

ОТЗЫВ

официального оппонента – доктора технических наук
Илюшина Павла Владимировича на диссертационную работу
Газизовой Ольги Викторовны на тему «**Повышение устойчивости
многомашинных электротехнических систем внутризаводского
электрообеспечения металлургического предприятия**», представленную на
соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности
2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

1. АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ

Важной тенденцией развития современной промышленной энергетики является применение распределенной генерации для снижения себестоимости выпускаемой продукции, в том числе за счет использования вторичных энергоресурсов предприятий полного технологического цикла, а также повышения надежности электрообеспечения ответственных электроприемников. Для этого широко применяются генерирующие установки с разными приводными двигателями. Однако, для питания тепловой и резкопеременной энергоемкой электрической нагрузки в разветвленной распределительной сети металлургического предприятия продолжают использоваться заводские теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) с паротурбинными установками, устойчивыми к аварийным возмущениям благодаря большой механической постоянной инерции. Развитие этих ТЭЦ происходит за счет увеличения количества и единичной мощности генераторов, а также применения блочных схем.

Данная тенденция приводит к существенному усложнению схем электрических соединений ТЭЦ, а также изменению нормальных и аварийных режимов. Ситуацию осложняет наличие ответственной тепловой нагрузки, специфичных энергоемких резкопеременных потребителей, а также разветвленной сети с многочисленными токоограничивающими реакторами, широко применяемыми на генераторном напряжении. Это способствует возникновению провалов напряжения различной глубины и длительности при аварийных возмущениях. Наличие генераторных распределительных устройств для питания близлежащих цехов и потребителей собственных нужд с одной стороны, повышает надежность электрообеспечения металлургического предприятия, с другой стороны, не исключает действия дифференциальной защиты шин, эквивалентного работе делительной автоматики, так как после ее срабатывания ТЭЦ с нагрузкой переходит в островной режим.

В перечисленных условиях требуется адаптация существующих принципов противоаварийного управления, применяющихся в энергосистемах, к условиям работы заводских электростанций (ЗЭС) с учетом многообразия

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова»	
за № _____	
Дата регистрации _____	18.03.2026
Фамилия регистратора _____	

возможных эксплуатационных режимов, небольшой мощности источников и специфичной энергоемкой электрической и тепловой нагрузки. Существующие принципы управления режимами, реализуемые системами автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) в основном ориентированы на синхронные генераторы крупных электростанций. Также требуется совершенствование принципов регулирования возбуждения, учитывающих малую мощность генераторов, наличие связи с энергосистемой большой мощности, в которой могут фиксироваться отклонения напряжения, приводящие к неблагоприятным условиям работы генерирующих установок, работающих с традиционными законами поддержания напряжения. Переход в островной режим вследствие действия дифференциальной защиты шин при наличии тепловой нагрузки, а также необходимость последующей групповой ресинхронизации требуют скоординированного действия АРВ, АРЧВ и регуляторов тепловой энергии. Аварийные ситуации могут осложняться наличием токоограничивающих реакторов и нескольких ступеней трансформации, затрудняющих полноценный обмен реактивной мощностью генераторов и нагрузки. Таким образом, выбранная соискателем тематика диссертационного исследования, связанная с совершенствованием принципов управления эксплуатационными режимами ЗЭС, является актуальной.

На основе анализа достижений российских и зарубежных ученых в области управления эксплуатационными режимами ЗЭС соискателем были выявлены основные проблемы, сформулирована цель и конкретные задачи, решаемые в рамках диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы Газизовой О.В. является разработка основополагающих научных положений и комплекса научно-обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение статической, динамической и результирующей устойчивости систем внутриводского электроснабжения металлургического предприятия в режимах совместной эксплуатации взаимосвязанных электротехнических систем распределенной генерации и электрической и тепловой нагрузки.

Объектом исследования являются многомашинные электротехнические системы внутриводского электроснабжения (ВЗЭС) металлургического предприятия, включающие источники распределенной генерации, выдающие электрическую и тепловую энергию и питающие энергоемкие цеха с шин генераторного распределительного устройства. Предметом исследования являются математические модели, алгоритм и методики расчета и анализа устойчивости установившихся и переходных режимов ЗЭС, а также принципы, способ и концепция управления эксплуатационными режимами системы ВЗЭС, содержащими источники распределенной генерации.

2. НАУЧНАЯ НОВИЗНА ПОЛОЖЕНИЙ, ВЫВОДОВ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Основной научный вклад соискателя заключается в совершенствовании подходов к совместному регулированию возбуждения и частоты вращения турбогенераторов промышленных ТЭЦ, разработке новых принципов и алгоритмов управления взаимосвязанными многомашиными электротехническими системами, направленными на повышение статической, динамической и результирующей устойчивости средствами управления ЗЭС.

Научная новизна диссертационной работы Газизовой О.В. заключается в следующем:

1. На основе анализа нормальных и аварийных режимов действующих ЗЭС (в том числе провалов напряжения и переходов в островной режим) выявлена взаимосвязь между развитием аварийных ситуаций и действием систем автоматического регулирования генераторов ЗЭС. Для повышения устойчивости ЗЭС разработаны новые принципы работы систем АРВ и АРЧВ.

2. Разработана усовершенствованная методика построения комплексных статических характеристик нагрузки металлургического предприятия, учитывающая параметры специфических электроприемников, генераторов ЗЭС и сети, критические значения напряжения, а также защиту минимального напряжения электродвигателей.

3. На основе метода последовательного эквивалентирования разработаны усовершенствованные методики расчета и анализа статической устойчивости островных установившихся режимов работы ЗЭС, учитывающие параметры сети, статические характеристики генераторов и промышленной нагрузки, а также блоки паровая турбина – синхронный генератор с тепловым графиком работы на постоянство давления в коллекторе. Установлены закономерности взаимного влияния параметров систем АРВ и АРЧВ на устойчивость генераторов, электрической и тепловой нагрузки.

4. Разработаны математические зависимости и методики для анализа динамической устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС при провалах напряжения со стороны энергосистемы, переходе в островной режим и последующей ресинхронизации.

5. Предложен способ индивидуального АРВ синхронных генераторов, повышающий статическую и динамическую устойчивость ЗЭС при параллельной работе с энергосистемой и в островном режиме за счет коррекции напряжения уставки регулятора напряжения в соответствии с параметрами режима энергосистемы и использования канала стабилизации по углу ротора.

6. Обоснованы и разработаны принципы группового управления системами АРВ синхронных генераторов ЗЭС с использованием каналов

стабилизации по углам роторов, повышающие устойчивость при переходе в островной режим и последующей групповой ресинхронизации.

7. Сформулирован принцип групповой ресинхронизации промышленной многомашинной ТЭЦ с энергосистемой на основе метода ведущего агрегата с учетом группового АРВ, особенностей ВЗЭС и режима работы генераторов.

8. На основе предложенной концепции единого управления электрическим и тепловым режимом для сохранения устойчивости ЗЭС при выходе на отдельную работу разработана методика выбора блоков паровая турбина – синхронный генератор, работающих в нормальном режиме на постоянство давления пара в паропроводе.

9. Апробированы разработанные технические решения, подтвердившие свою технико-экономическую эффективность за счет снижения ущерба от аварийных простоев и энергосбережения.

Личный вклад соискателя в полученные результаты состоит в постановке задач, разработке способов, принципов, методик и алгоритмов их решения, их теоретическом обосновании и проведении аналитических расчетов. Совместно с соавторами было выполнено имитационное моделирование, реализация разработанных способов и принципов на действующей ЗЭС, организована их опытная эксплуатация и сопровождение технических решений.

3. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ И РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Диссертационная работа Газизовой О.В. имеет явную практическую направленность, так как в ней достигнуты значимые результаты в области повышения запаса статической, динамической и результирующей устойчивости генераторов ЗЭС, как при параллельной работе с энергосистемой, так и в островном режиме, за счет внедрения разработанных технических решений:

1. Переданы для внедрения на Центральной электростанции ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ЦЭС ПАО «ММК») разработанные методики определения комплексных статических характеристик нагрузки и анализа статической устойчивости, алгоритм расчета островных установившихся режимов в программном комплексе «КАТРАН», способ индивидуального АРВ синхронных генераторов ЗЭС при параллельной и отдельной работе с энергосистемой, а также методика распределения электрической и тепловой нагрузки между блоками паровая турбина – синхронный генератор ЗЭС для сохранения устойчивости, учитывающая групповую ресинхронизацию и действие дифференциальной защиты шин.

2. Внедрение разработанных технических решений содействует повышению статической, динамической и результирующей устойчивости генераторов ЗЭС и нагрузки в нормальном и островном режимах.

3. Основные технические и экономические эффекты от внедрения разработок на ЗЭС ПАО «ММК» обусловлены: повышением статической устойчивости синхронных генераторов при параллельной работе с энергосистемой большой мощности за счет прогнозирования режимов с учетом использования разработанного способа регулирования возбуждения, учитывающего напряжение энергосистемы; повышением статической устойчивости синхронных генераторов при наличии блоков паровая турбина – синхронный генератор, работающих по тепловому графику за счет оптимального распределения тепловых нагрузок; повышением результирующей устойчивости ЗЭС при параллельной работе с энергосистемой большой мощности при провалах напряжения за счет разработанного способа индивидуального АРВ с учетом канала стабилизации по углу ротора; снижением ущерба от простоев оборудования цехов и недоотпуска электроэнергии по причине нарушения устойчивости синхронных генераторов ЗЭС в результате провалов напряжения в сети и переходе в островной режим.

4. Суммарный экономический эффект, полученный в результате внедрения разработанных технических решений в промышленную эксплуатацию на ЦЭС ПАО «ММК», составил более 10 млн. руб./год.

5. Разработанные технические решения, преимуществом которых является высокая эффективность при простоте реализации, могут внедряться на других ЗЭС, работающих по электрическому и тепловому графику.

Соискателем лично и в составе авторского коллектива разработаны способ и принципы индивидуального и группового АРВ, а также методика распределения функций блоков паровая турбина – синхронный генератор на поддержание давления с использованием результатов диссертационной работы, что подтверждено актом внедрения ПАО «ММК». Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе в курсах лекций, а также при выполнении выпускных квалификационных работ по программе бакалавриата и магистратуры в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

4. ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ НАУЧНЫХ ВЫВОДОВ, ПОЛОЖЕНИЙ И РЕКОМЕНДАЦИЙ

Достоверность полученных Газизовой О.В. научных результатов подтверждается корректным использованием методов теории статической и результирующей устойчивости, теории автоматического управления и методов математического моделирования. Используемые в главах 2 и 4 математические модели генераторов, нагрузки и элементов электрической сети широко используются в электроэнергетике, а полученные с их использованием

результаты подтверждаются практикой их применения. Для математических моделей в главе 4 соискателем выполнено сравнение с реальными данными аварийной ситуации и четко определена область их эффективного применения. В главах 3 и 6 адекватность моделей подтверждена использованием реальных характеристик оборудования, адекватностью расчетных и экспериментальных данных, результатами вычислительных экспериментов, переданных к внедрению на ЗЭС ЦЭС ПАО «ММК». В диссертационной работе имеется значительное число ссылок на источники исходных данных и результаты исследований других авторов в данной научной области.

Положения научной новизны, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, выводы по главам и в заключении, представленные в диссертационной работе, являются в целом обоснованными, логически вытекают из основного текста и отражают выявленные в результате аналитических расчетов и практических исследований закономерности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ О СООТВЕТСТВИИ ДИССЕРТАЦИИ УСТАНОВЛЕННЫМ КРИТЕРИЯМ

Диссертационная работа Газизовой О.В. отвечает критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (ред. от 16.10.2024).

Указанная цель работы – разработка основополагающих научных положений и комплекса научно-обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение статической, динамической и результирующей устойчивости систем внутривзаводского электроснабжения металлургического предприятия в режимах совместной эксплуатации взаимосвязанных электротехнических систем распределенной генерации и электрической и тепловой нагрузки – достигнута в рамках диссертационной работы. Соискателем разработаны новые принципы и алгоритмы управления взаимосвязанными многомашинными электротехническими системами, направленные на обеспечение статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС. В целом диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения в области противоаварийного управления режимами ЗЭС, направленные на повышение надежности и эффективности работ систем ВЗЭС с собственной генерацией за счет повышения устойчивости генераторов и нагрузки, а их внедрение вносит значительный вклад в развитие электроэнергетики страны, что подтверждается опытом внедрения указанных устройств (п. 9).

Диссертационная работа написана соискателем самостоятельно. Внутреннее единство текста обеспечено единым информационным подходом и применением пространственно-временной обработки измерений. Диссертация содержит новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, что свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Разработанные технические решения аргументированы и сопоставлены с результатами аналитических расчетов и экспериментальных исследований, а также результатами исследований других авторов. В диссертации приводятся рекомендации по использованию полученных научных результатов, а для Глав 3 и 6 представлены примеры их применения в реальных устройствах с приложением соответствующих актов внедрения (п. 10).

По теме диссертационной работы Газизовой О.В. опубликовано более ста научных работ, 64 из которых включены в автореферат, в том числе 35 статей в изданиях из перечня российских рецензируемых научных журналов ВАК РФ по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, 17 статей в научных изданиях, индексируемых наукометрическими базами Scopus, а также четыре монографии. Получены 3 патента Российской Федерации на изобретения и официально зарегистрировано 5 программ для ЭВМ. За период 2002-2025 гг. соискателем сделано более 37 докладов на международных и всероссийских научно-технических и научно-практических конференциях. Содержание докладов и публикаций соответствуют теме диссертационной работы, представляя ее основные научные результаты (п.п. 11-13).

В диссертационной работе Газизовой О.В. сделаны необходимые ссылки на авторов идей и результатов, использованных в работе, а список литературы содержит 364 источника (п. 14).

Тема и содержание диссертационной работы Газизовой О.В. соответствуют паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы по следующим пунктам:

– п. 1 – «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»;

– п. 2 – «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»;

– п. 3 – «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления»;

– п. 4 – «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов».

6. АНАЛИЗ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Газизовой О.В. состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, включающего 364 наименования, а также семи приложений. Объем основного текста диссертационной работы составляет 347 страниц при ее общем объеме 425 страниц.

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность темы и указана степень ее разработанности, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, представлены теоретическая и практическая ценность результатов работы, сформулированы выносимые на защиту положения, приведены результаты апробации работы и представлена структура диссертационной работы.

В первой главе **«Способы управления эксплуатационными режимами промышленных электростанций»** сформулированы основные проблемы в противоаварийном управлении режимами ЗЭС. Для этого выполнен обзор способов управления источниками распределенной генерации в составе систем ВЗЭС и рассмотрены особенности их работы. Выполнен анализ устойчивости генераторов при авариях на ЗЭС ПАО «ММК» с 2003 по 2022 гг., позволивший выявить причины возникновения аварийных ситуаций, а также существующие проблемы при управлении нормальными и аварийными режимами. Приведены результаты аналитического обзора известных принципов индивидуального и группового регулирования возбуждения с использованием каналов стабилизации, а также особенности работы АРЧВ на генераторах ЗЭС, который показал необходимость адаптации существующих систем АРВ и АРЧВ к условиям работы ВЗЭС. Приведены особенности работы делительной автоматики ЗЭС. Дана характеристика разработанного способа анализа статической и динамической устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС, позволяющего более полно выполнить адаптацию существующих принципов управления ЗЭС к условиям металлургического предприятия полного цикла.

Вторая глава **«Анализ статической устойчивости генераторов ЗЭС и ее нагрузки при параллельной и раздельной работе с энергосистемой»** посвящена разработке алгоритмов и методик расчета установившихся режимов ЗЭС и анализа статической устойчивости генераторов и нагрузки при параллельной работе с энергосистемой и в островном режиме. С учетом состава электроприемников металлургического предприятия полного цикла

разработаны методики расчета статических характеристик индивидуальных электроприемников и комплексной нагрузки. Для расчетов установившихся режимов и анализа статической устойчивости разработаны математические модели ЗЭС. На основе метода последовательного эквивалентирования разработаны методики расчета установившихся режимов параллельной и раздельной работы ЗЭС с энергосистемой, учитывающие статические характеристики генераторов и нагрузки, а также выполнена оценка режимов работы паротурбинных установок, поддерживающих давление пара в общем коллекторе. На основе метода последовательного утяжеления разработаны методики анализа статической устойчивости генераторов в нормальном и островном режимах ЗЭС. Разработана методика анализа статической устойчивости синхронных и асинхронных двигателей в сетях ВЗЭС.

Третья глава **«Анализ статической устойчивости заводской электростанции и ее элементов в нормальных и аварийных режимах»** посвящена применению разработанных методик и алгоритмов в задачах анализа параметров установившихся режимов и статической устойчивости действующей ЗЭС. Приведена характеристика объекта исследования, включающая характеристику первичных соединений ЗЭС, генераторов, их систем АРВ и АРЧВ, а также тепловой и электрической нагрузки. В соответствии с ранее определенным составом потребителей определена доля каждого вида электроприемников в цеховых нагрузках, выполнен расчет регулирующего индивидуальных потребителей и комплексных нагрузок с учетом ЗЭС. В рамках исследования статической устойчивости генераторов ЗЭС определены коэффициенты запаса при фактической загрузке оборудования. Исследовано влияние напряжения энергосистемы, закона АРВ и коэффициентов трансформации трансформаторов связи на запас статической устойчивости. На примере одного из генераторов скорректирована диаграмма мощностей с учетом отклонения напряжения на связи с энергосистемой и минимального коэффициента запаса устойчивости. Исследована статическая устойчивость синхронных генераторов в островном режиме и основные факторы, влияющие на ее запас, в том числе регулирующий эффект нагрузки, настройки АРВ и АРЧВ, а также точка подключения нагрузки при электрической удаленности генераторов друг от друга. Выполнен анализ статической устойчивости двигателей переменного тока на примере собственных нужд ЗЭС и сформулированы рекомендации по ее сохранению.

В четвертой главе **«Результирующая устойчивость заводских генераторов при совместной работе с энергосистемой и выходе в островной режим»** представлены разработанные математические модели генераторов и двигательной нагрузки переменного тока для расчета электромеханических

переходных процессов ЗЭС. Показано, что для корректного исследования переходных процессов при провалах напряжения и совместной работе ЗЭС с энергосистемой, а также перехода в островной режим с целью анализа эффективности АРВ и АРЧВ необходимо использовать точные математические модели генераторов и двигателей с использованием метода Рунге-Кутты, реализованных в среде MATLAB. Для исследования переходных процессов в многомашинных системах приведены принципы эквивалентирования генераторов и двигателей, адаптированные к условиям ВЗЭС. Для учета взаимного влияния машин в многомашинной электротехнической системе, к которой может быть отнесена ЗЭС с двигателями, получающими питание с шин генераторного напряжения, использованы упрощенные математические модели в сочетании с методом численного интегрирования, реализованные в программном комплексе «КАТРАН». Для оценки возможности применения статических характеристик комплексной нагрузки при расчете переходных процессов в островном режиме проведен вычислительный эксперимент, который при провале напряжения до 10 % дал положительный результат.

Пятая глава **«Разработка законов индивидуального и группового регулирования генераторов заводских электростанций в различных режимах работы»** посвящена адаптации законов АРВ и АРЧВ к условиям работы систем ВЗЭС. На основе существующих принципов индивидуальных АРВ генераторов ЗЭС, а также совокупности ограничений и факторов, влияющих на статическую устойчивость, разработан метод индивидуального АРВ, который можно использовать при параллельной работе ЗЭС с энергосистемой и в островном режиме. С учетом анализа аварийных ситуаций и применяемых каналов стабилизации на генераторах ЗЭС с целью повышения динамической устойчивости сформулирован принцип действия канала стабилизации по углу ротора генератора, учитывающийся при реализации разработанного способа регулирования возбуждения. Разработан принцип группового АРВ генераторов ЗЭС при параллельной работе с энергосистемой, позволяющий повысить статическую устойчивость ЗЭС. Сформулирован принцип работы группового АРВ в островном режиме, позволяющий упростить условия групповой ресинхронизации ЗЭС с энергосистемой, в том числе обеспечить необходимый уровень напряжения на связи. Разработана методика распределения тепловых нагрузок между блоками турбина-генератор с учетом выхода на раздельную работу и необходимости поддержания давления в общем паровом коллекторе. Сформулирован принцип групповой ресинхронизации генераторов ЗЭС с учетом тепловых нагрузок и выбора ведущего агрегата.

В шестой главе **«Анализ динамической и результирующей устойчивости синхронных генераторов и нагрузки при выходе на**

раздельную работу с последующей ресинхронизации с учетом разработанных законов регулирования» на имитационных моделях исследованы электромеханические переходные процессы, сопровождающие провалы напряжения со стороны энергосистемы и переход в островной режим с учетом разработанных способов, принципов и методик управления режимами генераторов ЗЭС. Разработана имитационная модель исследуемой ЗЭС и смоделирована реальная аварийная ситуация, сопровождающаяся ее переходом в островной режим в результате действия дифференциальной защиты шин. Результаты вычислительных экспериментов в среде MATLAB и программном комплексе «КАТРАН» показали значения, отличающиеся менее чем на 10 %. Предложена модель действующей ЗЭС, приведенная с помощью разработанных принципов эквивалентирования к пятимашинной схеме. Исследована эффективность разработанных способов и принципов индивидуального и группового АРВ при провалах напряжения, переходе в островной режим и ресинхронизации с энергосистемой. Проведен вычислительный эксперимент с помощью программного комплекса «КАТРАН» по анализу эффективности разработанной методики распределения функций поддержания давления турбинами в общем паровом коллекторе, давший положительный результат. Проанализирована работа делительной автоматики в рассматриваемом узле. Осуществлена реализация разработанных принципов АРВ на действующей ЗЭС и разработаны мероприятия по обеспечению устойчивости при параллельной работе с энергосистемой с учетом экономических показателей. Определен экономический эффект от внедрения разработанных мероприятий при параллельной работе ЗЭС с энергосистемой и переходе в островной режим.

В **заключении** представлены обобщающие выводы по диссертационной работе, где отмечено, что на основе результатов анализа устойчивости в нормальных и аварийных режимах, а также выполненных теоретических исследований, развита теория взаимосвязанных электротехнических систем с синхронными генераторами ЗЭС, электрической и тепловой нагрузкой. Разработаны требования к системам АРВ и АРЧВ, обеспечивающие необходимый запас статической и динамической устойчивости в нормальных режимах, а также переходе в островной режим. Разработанные способ, принципы, методики и алгоритмы внедрены в промышленную эксплуатацию ЦЭС ПАО «ММК». Суммарный экономический эффект составляет более 10 млн. руб./год, что связано со снижением мощности потребителей собственных нужд и потерь электроэнергии в распределительной сети ЦЭС ПАО «ММК», а также уменьшением времени простоев генераторов и цехов. Разработанные технические решения рекомендуются для расширенного промышленного внедрения на ЗЭС с электрической и тепловой нагрузкой.

7. ВОПРОСЫ И ЗАМЕЧАНИЯ ПО СОДЕРЖАНИЮ ДИССЕРТАЦИИ

При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации Газизовой О.В. возникли следующие вопросы и замечания:

1. В Главе 1 (стр. 69) вывод 3, в котором отмечается, что «известные законы индивидуального АРВ синхронных генераторов прежде всего ориентированы для применения на крупных ГРЭС...» некорректен. Известные законы и алгоритмы регулирования широко применяются в АРВ синхронных генераторов на подавляющем большинстве традиционных электростанций, включая другие виды тепловых, а также атомных и гидроэлектростанциях.

2. В Главе 2 отмечается, что паротурбинные установки, работающие по тепловому графику, имеют существенные ограничения в отношении регулирования режимов их работы. При этом в диссертационной работе не рассмотрена возможность применения для расширения области допустимых режимов электрических и паровых аккумуляторов (паронакопителей), положительный международный опыт применения которых имеется.

3. В Главе 2 (стр. 90) упоминается о возможности использования закона регулирования возбуждения синхронных двигателей на постоянство тока возбуждения, однако неясно, почему в блок-схеме на рис. 2.2 «Построение статической характеристики синхронного двигателя» данный закон и его математическое описание отсутствуют.

4. В Главе 2 (стр. 113) на рис. 2.9 «Алгоритм анализа статической устойчивости в режиме раздельной работы с энергосистемой» приводятся значения коэффициентов запаса статической (апериодической) устойчивости по активной мощности 8 %, а по напряжению 10 %. Однако в действительности их снижение ниже указанных величин не приводит к нарушению статической устойчивости. С другой стороны, приведенные значения коэффициентов запаса разрабатывались для электроэнергетических систем, а не для систем ВЗЭС, работающих в островном режиме. Для систем ВЗЭС с ЗЭС при функционировании в островном режиме требуется обоснование применения таких же значений коэффициентов запаса или выбор новых значений, адаптированных к системам ВЗЭС.

5. В Главе 3 (стр. 133) на рис. 3.7 «Возможные точки выхода ЦЭС и ПВЭС-2 в островной режим» показаны только три рассматриваемые точки перехода в островной режим и только при действии дифференциальной защиты шин. Однако выделение в островной режим может быть никак не связано с действием дифференциальной защиты шин, а, например, с отключением в ремонтной схеме внешнего электроснабжения нескольких воздушных линий электропередачи, идущих в одном коридоре. Неясно, почему другие возможности выделения в островной режим соискателем не

были рассмотрены при проведении расчетов.

6. В Главе 3 (стр. 172) на рис. 3.34 приведена зависимость коэффициента запаса от загрузки асинхронного двигателя. Однако данные характеристики различны для разных конструкций асинхронных двигателей, их мощностей, а также заводов-изготовителей, что не указано в тексте. Кроме того, из табл. 3.22 и 3.23 неясно, почему в расчетах рассматриваются режимы функционирования асинхронных и синхронных двигателей в режиме существенной недогрузки (0,23 и 0,3) или в режиме перегрузки (1,07). Это связано с неправильным выбором мощности приводных двигателей или какими-то другими причинами?

7. В Главе 4 (стр. 177) отмечается необходимость индивидуального учета при моделировании коэффициентов загрузки двигателей. Однако, в этом случае для моделирования электрических режимов на крупном металлургическом предприятии потребует выполнить тысячи и даже десятки тысяч расчетов, что неоправданно из-за высоких трудозатрат. Это обусловлено тем, что коэффициенты загрузки двигателей могут существенно различаться в течение суток, а также на отдельных этапах технологических процессов. Опыт показывает, что расчеты следует выполнять для одного-двух характерных значений коэффициентов загрузки, имеющие наибольшую вероятность.

8. В Главе 4 (стр. 202), что соискателем «предложена совокупность критериев, при соблюдении которых можно сделать вывод о возможности эквивалентирования группы электродвигателей», однако наличие у конкретного двигателя собственной защиты минимального напряжения или его подключение к выходным цепям секционной защиты минимального напряжения, никак не влияет на возможность его эквивалентирования. Временные уставки защиты минимального напряжения, имеющей несколько ступеней, влияют только на состав включенных двигателей в рассматриваемом режиме в конкретный момент времени.

9. В Главе 4 (стр. 203, 204) на рис. 4.5 и 4.6. имеются блоки «Распределение двигателей по коэффициенту загрузки с шагом 0,3» для асинхронных и синхронных двигателе, однако в тексте не обоснован выбор шага по коэффициенту загрузки. Неясно, на основании результатов каких расчетов или натурных экспериментов была принята указанная величина шага и чем она обоснована. При этом далее отмечается, что коэффициент загрузки асинхронных двигателей в основном составляет 0,4-0,8, что практически укладывается в один шаг, без необходимости анализа следующих шагов.

10. В Главе 4 (стр. 205) отмечается, что в «островном режиме в качестве критической величины напряжения можно считать 85 % от номинального, так как при этом напряжении обрабатывают форсировки и если конфигурация не поменяется, то при их отпадании будет наблюдаться нарушение статической

устойчивости». Однако, существуют известные способы определения величины критического напряжения в узлах нагрузки и только на основании них следует принимать величину критического напряжения. Следует отметить, что в узлах промышленной нагрузки величина критического напряжения может быть и меньше и больше указанной величины, следовательно она должна быть обоснованной, а не просто принятой.

11. В Глава 5 (стр. 254) при рассмотрении вопроса ресинхронизации ЗЭС с энергосистемой отмечается «для этого необходимо выбрать синхронный генератор или группу генераторов, которые позволят повысить или понизить уровень частоты в энергосистеме до необходимого». Однако мощность ЗЭС практически всегда такова, что оказать существенное на изменение частоты в энергосистеме они не в состоянии. В рассматриваемом случае роль «ведущего генератора» будет играть энергосистема, а задача реализации управления генераторами ЗЭС заключается только в обеспечении выполнения условий для точной синхронизации ЗЭС с энергосистемой.

12. В Главе 6 рассматривается вопрос обеспечения устойчивости генераторов ЗЭС, в том числе за счет применения каналов стабилизации АРВ. Использование системных стабилизаторов в устройствах АРВ генераторов в большинстве режимов полезно. Однако, при существенном ослаблении связи с энергосистемой, как показано на рис. 6.3 (в работе остается одна линия электропередачи), связь с энергосистемой становится слабой и использование системного стабилизатора может привести, как показывает опыт выполнения расчетов, к возникновению незатухающего автоколебательного процесса. В таких режимах оправдана блокировка системного стабилизатора.

Приведенные замечания и вопросы не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, поскольку не влияют на основные положения, выводы, научные и практические результаты.

8. ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа Газизовой О.В. является самостоятельной и законченной научно-квалификационной работой. Она обладает признаками актуальности, научной новизны, имеет широкое применение и перспективы дальнейшего внедрения результатов, что расширяет возможности действующих и вновь вводимых в эксплуатацию ЗЭС, а также обеспечивает повышение экономической эффективности за счет энерго- и ресурсосбережения. В работе изложены новые научно обоснованные технические решения в области управления режимами ЗЭС, направленные на повышение устойчивости и надежности электроснабжения промышленных потребителей.

Результаты диссертационного исследования основаны на глубоком анализе задач, стоящих перед электротехническим комплексом ВЗЭС с собственной генерацией, и режимов его работы. Соискателем разработаны принципы и методики, направленные на совершенствование систем управления эксплуатационными режимами ЗЭС. Перечень решенных в диссертации задач позволяет сделать вывод о ее соответствии паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Содержание диссертационной работы соответствует поставленным задачам, изложение материала последовательное, выводы обоснованные, достоверность результатов подтверждена результатами моделирования, соотнесенным с реальными данными на объекте исследования. Текст диссертации изложен доступным техническим языком с использованием современной научной терминологии. Иллюстративный материал подробно и с достаточной для понимания точностью отражает результаты аналитических расчетов и имитационного моделирования. Сделанные в диссертационной работе выводы и рекомендации в целом аргументированы.

Автореферат диссертационной работы Газизовой О.В. соответствует тексту диссертации по основным квалификационным признакам: цель, задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов.

Основные научные и практические результаты диссертационного исследования Газизовой О.В. в полной мере отражены в печатных научных работах и прошли обсуждение на ведущих всероссийских и зарубежных научно-технических и научно-практических конференциях. Количество публикаций в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК Минобрнауки России по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы составляет 35 статей, а в изданиях, индексируемых наукометрической базой Scopus – 17. Получены 3 патента Российской Федерации на изобретения, а также зарегистрированы 5 программ для ЭВМ.

В целом, диссертационная работа Газизовой О.В. на тему «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутриводского электроснабжения металлургического предприятия», посвященная разработке новых принципов и методик противоаварийного управления режимами заводских электростанций сложной конфигурации с тепловой и электрической нагрузкой, что имеет важное значение для развития электроэнергетики страны. По своему теоретическому уровню и практическому значению она соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а именно критериям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного

Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 16.10.2024), а ее автор Газизова Ольга Викторовна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ОППОНЕНТ,
доктор технических наук, главный научный сотрудник,
руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем
и распределенной энергетики ИНЭИ РАН

Павел Владимирович Илюшин

05 марта 2026 г.

Тел. (моб): +7 (915) 092-98-33

E-mail: ilyushin.pv@mail.ru



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт энергетических исследований Российской академии наук» (ИНЭИ РАН)

Адрес: 117186, Россия, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31, корп. 2.

Телефоны: +7 (499) 127-46-64, +7 (499) 123-98-78.

E-mail: info@eriras.ru, Web-сайт: <https://www.eriras.ru/>