

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,  
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 ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 16.04.2026 № 1

О присуждении Газизовой Ольге Викторовне, гражданке Российской Федерации, учёной степени доктора технических наук.

Диссертация «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутривзаводского электроснабжения металлургического предприятия» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 29 декабря 2025 г. (протокол № 20) диссертационным советом 24.2.324.05, 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 № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Газизова Ольга Викторовна, 25.07.1980 года рождения. Диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук «Управление режимами промышленных электростанций при выходе на отдельную работу» защитила в 2007 г. в диссертационном совете, созданном на базе ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Диссертационная работа подготовлена в рамках докторантуры в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» в период 2021 по 2024 г.

Работает в должности доцента ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования РФ.

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

Научный консультант – доктор технических наук, профессор Корнилов Геннадий Петрович, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», кафедра электроснабжения промышленных предприятий, профессор.

Официальные оппоненты:

1. Илюшин Павел Владимирович, доктор технических наук, ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», Центр интеллектуальных электроэнергетических систем и распределённой энергетики, руководитель;

2. Куликов Александр Леонидович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», кафедра «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», профессор;

3. Паздерин Андрей Владимирович, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Автоматизированные электрические системы», заведующий кафедрой.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва), в своём положительном отзыве, подписанном Михеевым Дмитрием Владимировичем, канд. техн. наук, доцентом, кафедра Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий, заведующим кафедрой, указала, что диссертация Газизовой Ольги Викторовны «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутризаводского электроснабжения металлургического предприятия» является законченной научно-квалификационной работой, обладающей признаками актуальности, новизны и практической значимости. В ней сформулирована новая концепция, разработаны теоретические положения и научно-технические ре-

шения в области управления и планирования эксплуатационных режимов систем внутриводского электроснабжения металлургических предприятий с собственными электростанциями, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, а их внедрение вносит значительный вклад в развитие экономики Российской Федерации. Диссертационная работа полностью отвечает требованиям п.п. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, Газизова Ольга Викторовна, заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью, большим количеством публикаций в рецензируемых научных изданиях, выполненных и внедрённых научных исследований в области моделирования, анализа устойчивости и управления нормальными и аварийными режимами работы источников распределенной генерации и нагрузки.

Д-р техн. наук П.В. Илюшин – признанный специалист в области распределенных источников энергии и особенностей их функционирования в составе распределительных сетей и сетей внутреннего электроснабжения промышленных предприятий. Является действительным членом Академии электротехнических наук Российской Федерации, имеет почетное звание АЭН РФ «доктор электротехники», награжден почётной грамотой и благодарностью Минэнерго России, почетным званием «Заслуженный работник распределительно-сетевых комплексов».

Профессор, д-р техн. наук А.Л. Куликов – один из ведущих ученых РФ в области электроэнергетики. Внес вклад в разработку и внедрение новых алгоритмов цифровой релейной защиты электроэнергетических систем. Лауреат премии Правительства Российской Федерации 2020 г. за разработку и внедрение инновационных технологий и оборудования для управления и повышения надёжности цифровых электрических сетей. Является действительным членом Академии электротехнических наук Российской Федерации и академиком Международной Академии наук прикладной радиоэлектроники. Имеет почетное

звание «Заслуженный изобретатель Российской Федерации».

Профессор, д-р техн. наук А.В. Паздерин – один из ведущих специалистов страны в области моделирования режимов распределения потоков электроэнергии и устойчивости электроэнергетических систем, цифрового моделирования режимов работы интеллектуальных электрических систем. Являлся руководителем по 13 кандидатским диссертациям и консультантом по одной докторской работе. Награжден почетной грамотой Министерства науки и образования РФ, Почетной грамотой Министерства энергетики и жилищно-коммунального хозяйства Свердловской области. Удостоен звания «Заслуженный работник РАО Единая Энергетическая Система России» и почетной медали имени профессора Д.А. Арзамасцева.

Соискатель имеет более 100 опубликованных работ, из них 64 по теме диссертации, в том числе 35 публикаций в журналах, относящихся к категориям К1, К2 из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 17 публикаций, входящих в систему цитирования Scopus, по теме диссертации изданы 4 монографии, получены 3 патента РФ на изобретения и официально зарегистрированы 5 программ для ЭВМ. Общий объем публикаций по теме диссертации составляет 51,5 печатных листа. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя в опубликованных работах заключается в формулировании общих требований к системам автоматического регулирования возбуждения (АРВ) генераторов в нормальном и аварийном режимах и концепции взаимосвязанного распределения тепловых и электрических нагрузок для сохранения устойчивости при выходе заводских электростанций (ЗЭС) в островной режим, а также в разработке: алгоритмов расчета статических характеристик потребителей металлургического предприятия полного технологического цикла; усовершенствованной методики построения комплексных статических характеристик нагрузки металлургического предприятия; алгоритма расчета островных установившихся режимов работы ЗЭС; методики анализа статической устойчивости генераторов в нормальных и островных режимах работы ЗЭС; способа индивидуального АРВ генераторов ЗЭС; принципа группо-

вого АРВ синхронных генераторов ЗЭС; принципа групповой ресинхронизации промышленной многомашинной тепловой электростанции с энергосистемой; методики выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих в режиме на постоянство давления в паропроводе.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1) Газизова, О.В. Особенности применения метода последовательного утяжеления при анализе статической устойчивости источников распределенной генерации / О. В. Газизова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2021. – Т. 21, № 3. – С. 31-40.

2) Газизова, О.В. Влияние режимов работы заводских ТЭЦ на статическую устойчивость турбогенераторов при отделении от энергосистемы / О.В. Газизова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 3. – С. 35-44.

3) Газизова, О.В. Групповое регулирование систем возбуждения заводских синхронных генераторов при выходе на отдельную работу с энергосистемой с целью повышения устойчивости / О. В. Газизова // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 1. – С. 82-89.

4) Корнилов, Г.П. Исследование системы регулирования возбуждения синхронных генераторов заводских электростанций / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, А.П. Соколов, А.Э. Морщакин // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 72-79.

5) Корнилов, Г.П. Повышение устойчивости генераторов заводских электростанций за счет использования каналов стабилизации / Г.П. Корнилов, О.В. Газизова, Б.М. Логинов, Р.Р. Храмшин, А.А. Бочкарев, Д.А. Дьяков // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2025. – Т. 68, № 2. – С. 66-75.

На диссертацию и автореферат поступило 11 отзывов, все положительные:

**1. Отзыв ПАО «Россети Урал» филиал «Челябэнерго», производственное отделение «Магнитогорские электрические сети», г. Магнитогорск** (гл. инж. В.С. Синтюшкин, гл. спец., к.т.н. А.С. Денисевич): 1) Изменяются ли требования к пропускной способности электрических сетей, осуществляющих выдачу мощности местной заводской электростанции, и к их режимным параметрам при реализации предлагаемого принципа групповой ресинхронизации.

2) Отсутствуют рекомендации диспетчерскому персоналу электрических станций и сетей при выходе на отдельную работу в условиях функционирования разработанных автором алгоритмов индивидуального и группового АРВ и принципа групповой ресинхронизации. 3) Насколько точный баланс по активной и реактивной мощности при отделении электростанции с частью нагрузки должен соблюдаться с учётом полученных автором результатов?

**2. Отзыв ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров** (д.т.н., проф. В.В. Черепанов): 1) В автореферате не представлены графики тепловой нагрузки рассматриваемой теплоэлектростанции в течение года, поэтому не вполне понятно, какие из годовых нагрузок были приняты в работе. 2) Был ли проанализирован характер изменения электрических нагрузок в течение характерных суток, месяцев? 3) Как влияет наличие многочисленных линейных и секционных реакторов на генераторном напряжении на устойчивость заводской электростанции в различных эксплуатационных режимах работы? 4) В автореферате не указаны типы систем возбуждения, которые используются на электростанции, и их учет при расчете параметров режима.

**3. Отзыв ФГБОУ ВО «Амурский государственный университет», г. Благовещенск** (д.т.н., проф. Н.В. Савина): 1) Как влияет учет отклонения уровня напряжения в допустимых пределах со стороны питающей энергосистемы на диаграммы мощности (рис. 13, 14) и почему его предлагается учесть? 2) Как учитывается действие автоматического регулирования возбуждения в разработанных методиках анализа статической устойчивости генераторов при параллельной и отдельной работе с энергосистемой? 3) Был ли проведен анализ балансов мощностей источников питания и нагрузки при выходе на отдельную работу ЗЭС в случае действия дифференциальной защиты шин 110 кВ, 10 кВ, 3 кВ? 4) Из рис. 31, 32 не понятно, почему при повышении тепловой нагрузки коэффициент запаса у турбины с конденсационным режимом преимущественно повышается, а у турбины с тепловым режимом – падает?

**4. Отзыв ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень** (д.т.н., проф. Р.Н. Хамитов, к.т.н., доц. Г.А. Хмара): 1) Требуются ли изменения в реализации релейной защиты подстанций на объектах заводской

генерации при внедрении результатов диссертационной работы? 2) Насколько применимы разработанные рекомендации для внедрения на небольшие производственные площадки, получающие питание, в основном, от собственных генерирующих мощностей? 3) Как на статическую и динамическую устойчивость генераторов влияет наличие в сети устройств компенсации реактивной мощности в виде статических батарей синхронных компенсаторов и/или синхронных компенсаторов? 4) На рис. 12 показано влияние регулятора переключения без возбуждения на устойчивость при различных напряжениях со стороны энергосистемы. Целесообразно ли использовать данные системы регулирования для повышения статической устойчивости на постоянной основе?

**5. Отзыв ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань** (д.т.н., проф. Е.И. Грачева): 1) Почему была исследована только апериодическая статическая устойчивость генераторов? 2) На рис. 12 показано влияние законов регулирования возбуждения на устойчивость генератора, но в работе не отражено их влияние на устойчивость синхронных двигателей. 3) Является ли исследуемый узел избыточным или дефицитным по активной и реактивной мощности при полном составе генерирующего оборудования? 4) Почему выбран именно канал стабилизации по углу ротора генератора?

**6. Отзыв ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск** (гл. инж., к.т.н. И.Ю. Андрюшин: 1) Какой состав делительной автоматики в рассматриваемом узле (гл.1 стр.12) на данный момент реализован? 2) На стр. 13 при описании возможностей регулирования напряжения в условиях заводской электростанции не отмечены возможности использования устройств регулирования под нагрузкой и переключения без возбуждения с целью поддержания уровня напряжения. 3) Как влияет состав генерирующего оборудования заводской электростанции, наличие отопительного сезона и длительность короткого замыкания на шинах связи с энергосистемой на сохранение устойчивости при выходе в островной режим?

**7. Отзыв АО «МАГНИТОГОРСКИЙ ГИПРОМЕЗ», г. Магнитогорск** (нач. электротехнического отд. Ю.Г. Аникин, зав. группой, к.т.н. М.Ю. Афа-

насьев): 1) В автореферате (стр. 15) отмечается: «Мощности источников возрастают, и их переводят на работу с шин генераторного распределительного устройства в блоки генератор-трансформатор». Как данная тенденция влияет на устойчивость электростанции при выходе в островной режим? 2) В автореферате (стр. 17) приведено, что для «анализа установившихся режимов работы ЗЭС разработаны математические модели генераторов. При параллельной работе они задаются неизменными значениями активных и реактивных мощностей». Требуется обосновать подобный подход для расчета режимов в условиях внутривозовского электроснабжения. 3) Как возможность островного режима в результате действия делительной автоматики должна быть учтена на этапе проектирования заводских электростанций, и какую из представленных в автореферате программ для ЭВМ для этих целей целесообразно использовать?

**8. Отзыв ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», г. Челябинск** (д.т.н., доц. А.Н. Горожанкин): 1) В тексте автореферата используются следующие термины: «раздельная работа», «островной режим», «автономная работа». Есть ли существенные различия в данной терминологии? 2) Учитывались возможные резонансные явления в исследуемых системах электроснабжения и почему? 3) Как на устойчивость систем электроснабжения влияет наличие низковольтных генерирующих мощностей при их существенной совокупной мощности? 4) Рассматривались ли возможности изменения конструкции турбогенераторов для систем внутривозовского электроснабжения, направленные на повышение их динамической устойчивости?

**9. Отзыв ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел** (к.т.н., доц., доктор электротехники Т.Г. Королева, к.т.н., доц. В.А. Чернышов): 1) В работе наряду с классическими понятиями статической и динамической устойчивости активно используется термин «результатирующая устойчивость». Поскольку в современных нормативных документах используется термин «статическая / переходная устойчивость», было бы полезно уточнить авторское определение и содержание термина «результатирующая устойчивость». 2) Разработанные методики и концепция глубоко проработаны для ЗЭС с паротурбинными установками и поперечными связями по

теплу. Дискуссионным остаётся вопрос об адаптации этих принципов к гибридным системам, включающим значительную долю малоинерционных источников (ГПЭС, ГТЭС), интеграция которых является общей тенденцией. 3) Предложенный принцип группового регулирования, основанный на выравнивании углов роторов, является научно перспективным. Однако его техническая реализация предъявляет высокие требования к точности, синхронизации и отказоустойчивости каналов измерения фазовых величин в реальном времени в условиях промышленных помех. Какова критичность этих факторов?

**10. Отзыв ООО «РТСофт – Смарт Грид», г. Москва** (нач. отдела управления, к.т.н. Ф.С. Непша): 1) Не приведена оценка вычислительной сложности разработанных алгоритмов. 2) Не сформулированы требования к вычислительным ресурсам для использования разработанного программного обеспечения. 3) Может ли разработанное ПО использоваться для управления в реальном ритме времени или только в режиме советчика диспетчера?

**11. ГБОУ ВО «Нижегородский государственный инженерно-экономический университет», г. Княгинино** (д.т.н., проф., Б.В. Папков, д.т.н., доц., В.Л. Осокин): 1) В разделе «Практическая ценность ... », стр. 7 отмечено, что «Внедрение разработанных технических решений обеспечивает энерго- и ресурсосбережение и снижение ущерба от недоотпуска электроэнергии и простоев при выходе на отдельную работу». На стр. 8 в качестве эффекта заявлено «... снижение ущерба от простоев оборудования цехов и недоотпуска электроэнергии по причине нарушения устойчивости синхронных генераторов в результате провалов напряжения в сети и выходе на отдельную работу». Каков может быть недоотпуск электроэнергии; какова длительность простоя генерирующих агрегатов и оборудования цехов; каков ущерб от снижения мощности потребителей собственных нужд и провалов напряжения? 2) Исследовались ли проблемы самозапуска крупных высоковольтных электродвигателей, входящих в состав ВЗЭС металлургических предприятий. 3) В исследуемых многомашинных ВЗЭС в составе ЭЭС при наличии разнородных генерирующих источников возможен асинхронный квазиустановившийся режим. Применимы ли предлагаемые подходы управления АРВ и АРЧВ для решения подобных задач?

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

**развита:** теория взаимосвязанных многомашинных электротехнических систем в составе заводских синхронных генераторов, электрической и тепловой нагрузки, включающая научные положения и комплекс научно обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС.

**сформулирована:** концепция взаимосвязанного распределения электрических и тепловых нагрузок многомашинных систем внутриводского электропитания металлургического предприятия, положенная в основу методики выбора электроэнергетического оборудования, работающего по электрическому и тепловому графику.

**разработаны:**

- способ АРВ генераторов ЗЭС, повышающий статическую и динамическую устойчивость при параллельной и отдельной работе с энергосистемой за счет более эффективного использования каналов стабилизации по углу ротора и коррекции напряжения уставки в соответствии с напряжением сети;

- принцип группового АРВ синхронных генераторов ЗЭС, обеспечивающий повышение статической и динамической устойчивости при отдельной работе с энергосистемой, заключающийся в выравнивании собственных углов роторов с возможностью корректировки напряжения в заданной точке сети и использовании каналов стабилизации по углам роторов генераторов;

- принцип групповой ресинхронизации промышленной многомашинной тепловой электростанции (ТЭС) с энергосистемой с выбором ведущего агрегата для регулирования частоты и групповым регулированием возбуждения для коррекции напряжения;

**предложены:**

- усовершенствованная методика построения комплексных статических характеристик нагрузки внутриводского электропитания, учитывающая величину критического и защиту минимального напряжения двигательной нагрузки, параметры специфических электроприемников, передающих сетей и объ-

ектов распределенной генерации;

- усовершенствованная методика расчета режима отдельной работы электростанции с энергосистемой, учитывающая действие систем регулирования скорости и возбуждения, регулирующий эффект промышленной нагрузки по частоте и напряжению, наличие блоков паровая турбина - синхронный генератор с тепловым графиком работы на постоянство давления в коллекторе, а также производительность механизмов собственных нужд;

- усовершенствованная методика анализа статической устойчивости синхронных генераторов при отдельной работе с энергосистемой, учитывающая режим работы турбины, точку подключения и регулирующий эффект нагрузки.

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

**создана** научно-методическая основа для совершенствования методов планирования деятельности и разработки схем ЗЭС, дальнейшего развития теории устойчивости генераторов и нагрузки, разработки более эффективных методов и алгоритмов управления эксплуатационными режимами ЗЭС в нормальных режимах работы и при отделении от энергосистемы;

**доказано**, что применение новых способов и принципов управления режимами позволяет поддерживать параметры эксплуатационных режимов ЗЭС, обеспечивающие необходимый запас статической и динамической устойчивости в условиях многомашинной системы внутризаводского электроснабжения;

**применительно к проблематике диссертации эффективно использованы** положения теории статической и результирующей устойчивости, теории автоматического управления и методов математического моделирования, численные методы решения систем дифференциальных уравнений, метод последовательного эквивалентирования, метод последовательного утяжеления, программные продукты системы MatLab;

**предложены** математические модели источников питания и двигательной нагрузки для расчёта установившихся режимов ЗЭС при параллельной и отдельной работе с энергосистемой, учитывающие параметры специфических электроприемников и особенности функционирования генераторов ЗЭС; математические зависимости и методики для анализа динамической устойчивости

генераторов и нагрузки ЗЭС при провалах напряжения со стороны энергосистемы (ЭС), выходе в островной режим и последующей ресинхронизации;

**раскрыта:** взаимосвязь между развитием аварийных ситуаций и действием систем автоматического регулирования на основе анализа нормальных и аварийных режимов действующих ЗЭС (в том числе провалов напряжения и выходов в островной режим);

**изучены** закономерности взаимного влияния параметров систем АРВ и АРЧВ на устойчивость генераторов и электрической и тепловой нагрузки.

**проведена модернизация** принципов группового управления системами АРВ синхронных генераторов в условиях ЗЭС за счет использования каналов стабилизации по углам роторов, а также необходимости учета устойчивости по напряжению в условиях работы на разветвленную распределительную сеть при параллельной работе с ЭС.

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

**разработаны и внедрены:** методики определения комплексных статических характеристик нагрузки и анализа статической устойчивости, а также алгоритм расчета островных установившихся режимов в составе программного комплекса «КАТРАН»; способ индивидуального АРВ синхронных генераторов ЗЭС при параллельной и отдельной работе с ЭС большой мощности в составе патента; методика распределения электрической и тепловой нагрузки между блоками паровая турбина - синхронный генератор заводской электростанции для сохранения устойчивости, учитывающая групповую ресинхронизацию и действие дифференциальной защиты шин;

**обеспечено** энерго- и ресурсосбережение за счет повышения устойчивости, возможности увеличения вырабатываемой активной мощности ЗЭС при совместной работе с энергосистемой и снижения ущерба от недоотпуска электроэнергии, а так же простоев при выходе на отдельную работу, что способствует повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургических предприятий; в результате внедрения разработанных технических решений в промышленную эксплуатацию ЦЭС ПАО «ММК» получен суммарный экономиче-

ский эффект, составляющий более 10 млн. руб./год.

**созданы** технические предпосылки для повышения запаса статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС;

**доказано**, что внедрение разработанных технических решений повышает устойчивость генераторов и нагрузки промышленных ТЭС в нормальном и островном режимах, а также технико-экономическую эффективность ЗЭС за счет снижения ущерба от аварийных простоев и энергосбережения; разработанные технические решения, преимуществом которых является высокая эффективность при простоте реализации, рекомендуются для внедрения на промышленных ТЭС, работающих по электрическому и тепловому графикам;

**сформулированы** рекомендации по дальнейшему совершенствованию принципов управления режимами ЗЭС для получения экономического эффекта:

– повышение статической устойчивости генераторов при параллельной работе с ЭС за счет прогнозирования режимов с учетом использования разработанного способа регулирования возбуждения;

– повышение статической устойчивости генераторов при автономной работе с ЭС, за счет разработанной методики выбора электроэнергетического оборудования, работающего по электрическому и тепловому графикам;

– повышение результирующей устойчивости при параллельной работе с ЭС при провалах напряжения за счет разработанного способа индивидуального АРВ с учетом канала стабилизации по углу ротора;

– снижение ущерба от простоев оборудования цехов и недоотпуска электроэнергии по причине нарушения устойчивости синхронных генераторов в результате провалов напряжений в сети и выходе на отдельную работу.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

**корректное** применение положений теории статической и результирующей устойчивости, теории автоматического управления и методов математического моделирования, использованием реальных характеристик действующего оборудования, адекватностью расчетных и экспериментальных данных, результатами вычислительных экспериментов, переданных к внедрению на собственную электростанцию ЦЭС ПАО «ММК»;

**теория** базируется на известных положениях статической и результирующей устойчивости электроэнергетических систем, систем автоматического управления, вычислительной математики и методов математического моделирования;

**идея** базируется на развитии теории взаимосвязанных многомашинных электротехнических систем, содержащих источники электрической и тепловой энергии заводских синхронных генераторов и электрической и тепловой нагрузки; впервые обоснованы необходимые условия для: сохранения устойчивости ЗЭС при параллельной и раздельной работе с энергосистемой, проектирования и ведения режимов с учетом сохранения балансов мощностей при работе релейных защит, настройки систем индивидуального и группового АРВ, обеспечивающего достаточный запас устойчивости в эксплуатационных режимах, реализации групповой ресинхронизации с учетом минимизации простоев генераторов и потребителей;

**выполнена** оценка эффективности разработанных технических решений, в частности, методики определения комплексных статических характеристик нагрузки и анализа статической устойчивости, а также алгоритма расчета островных установившихся режимов; способа индивидуального АРВ синхронных генераторов ЗЭС при параллельной и раздельной работе с ЭС; принципов группового АРВ генераторов ЗЭС в островном режиме и ресинхронизации с ЭС; методики распределения электрической и тепловой нагрузки между блоками паровая турбина - синхронный генератор заводской электростанции для сохранения устойчивости, подтвердившая технико-экономическую эффективность исследований за счет снижения ущерба от аварийных простоев и энергосбережения;

**установлено** соответствие результатов теоретического анализа и вычислительных экспериментов, адекватностью расчетных и экспериментальных данных, полученных на основе реальных аварийных ситуаций;

**использованы** методы имитационного моделирования системы сеть - синхронный генератор с адаптивным индивидуальным и групповым автоматическим регулированием возбуждения и управления такими системами при по-

мощи программного комплекса MatLab, на основе моделей, разработанных непосредственно соискателем.

**Личный вклад соискателя** состоит в: формулировании проблемы и путей её решения; постановке целей и задач исследования; непосредственном выполнении всех приведенных в диссертации исследований, внедрение их результатов, а именно: формулировании новых принципов работы систем АРВ и АРЧВ объектов распределенной генерации; разработке методики построения комплексных статических характеристик нагрузки металлургического предприятия, методик расчета и анализа статической устойчивости островных установившихся режимов работы ЗЭС, способа АРВ генераторов ЗЭС, принципа группового АРВ синхронных генераторов ЗЭС, принципа групповой ресинхронизации промышленной многомашинной ТЭС с энергосистемой, методики выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих в нормальном режиме на постоянство давления в паропроводе; выполнении теоретических и экспериментальных исследований, проведение моделирования эксплуатационных режимов ЗЭС; в подготовке публикаций по теме исследования.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

**В отзыве ведущей организации:**

1. В главе 4 не сформулированы четкие критерии эквивалентности применительно к синхронным генераторам и двигателям переменного тока.
2. Не достаточно подробно охарактеризованы типы систем возбуждения, применяемые на заводских электростанциях.
3. В работе отсутствует описание возможности использования методики анализа статической устойчивости на газотурбинных и парогазовых электростанциях.
4. В диссертационной работе не приводится подробное описание возможностей разработанного программного обеспечения «КАТРАН».
5. Методика расчета установившегося режима основана на методе последовательного эквивалентирования, однако его характеристика не приведена.
6. Каковы достоинства разработанной методики получения статических

характеристик нагрузки по сравнению с существующими.

7. Не достаточно раскрыты вопросы применения многопараметрической делительной автоматики применительно к заводским системам электроснабжения, содержащим теплоэлектроцентрали с паротурбинными установками.

8. Не затронуты вопросы самозапуска двигателей переменного тока при исследовании режимов просадки напряжения.

**Соискатель Газизова О.В. ответила на заданные вопросы и замечания ведущей организации, и привела собственную аргументацию:**

1. Решения по эквивалентированию приняты на основе многолетних исследований переходных электромагнитных и электромеханических процессов генераторов и двигателей, и критерии эквивалентности должны быть связаны с соответствующими характеристиками переходного режима.

2. Данные системы возбуждения в диссертации представлены в общем виде в связи с тем, что современные системы возбуждения, в основном, имеют одинаковые постоянные времени, относительно невысокие, и при моделировании электромеханических переходных процессов только эта постоянная времени входит в саму модель. Подробное рассмотрение не проводилось, так как они являются быстродействующими.

3. Данная методика может быть использована на электростанциях с газотурбинными и парогазовыми установками, если на них происходит одновременная выработка электроэнергии и тепла. Необходимо скорректировать особенности действия систем регулирования частоты вращения.

4. Возможности «КАТРАН» были многократно изложены в публикациях и в общем случае направлены на анализ режимов и устойчивости ЗЭС при параллельной и автономной работе с энергосистемой, а также позволяют исследовать переходные электромеханические процессы в многомашинных системах в аналогичных условиях.

5. Данная методика уже приводилась неоднократно в публикациях, которые представлены в работе.

6. Разработанная методика отличается от существующих тем, что существующие ориентированы на оценку характера изменения нагрузки при проведе-

нии активного или пассивного экспериментов на реальном объекте. В моей работе используется подробное моделирование всех потребителей, что позволяет оценить тенденцию изменения регулирующего эффекта.

7. Возможно использование тепловых накопителей, делительной автоматики по напряжению и необходимо контролировать баланс мощностей при выходе на раздельную работу. При необходимости корректировать состав нагрузки.

8. Программный комплекс «КАТРАН» позволяет исследовать режим самозапуска двигателей и при необходимости оценить его влияние на параметры режима.

#### **В отзыве официального оппонента Илюшина П.В.:**

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

3. В гл. 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 данный закон и его математическое описание отсутствуют.

4. В гл. 2 (стр. 113) на рис. 2.9 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 элек-

троэнергетических 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 гл. 3 (стр. 133) на рис. 3.7 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 гл. 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).

7. В гл. 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 гл. 4 (стр. 202) соискателем «предложена совокупность критериев, при соблюдении которых можно сделать вывод о возможности эквивалентирования группы электродвигателей», однако наличие у конкретного двигателя собст-

венной 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 гл. 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 двигателей, 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 гл. 4 (стр. 205) отмечается, что в «островном режиме в качестве критической величины напряжения можно считать 85 % от номинального, так как при этом напряжении отрабатывают 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 гл. 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 гл. 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.

**Соискатель Газизова О.В. ответила на заданные вопросы и замечания оппонента, и привела собственную аргументацию:**

1. Наиболее распространенным является закон регулирования на постоянство напряжения на выводах обмотки статора. Однако, при установленных мощностях промышленных генераторов (на ГРУ 3-10 кВ до 30 МВт) в условиях связи с энергосистемой большой мощности, его применение весьма затруднительно, поскольку определяющей является энергосистема, а система возбуждения будет входить в ограничения. В островном режиме определять уровень напряжения будут только генераторы. Поэтому требуется адаптация систем регулирования возбуждения к подобным условиям.

2. Исследуемый узел является избыточным по активной мощности. Поэтому дефицитных состояний, требующих накопителей электрической энергии, практически не наблюдается. Применение паронакопителей актуально при выходе на отдельную работу, поскольку в избыточном узле снижается выработка активных мощностей и сопутствующая выработка пара, хотя состав тепловой нагрузки не меняется.

3. Данный закон в косвенном виде представлен и соответствует случаю «АРВ отсутствует» с учетом типа возбудителя. Широко применяется на производстве для нагрузки с вентиляторным моментом на валу, не требующим изменения скорости по технологическому процессу.

4. Снижение коэффициента запаса устойчивости до нуля в любом случае свидетельствует о недопустимости такого режима. Поэтому при анализе изменения коэффициента запаса устойчивости в результате перераспределения функций регуляторов давления на турбинах в островном режиме данный подход позволил выявить наиболее слабые места и оценить эффективность разработанной методики. При этом данные, полученные по результатам аварийной ситуации, были подтверждены расчетами.

5. Исследуемые режимы были приняты в результате анализа аварийных ситуаций с 2003 по 2022 гг. Он показал, что большое количество вводов от энергосистемы к Магнитогорскому энергоузлу, а также 4 линии непосредственно к электростанции, практически не приводит к возникновению островного режима, как и маловероятное снижение частоты в питающей энергосистеме.

6. В данной работе в программе «КАТРАН» выполнено математическое моделирование асинхронных двигателей собственных нужд в соответствии со схемой электроснабжения, разработанными математическими моделями, а также типами двигателей. Маленькая загрузка объясняется небольшим, но необходимым потреблением ресурса или необходимостью постоянного неявного резерва. Режим перегрузки может наблюдаться у насосов, работающих на общий коллектор, имеющий некоторый запас по регулированию давления.

7. В целом предлагается шаг 0,3, однако при необходимости дополнительно следует учесть электрическую удаленность двигателя от возмущения.

8. Если эквивалентируются двигатели с разными уставками защиты минимального напряжения с целью анализа динамической устойчивости, то необходимо корректировать изменение суммарной мощности во времени, что может вызвать определенные сложности.

9. Распределение 0,3 взято на основе многочисленных расчетов в ходе выполнения НИР. Коэффициент загрузки 0,4-0,8 соответствует наиболее распространенным значениям в промышленной эксплуатации. Однако, он может находиться в пределах 0,2-1,1 в зависимости от технологии (Приложение 5).

10. Поскольку в островном режиме заводской электростанции с нагрузкой могут работать машины переменного тока соизмеримой мощности, то в общем

случае устойчивость может нарушиться у любой из машин, не зависимо от ее функций в узле. В частном случае, когда генератор перегружен по активной мощности, электрически удален от других машин, имеется дефицит реактивной, а двигатели имеют меньшую загрузку по активной мощности, то процесс может начаться с источника, как было в исследуемой аварии.

11. В данном случае речь идет о том, что генератор или группа генераторов могут изменять уровень частоты в островном режиме в выделившемся на отдельную работу узле. В их функции входит изменения уровня частоты до значения, при котором возможна групповая ресинхронизация с энергосистемой. И данные генераторы (как правило, одна машина) относятся к ведущим в данном конкретном автономном узле.

12. На рис. 6.3 схема электрических соединений показана упрощенно. Фактически у данной электростанции четыре линии связи с энергосистемой, а мощность КЗ составляет более 5000 МВА на шинах 110 кВ. Поэтому ослабление связи маловероятно и даже колебательная статическая устойчивость не рассматривалась, так как при хорошей связи с энергосистемой проблемы самораскачивания в узле отсутствуют.

#### **В отзыве официального оппонента Куликова А.Л.:**

1. На стр. 24 диссертации, рис. 1.7 приведены причины аварийных ситуаций на ЗЭС за период с 2003 - 2022 гг. Основной причиной аварийных случаев (13 случаев) указаны однофазные замыкания на землю (ОЗЗ). Каким образом объясняется сильное влияние ОЗЗ на устойчивость многомашинных электротехнических систем, ведь ОЗЗ не сопровождаются сверхтоками?

2. В диссертационной работе целесообразно было бы рассмотреть вопросы реконструкции систем внутривозовского электроснабжения металлургического предприятия, в том числе включающие установку накопителей электрической и тепловой энергии, устройств управления на основе силовой электроники, деление электрической сети с применением вставок постоянного тока и других.

3. Оценивались ли последствия реализации принципа группового АРВ, изложенного в гл. 5? Если поддерживаются одинаковые углы роторов генераторов, то это может отрицательно сказаться на экономии топлива разнородных

генераторов, ухудшить перетоки мощности по связям и повысить потери электроэнергии в сети в целом, понизить резерв, регулировочную способность ведущих генераторов, ухудшить динамическую устойчивость при электрически близких возмущениях. Ведь режим именно одинаковой загрузки генераторов, одинаковости их Куст не может быть самостоятельной целью и не имеет ценности в отрыве от прочих критериев эффективности электроэнергетических систем.

4. Исследовалось ли влияние неточности измерений параметров токов и напряжений и режима системы внутривозовского электроснабжения металлургического предприятия на эффективность управления в аварийных режимах и обеспечение динамической устойчивости?

5. В гл. 6 (стр. 261) на рис. 6.1 приведена модель турбогенератора в программном комплексе «MATLAB» для анализа эффективности индивидуального АРВ при просадках напряжения различной глубины и длительности. Поскольку автором рассматриваются многомашинные электротехнические системы ВЗЭС, том числе включающие двигательную нагрузку, насколько оправдано использование в модели статическое представление нагрузки? Каким образом отклонение других показателей качества электроэнергии от нормативных значений, например, несинусоидальности токов и напряжений, повлияет на устойчивость многомашинных электротехнических систем ВЗЭС?

6. Каким образом увеличение предельного времени отключения КЗ повлияет на промышленную нагрузку? Будет ли оно допустимо с учетом функционирования технологической автоматики электроприемников?

7. Насколько и в каких случаях могут быть масштабированы результаты диссертационной работы. Какие выводы по работе (положения научной новизны) являются более универсальными, а какие больше свойственны частному случаю схемы электрических соединений ЗЭС?

**Соискатель Газизова О.В. ответила на заданные вопросы и замечания оппонента, и привела собственную аргументацию:**

1. Как показал анализ подобных аварийных ситуаций, ОЗЗ на напряжениях 3-10 кВ чреват тем, что в результате перенапряжений имеют случаи перехода

в трехфазное КЗ с последующим отключением генератора, кроме того, как известно, при токе замыкания на землю 5 А и выше защита должна действовать на отключение генератора, так как при этом имеется опасность повреждения стали статора, а поскольку к шинам генераторного напряжения ЗЭС подключена протяженная распределительная сеть, то защита работает на отключение.

2. Применительно к рассматриваемой ЗЭС с паротурбинными установками и избытком активной мощности в случае выхода в островной режим могут быть полезны тепловые накопители для непрерывного теплоснабжения ответственных потребителей. Возможно применение многопараметрической делительной автоматики, в частности, к существующей автоматике по частоте целесообразно добавить автоматику по напряжению. Полезным будет непрерывный контроль баланса активных и реактивных мощностей в узле на случай выхода на отдельную работу.

3. Выравнивание углов осуществляется только за счет АРВ в допустимых пределах. Поскольку изменение угла ротора производится путем изменения тока возбуждения при неизменной активной мощности, то на изменении потребления топлива это не скажется. Влияние на потокораспределение при групповом АРВ обусловлено изменением выработки активных мощностей и изменением уровня напряжения. Ни на снижение резерва, ни на работу ведущего агрегата это не влияет. Коэффициент запаса статической устойчивости определяется углом ротора, который характеризует исходный установившийся режим. Поэтому, повышая его, мы автоматически повышаем динамическую устойчивость.

4. Влияние неточности измерений параметров токов и напряжений не исследовалось. Ввиду того, что речь идет о вопросах сохранения баланса мощностей при анализе эффективности делительной автоматики, а также регулировании тока возбуждения в соответствии с отклонением от напряжения уставки, то необходимо учесть совокупность погрешностей элементов, через которые проходит сигнал, и сделать вывод о допустимости его использования при работе автоматики.

5. В данной модели использовано статическое представление нагрузки с целью показать влияние разработанных принципов АРВ без дополнительных возмущающих факторов. Анализ возможности применения статических характеристик комплексной нагрузки при снижениях напряжения до 15 % исследован в главе 4 и показал положительные результаты. При больших значениях необходимо пользоваться динамическими характеристиками. Если нагрузка является резкопеременной, то это необходимо также отразить в модели. Несимметричные режимы в данной работе не рассматривались и несинусоидальные режимы не рассматривались.

6. Повышение предельного времени отключения предотвращает выпадение генераторов из синхронизма, что актуально в условиях питания с шин генераторного распределительного устройства большого числа цехов, поскольку асинхронный ход, в свою очередь, сопровождается снижением напряжения и может вызвать срабатывание защиты минимального напряжения электроприемников и, как следствие, нарушение непрерывного технологического процесса. Если предельное время отключения будет больше, чем время действия технологических защит по напряжению, то данное мероприятие может быть не эффективным.

7. Результаты диссертационной работы могут быть использованы на заводских ТЭС, имеющих поперечные связи по электроэнергии и по пару. Методика построения комплексных статических характеристик нагрузки ВЗЭС, методика расчета режима раздельной работы, методика анализа статической устойчивости синхронных генераторов, принципы группового АРВ и групповой ресинхронизации, являются более универсальными и могут быть применены для местных электростанций при выходе в островной режим. Способ АРВ генераторов ЗЭС, методика выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, больше свойственны частному случаю рассмотренной схемы электрических соединений ЗЭС.

**В отзыве официального оппонента Паздерина А.В.:**

1. Название работы звучит как «Повышение устойчивости ...» однако в работе рассматриваются не все способы повышения устойчивости многомашиных систем. Отсутствует анализ и предложения по некоторым техническим мерам повышения устойчивости, связанным с установкой устройств компенса-

ции реактивной мощности; применение накопителей электроэнергии, секционирование шин, установка различных систем противоаварийного управления, направленных на поддержания устойчивости в аварийных ситуациях.

2. Работа носит явную практическую направленность. Генерация новых и современных промышленных предприятий в основном строится на основе газопоршневых, реже газотурбинных установок, которые за счет меньших постоянных времени более склонны к потере устойчивости, но предоставляют большие возможности для регулирования и обладают принципиально иной связью тепла и электричества. Указанные виды промышленной генерации требуют иных технических решений, но в работе лишь упомянуты в гл. 1, а в дальнейшем рассмотрено только паросиловое оборудование, что существенно сужает область определения диссертационной работы и применимость результатов.

3. Расчетный способ определения комплексных статических характеристик узлов промышленной нагрузки, разрабатываемый в работе, имеет известные недостатки. Прежде всего погрешность определяется постоянным изменением долей различных типов электроприемников. Кроме того, фактические СХН современных электроприемников изучены слабо и в справочной литературе не представлены.

4. Методы последовательного эквивалентирования (backward/Forward Sweep method) имеют системные недостатки при расчете предельных режимов. Имеется риск «оптимистической ошибки», то есть он может показать наличие решения там, где метод Ньютона выявит расхожимость. На практике это означает, что расчет на основе последовательного эквивалентирования может превысить предел по устойчивости. В диссертации отсутствует такой анализ.

5. В многомашинных системах предприятия возможно нарушение периодической устойчивости, которое чаще всего связано с тем, что система переходит в режим с отрицательным демпфированием по ряду причин. В работе данному направлению не уделено достаточного внимания. Не в полной мере декомпозированы устойчивость генерации и устойчивость нагрузки.

6. Судя по предоставленному описанию, часть из перечисленных во Введении проблем вызвана, в первую очередь, некорректными или неоптимальными

ми настройками устройств релейной защиты и автоматики, поэтому может быть устранена их изменением.

7. В работе исследована статическая устойчивость и пределы передаваемой мощности в коротких распределительных сетях. Необходимо обосновать, какие особенности схем заводских электростанций и в каких режимах приводят к недостаточной пропускной способности, возможно ли это на других ТЭЦ?

8. В «Методических указаниях по устойчивости энергосистем» различают устойчивость по напряжению и активной мощности. Применительно к генераторам ТЭЦ, имеющим относительно невысокую мощность, не ясно, какой вид устойчивости должен быть применим в различных эксплуатационных режимах и как это отразится на показателях устойчивости.

**Соискатель Газизова О.В. ответила на заданные вопросы и замечания оппонента, и привела собственную аргументацию:**

1. Предложения направлены на повышение устойчивости существующих источников генерации. Применительно к рассматриваемой ЗЭС в отдельных случаях могут быть полезны дополнительные источники реактивной мощности. При избытке активной мощности в узле дополнительных накопителей электроэнергии не требуется. Секционирование шин на генераторном напряжении применено в сочетании с секционными и линейными реакторами. Возможно использование многопараметрической делительной автоматики.

2. Данные виды генерации обладают принципиально иной связью тепла и электричества, причем отсутствует такая жесткая связь, как у паротурбинных установок. Однако, использование указанных малоинерционных источников энергии при их подключении к шинам генераторных распределительных устройств, питающим цеха, требует принципиального изменения существующей схемы электрических соединений. Необходим постоянный контроль баланса мощности узла в островном режиме с возможностью его быстрого восстановления за счет изменения конфигурации сети, а также использования источников реактивной мощности и накопителей электроэнергии.

3. Основной тенденцией в данном вопросе является анализ результатов активного или пассивного эксперимента применительно к комплексной нагрузке.

Однако, выявление регулирующего эффекта применительно к отдельным, зачастую, энергоёмким, электроприемникам, представляет интерес, как в целях расчета островных режимов, так и для выявления тенденций по его изменению.

4. Однако в условиях сосредоточенного энергоузла, питающегося от энергосистемы большой мощности КЗ, при отсутствии линий электропередачи большой протяженности, а также избытке активных мощностей, такие риски существенно ниже. Кроме того, результаты математического моделирования аварийного режима выхода на раздельную работу отличаются от фактических не более, чем на 10 %, что подтверждает эффективность выбранного метода расчета для данного энергоузла.

5. Программа исследования была разработана на основе многолетней статистики аварийных ситуаций, которая не выявила случаи самораскачивания в данном узле. В условиях высокой степени резервирования и большой мощности КЗ практически случаи самораскачивания не наблюдаются. С помощью программы «КАТРАН» произведен расчет режима выхода на раздельную работу заводской электростанции с индивидуально представленными двигателями собственных нужд. При отсутствии дефицита мощностей раскачивания не наблюдалось, что подтверждает практика.

6. В ряде случаев учет устойчивости генераторов ЗЭС позволит более эффективно выбирать данные настройки.

7. Наличие секционных и многочисленных линейных токоограничивающих реакторов на шинах генераторных напряжений, а также трансформаторов связи между различными ступенями трансформации (110, 10, 6 и 3 кВ) существенно снижают пропускную способность в островном режиме и делают сеть «запертой» для передачи реактивной мощности на другие ступени трансформации, то есть ухудшают условия регулирования напряжения.

8. В условиях параллельной работы с энергосистемой большой мощности, определяющей уровень напряжения на шинах генераторов, а также разветвленной распределительной сети генераторного напряжения, повышающей вероятность провалов напряжения, предлагается использовать показатели устойчивости по напряжению. При автономной работе, когда единственными источника-

ми энергии являются местные генераторы, появляется необходимость использования коэффициента запаса по активной мощности. Коэффициент запаса по напряжению можно рассчитать дополнительно.

**В ходе заседания диссертационного совета:**

1. Является ли рассмотренная ситуация, описывающая устойчивость генераторов, частной, произошедшей в результате работы непрогнозируемой работы автоматики, или эту ситуацию можно рассматривать как общую и типовую ситуацию в целом по устойчивости?

2. Анализ аварийных ситуаций на областных электростанциях и сбор статистических данных (количество аварий, последствия аварий) выполнен в рамках одного предприятия? Приведенные статистические данные и решения, которые в дальнейшем вы предлагаете, могут быть транслированы на крупные промышленных предприятия с подобными типами нагрузок и систем электропитания?

3. Было ли оценено соотношение электрических и тепловых нагрузок, приведенных в работе на общей энергетической диаграмме?

4. Углы ротора измерялись в каждой машине относительно своего статора или какого-то виртуального статора? Как их значения изменятся при расчете относительно энергосистемы?

5. Поясните понятие «регулирующий эффект» и его возможное благоприятное воздействие на сеть.

6. В рассмотренной заводской системе электроснабжения можно улучшить статическую и динамическую устойчивость или изменений не требуется?

7. При групповой ресинхронизации все генераторы одновременно входят в синхронизм или последовательно каждый генератор?

8. Объясните физический смысл коэффициента запаса, полученного в представленных зависимостях при напряжении 0,85 относительных единиц и составляющего -5%.

9. Как в формулах для расчета реактивной мощности получены два коэффициента 0,568 и 0,458?

**Соискатель Газизова О.В. ответила на заданные ей в ходе заседания**

## **вопросы и привела собственную аргументацию:**

1. Если рассматривать выход теплоэлектростанции с определенной электрической и тепловой нагрузкой на отдельную работу, то в любом случае будет подобное развитие ситуации. Отличия только в том, скоординированы ли система регулирования давления и система регулирования скорости, а так же какой небаланс активных мощностей в этом узле.

2. Мной был получен и исследован полный обзор аварий только по рассмотренному металлургическому предприятию. По моему мнению, для предприятий с характерной структурой они будут аналогичны.

3. Данный вопрос рассмотрен для изложенной ранее аварийной ситуации. В результате проведенных итерационных расчетов, учитывающих коррекцию тепловой и электрической нагрузки, получены результаты, подтвердившие данные аварийной ситуации, но представленные в различных единицах изменения, а не в одной, например, Гкал, позволяющей их сравнить.

4. В данном случае по показателям, взятым из эксплуатации, с учетом того, что данные генераторы подключены к нагрузке на генераторном напряжении, были исследованы собственные углы роторов, то есть между ЭДС, связанной с ротором, и напряжением на выводах обмотки статора. Расчет относительно энергосистемы повысит значение углов.

5. Под регулирующим эффектом понимается отношение изменения активной или реактивной мощности в относительных единицах к изменению параметра сети, например, частоты или напряжения, в относительных единицах. Есть понятие «положительный регулируемый эффект», который заключается в том, что при повышении напряжения, нагрузка повышается, а при снижении напряжения нагрузка снижается, что в изолированном узле даст возможность лучше сохранять баланс мощностей и улучшить автономную работу.

6. В целом при выходе в островной режим хорошо использовать некоторые функции из многопараметрической делительной автоматики, в частности, позволяющие сохранить баланс и использовать переключающиеся системы регулирования. Если электрическая нагрузка при правильной системе регулирова-

ния скорости сбалансироваться, то возможна потеря тепловой нагрузки, что требует использования тепловых накопителей.

7. Групповая ресинхронизация практикуется на электростанциях, если вышла на раздельную работу группа генераторов с нагрузкой, и она сохранила устойчивость. Ресинхронизация по одному генератору приведет к потере нагрузки. Поэтому выбирается наиболее мощный генератор, изменяется его активная мощность, и он регулирует частоту. Дополнительно регулируется напряжение, и в точке связи с энергосистемой, например, по шинам 110 кВ, производится групповая ресинхронизация.

8. Коэффициент запаса может быть отрицательным, так как фактическое напряжение может быть меньше критического. В данном случае, во-первых, принято сниженное напряжение, во-вторых, коэффициент загрузки практически равен 0,95 и в-третьих, данный график построен для  $\cos\varphi=1$ . С этими тремя факторами мы можем выйти на небольшой запас по устойчивости.

9. В качестве основного при параллельной работе для синхронных генераторов принят коэффициент запаса по напряжению, поскольку они работают в режиме частых провалов напряжения. Коэффициент запаса в нормальных режимах составляет более 15 %, в утяжеленных режимах более 10 %. Данные значения подставлены в приведенную методику, сделаны соответствующие преобразования, и мной были получены эти коэффициенты.

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 диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук.

На заседании 16 апреля 2026 г. диссертационный совет принял решение: за развитие теории взаимосвязанных электротехнических систем и разработку комплекса научно обоснованных технических решений, обеспечивающих повышение статической, динамической и результирующей устойчивости систем внутриводского электроснабжения металлургического предприятия при совместной эксплуатации взаимосвязанных многомашинных электротехнических систем распределенной генерации и электрической и тепловой нагрузки, что

соответствует приоритетным направлениям развития страны и является значительным вкладом в её развитие, присудить Газизовой Ольге Викторовне учёную степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них - 10 докторов наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени – **11** против присуждения учёной степени - **нет**, не проголосовали - **нет**.

Председательствующий



Храмшин Вадим Рифхатович

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Одинцов Константин Эдуардович

16 апреля 2026 г.