 1) На рисунке 3 приводится график распределения провалов напряжения, необходимо пояснить, какие виды провалов напряжения учитывались в этом распределении; 2) В главе 4 не проанализировано влияние двухфазных провалов напряжения на устойчивость электропривода, несмотря на то, что они возникают чаще трехфазных провалов напряжения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их научными достижениями в области изучения и совершенствования режимов работы электротехнических комплексов, имеющих в своём составе дуговые сталеплавильные печи (ДСП), а также научными исследованиями и практическими разработками, направленными на совершенствование электроприводов прокатных станов.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработаны:** усовершенствованная система управления СТК ДСП, позволяющая реализовать функции демпфирования провалов напряжения в системе внутриводского электроснабжения; новые режимы работы систем внутриводского электроснабжения, предусматривающие объединение шин электросталеплавильных и прокатных комплексов, что позволяет обеспечить параллельную работу электроприводов прокатного стана и СТК ДСП;

**предложены** оригинальные научно обоснованные технические решения по снижению влияния провалов напряжения, возникающих в системе электроснабжения металлургического предприятия, на устойчивость работы преобразователей частоты с активными выпрямителями за счет использования резервов реактивной мощности СТК ДСП;

**доказана** эффективность предложенных систем управления СТК, содержащих контуры регулирования напряжения и блоки диагностики провалов напряжения;

**введены** новые рекомендации по работе систем внутриводского электрообеспечения, предусматривающие объединение шин электросталеплавильных и прокатных комплексов.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**доказано**, что за счет применения усовершенствованных алгоритмов системы управления СТК ДСП возможно поддержание напряжения на шинах прокатного комплекса в моменты провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети;

**применительно к проблематике диссертации эффективно использованы** методы имитационного моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в условиях действующего производства;

**изложена** идея реализации способа демпфирования провалов напряжения за счет использования резервов реактивной мощности, предусматривающего использование мощных СТК ДСП;

**раскрыты:** причины возникновения провалов напряжения и характер их распространения во внутриводской сети после трансформации через сетевые трансформаторы главных понизительных подстанций;

**изучено** влияние провалов напряжения, возникающих во внешней питающей сети, на устойчивую работу электроприводов прокатных станов;

**проведена модернизация** существующих алгоритмов управления СТК, путем осуществления быстродействующей диагностики провалов напряжения и пофазного регулирования напряжения на шинах распределительного устройства прокатного стана.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**разработаны и внедрены:** усовершенствованная система управления СТК ДСП, обеспечивающая демпфирование провалов напряжения, возникающих во

внешней питающей сети; рекомендации по построению систем внутривозводского электроснабжения компактных металлургических предприятий;

**определены:** эффективность применения усовершенствованной системы управления СТК для компактных металлургических предприятий; предельная глубина провалов напряжения при которой происходит отключение главных электроприводов прокатных станов; вероятность возникновения провалов напряжения в зависимости от периодов выпадения сезонных осадков;

**создана** 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 требуемой реактивной мощности компенсатора, необходимой для выполнения дополнительных функций демпфирования провалов напряжения;

**представлены:** рекомендации по работе систем внутривозводского электроснабжения, предусматривающие объединение шин электросталеплавильных и прокатных комплексов; рекомендации по расчету параметров СТК, позволяющие осуществлять функций демпфирования провалов напряжения.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

корректность применения математического аппарата; теоретические исследования выполнены с использованием реальных технических характеристик силового электрооборудования сверхмощных ДСП, СТК и главных электроприводов прокатных станов при правомерных исходных положениях и обоснованных допущениях;

**теория** базируется на известных положениях теории автоматического управления электротехническими комплексами, методах теории электрических цепей, положениях теории электрических машин, а также методах математического моделирования;

**идея** базируется на использовании известных методов компенсации реактивной мощности на металлургических предприятиях;

**выполнено** сравнение результатов исследований, полученных автором, с

результатами, представленными в патентных и литературных источниках, посвященных вопросам демпфирования провалов напряжения;

**установлено** качественное и количественное совпадение результатов математического моделирования с экспериментальными данными, полученными на действующих электросталеплавильных комплексах;

**использованы** современные методы имитационного моделирования с применением математического пакета Matlab.

Личный вклад соискателя состоит в: постановке цели и задач исследования; разработке комплексной имитационной модели электротехнического комплекса «ДСП-СТК-главные электроприводы прокатных станов», воспроизводящей реальные физические процессы, протекающие во внутрицеховой сети в моменты провалов напряжения; определении пределов генерирования реактивной мощности при работающей и отключенной ДСП; разработке методики выбора СТК для электросталеплавильных и прокатных комплексов с учетом функций демпфирования провалов напряжения, заключающейся в прогнозировании необходимого количества реактивной мощности, которую необходимо заложить в СТК, для обеспечения бесперебойного электроснабжения и безаварийного производства; разработке рекомендаций по построению систем внутриводского электроснабжения компактных металлургических предприятий.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

**В отзыве ведущей организации:**

1. В работе не связана длительность провала напряжения с работой релейных защит, установленных на ГПП. Также не описано влияние ограничителей перенапряжения при внешних однофазных коротких замыканиях.

2. В первой главе при анализе возможных решений, направленных на снижение влияния провалов напряжения, автором не рассмотрен вариант повышения уставок защит электроприводов прокатных станов.

3. В четвертой главе указано, что для достижения устойчивой работы электроприводов прокатных станов при провалах напряжения должна быть обеспе-

чена параллельная работа прокатного и электросталеплавильного комплексов. Автором не раскрыто влияние печи, работающей в режиме расплава, на работу чувствительных электроприемников прокатного производства?

4. В пятой главе автором определена вероятность безотказной работы электроприводов стана горячей прокатки. Необходимо уточнить является ли данная вероятность достаточной для работы электрического оборудования.

**В отзыве официального оппонента Михеева Г.М.:**

1. В первой главе диссертации произведено сравнение известных устройств компенсации реактивной мощности. Не понятно, для чего приведен данный анализ, поскольку в дальнейшем рассматривается только статический тиристорный компенсатор.

2. Недостаточно подробно изложена суть предлагаемой методики выбора параметров СТК. В чем заключается смысл методики как совокупности методов?

3. Каким образом классифицирована имитационная модель, представленная в работе, как разряд моделей?

4. В диссертации много внимания уделено техническим данным оборудования. При этом не указано напряжение короткого замыкания печного трансформатора. Автор похоже не различает разницу между группой и схемой соединения обмоток силовых трансформаторов (табл. 3.1).

5. В заключении к диссертации описано, что было сделано в работе, но недостаточно полно отражены результаты самих исследований.

6. В тексте содержатся орфографические и смысловые ошибки.

**В отзыве официального оппонента Маклакова А.С.:**

1. В работе приведены временные диаграммы токов и напряжений электроприводов прокатных станов, при этом автором не указано с помощью каких аппаратных средств происходило осциллографирование процессов, происходящих в преобразователях частоты с активными выпрямителями при провалах напряжения.

2. Во второй главе работы трудно согласиться с доказательством о том, что

не существует возможности обеспечить бесперебойную работу преобразователей главных приводов прокатных станов при провалах напряжения во внешней питающей сети при использовании синусоидальной ШИМ, векторной ШИМ, ШИМ с удалением выделенных гармоник или ШИМ с фиксированными углами переключения для активных выпрямителей напряжения. Упомянуто, что к рассмотрению были приняты четыре основных вида ШИМ, но подробно не рассмотрена реализация того или иного метода ШИМ, в частности, нет информации о средней частоте переключений полупроводниковых модулей методов ШИМ, предмодуляционных составляющих синусоидальной ШИМ, таблиц последовательностей переключения векторной ШИМ, параметров и режимов работы системы управления активным выпрямителем и инвертором напряжением, параметров фазовой автоподстройки частоты и т.д. Необходимо больше данных о проведении экспериментов и данных для анализа причинно-следственных связей возникновения тех или иных электромагнитных процессов в рассматриваемых электрических цепях при различных возмущениях.

3. В объекте исследования и цели диссертации указываются преобразователи частоты с активными выпрямителями, однако проработка вопросов их математического моделирования отсутствует в работе.

4. В заключении работы сказано, что дана оценка возможности функционирования преобразователей частоты с активными выпрямителями и дуговой сталеплавильной печи в условиях сильной несимметрии и колебаний напряжения, вызванных работой дуговой печи, но при этом автор не предоставил какие-либо результаты динамических исследований работы активных выпрямителей и анализа спектров токов и напряжений.

5. Недостаточно подробно указано в чем конкретно заключается негативное влияние провалов напряжения на работу электроприводов прокатных станов.

6. Опечатки в диссертации.

**В ходе заседания диссертационного совета:**

1. В ходе доклада следовало бы делать четкую привязку к презентации.
2. Не совсем понятно, что подразумевается под выражением «качественные

зависимости между погодными условиями и частотой возникновения провалов напряжения», обозначенных в научной новизне.

3. Необходимо обозначить насколько актуальны предложенные научно-технические решения для других примеров компактных металлургических предприятий.

4. Результаты исследований, посвященных параллельной работе электро-технического и прокатного комплексов представлены слишком ограничено. Следовало бы представить больше информации, относящейся к данному научному направлению.

Соискатель Ивекеев В.С. ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы и привел собственную аргументацию:

В исследованиях посвященных статистическому анализу провалов напряжения учитывались только однофазные короткие замыкания, поскольку реальные осциллограммы напряжений в питающей сети, констатируют факт именно однофазных провалов. Остальные виды коротких замыканий рассматривались при исследовании реакции СТК на различные варианты аварийных режимов с помощью имитационного моделирования. Разработанная усовершенствованная система управления СТК обладает достаточным быстродействием и способствует восстановлению напряжения во внутривоздушной сети до момента срабатывания защиты и отключения электропривода. Также в ходе исследований различных провалов напряжения оценивалось остаточное напряжение на шинах прокатного комплекса. Было выяснено, что предельным провалом напряжения для системы ПЧ-АВ является провал глубиной 30 % по стороне 380 кВ. Данный провал напряжения существующим количеством реактивной мощности исследуемого СТК устранить полностью невозможно, но возможно снизить его до глубины неопасной для преобразователей частоты. Отдельные исследования, не входящие в задачи диссертации, показывают, что активные выпрямители способны функционировать при коммутациях со стороны фильтрокомпенсирующих цепей, при коммутациях со стороны печного трансформатора и способны работать при колебаниях напряжения в условиях работы дуговой сталеплавильной

печи. В работе рассматривалась реально существующая, классическая, система управления СТК 330 МВАр. Усовершенствованная система управления дополнена контуром регулирования напряжения, имеющем в своем составе ПИД-регуляторы и контуром диагностики провалов напряжения, производящим сравнение фактической величины питающего напряжения с заданным значением. Результатом работы блока диагностики является сигнал на активацию контура регулирования напряжения, где производится работа логики системы управления СТК, которая определяет какой из фаз ТРГ необходимо быть задействованной. При исследованиях трансформации провалов напряжения во внутриводскую сеть рассматривались различные варианты схем и групп соединения обмоток сетевого трансформатора. Достоверность полученных моделей оценена на основе распределения Стьюдента. Для каждого из исследуемых параметров определен доверительный интервал для математического ожидания. Результаты проверки показали, что расчетные значения, не выходят за границы указанных интервалов. Представленная в работе методика определения установленной мощности СТК позволяет рассчитать количество необходимой реактивной мощности для полной компенсации. Все параметры в полученном математическом выражении представлены в именованных единицах. Эффективность от предложенных мероприятий заключается в снижении количества внеплановых простоев, вызванных провалами напряжения и ценена с помощью моделирования. 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».

Диссертационный совет установил, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, полностью соответствующую критериям «Положения о присуждении ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 17 декабря 2021 г. диссертационный совет принял решение за

