

**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по науке и инновациям

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

доктор технических наук,

Комаров Иван Игоревич



\_\_\_\_\_ 2026 г.

**ОТЗЫВ**

**ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» на диссертационную работу Газизовой Ольги Викторовны «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутризаводского электроснабжения металлургического предприятия», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

**Для подготовки отзыва ведущей организации представлены:**

- диссертация объемом 347 страниц основного текста, содержит 112 рисунков и 36 таблиц, состоящая из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 364 наименований и 7 приложений объемом 78 страниц;
- автореферат диссертации, в котором дана общая характеристика работы, кратко изложено содержание, приведены основные результаты, выводы и рекомендации.

### **1. Актуальность темы диссертации**

Внедрение объектов распределенной генерации в условиях крупных металлургических предприятий приводит к существенному усложнению структуры их внутризаводского электроснабжения (ВЗЭС), а также эксплуатационных и аварийных режимов работы. Источником тепловой и электрической энергии на таких предприятиях выступают заводские теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Синхронные генераторы в совокупности с энергоемкими высоковольтными двигателями образуют разветвленную многомашинную электротехническую систему ВЗЭС. В настоящее время происходит



изменение и усложнение самой структуры существующих заводских электростанций (ЗЭС), что повышает вероятность провалов напряжения и выхода электростанции в островной режим с тепловой и электрической нагрузкой. Основной задачей в таких условиях является сохранение статической и динамической устойчивости генераторов и электродвигателей, что требует совершенствования принципов управления электрическими и тепловыми режимами.

Анализ показателей статической устойчивости генераторов выявил, что они не всегда соответствуют требованиям нормативных документов. При совместной работе с энергосистемой (ЭС) к этому приводит высокая загрузка генераторов и несовершенство систем регулирования возбуждения; при выходе в островной режим - некорректное распределение функций блоков паровая турбина - синхронный генератор по обеспечению тепловой и электрической нагрузки, не учитывающее работу дифференциальной защиты шин, баланс активных и реактивных мощностей и запас устойчивости. В таких авариях простой источников длится до трех суток, а цехов, питающихся с шин ЗЭС, - до суток. «Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации» (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 13.05.2019 № 216) также требует согласованного развития централизованного электроснабжения с местным.

Таким образом, децентрализация производства электроэнергии приводит к необходимости совершенствования принципов управления генераторов заводских ТЭЦ с целью обеспечения повышения устойчивости систем ВЗЭС металлургического предприятия с учетом структуры сети, условий связи с ЭС, величины электрической и тепловой нагрузки. В связи с этим тема диссертации соискателя Газизовой О.В., направленная на решение указанной научно-технической проблемы, является актуальной.

## **2. Научная новизна работы**

Научную новизну содержат следующие положения диссертации:

1. Взаимосвязь между развитием аварийных ситуаций и действием систем автоматического регулирования, выявленная на основе анализа нормальных и аварийных режимов действующих ЗЭС (в том числе провалов напряжения и выходов в островной режим). Новые принципы работы систем автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и автоматического регулирования частоты вращения (АРЧВ) объектов распределенной генерации, позволяющие повысить показатели устойчивости ЗЭС.

2. 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 двигателей.

3. 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. Выявленные закономерности взаимного влияния параметров систем АРВ и АРЧВ на устойчивость генераторов и электрической и тепловой нагрузки.

4. Математические зависимости и методики для анализа динамической устойчивости генераторов и нагрузки ЗЭС при провалах напряжения со стороны ЭС, выходе в островной режим и последующей ресинхронизации.

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

6. Принципы группового управления системами АРВ синхронных генераторов ЗЭС с использованием каналов стабилизации по углам роторов, повышающие устойчивость при выходе в островной режим и последующей групповой ресинхронизации.

7. Принцип групповой ресинхронизации промышленной многомашинной тепловой электростанции с энергосистемой на основе метода ведущего агрегата с учетом группового АРВ, особенностей ВЗЭС и режима турбогенераторов.

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

### **3. Теоретическая значимость полученных результатов**

Результаты диссертационной работы являются развитием теории и методов математического моделирования ЗЭС и нагрузки ВЗЭС. Соискателем 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 отделении от ЭС.

#### 4. Практическая значимость исследований

Практические результаты работы направлены на создание технических предпосылок для повышения запаса статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС в результате разработки математических моделей источников и нагрузки, алгоритмов и систем управления автоматическими регуляторами синхронных генераторов. Внедрение разработанных технических решений обеспечивает энерго- и ресурсосбережение за счет повышения устойчивости, возможности увеличения вырабатываемой активной мощности ЗЭС при совместной работе с ЭС и снижения ущерба от недоотпуска электроэнергии и простоев при выходе на отдельную работу.

Разработанные методики определения комплексных статических характеристик нагрузки и анализа статической устойчивости, алгоритм расчета островных установившихся режимов в составе программного комплекса «КАТРАН», прошедшего госрегистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности «Роспатент», 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, переданы для внедрения на ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК») для технической реализации предлагаемых способов и систем управления, что подтверждено актами внедрения (приведены в Приложении 1).

К основным техническим и экономическим эффектам от внедрения разработок на электростанциях ПАО «ММК» относятся: повышение статической устойчивости синхронных генераторов при параллельной работе с энергосистемой большой мощности за счет прогнозирования режимов с использованием разработанного способа регулирования возбуждения, учитывающего напряжение энергосистемы; повышение статической устойчивости синхронных генераторов при автономной работе с ЭС, в том числе при наличии блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих по тепловому графику за счет разработанной методики распределения тепловых нагрузок; повышение результирующей устойчивости при параллельной работе с ЭС большой мощности 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

раздельную работу. В результате внедрения разработанных технических решений в промышленную эксплуатацию ЦЭС ПАО «ММК» получен суммарный экономический эффект, составляющий более 10 млн. руб./год.

Результаты диссертации используются в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» при реализации образовательных программ бакалавриата и магистратуры и при руководстве выпускными квалификационными работами.

## **5. Общая характеристика работы**

Во введении обоснована актуальность работы, рассмотрено состояние проблемы, сформулированы цель и основные задачи исследования, объект и предмет исследования, методология и методы исследования, новизна основных научных положений, представлена практическая значимость полученных результатов, соответствие паспорту избранной научной специальности, публикации, апробация и внедрение результатов работы.

В первой главе выполнен анализ и осуществлена оценка эффективности средств управления нормальными и аварийными режимами ЗЭС. Приведена общая характеристика системы ВЗЭС металлургического предприятия, имеющего собственные теплоэлектроцентрали, и ее особенности функционирования при связи с ЭС большой мощности. Выполнена оценка статической устойчивости синхронных генераторов действующей ЗЭС и сделан вывод о работе части машин в утяжеленном режиме. За последние 20 лет произведен анализ аварийных ситуаций промышленных ТЭЦ. Выявлено, что одними из основных причин нарушения устойчивости генераторов являются просадки напряжения на шинах генераторного напряжения и выход в островной режим при несовершенстве законов АРВ и АРЧВ. Дана общая характеристика вопросов управления эксплуатационными режимами промышленных ТЭЦ. Осуществлен анализ способов регулирования частоты и активной, а также напряжения и реактивной мощности на ЗЭС. Исследованы особенности работы делительной автоматики при наличии объектов распределенной генерации. Приведены особенности исследования статической, динамической и результирующей устойчивости генераторов ЗЭС.

Во второй главе в связи с ранее указанными проблемами приведена разработка математических моделей источников и нагрузки, методик расчета установившихся режимов и анализа статической устойчивости при параллельной работе с ЭС и в островном режиме. Получена методика расчета установившихся режимов параллельной

работы ЗЭС с энергосистемой на основе метода последовательного эквивалентирования. Разработана методика расчета установившихся режимов при выходе промышленной ТЭЦ на отдельную с ЭС работу, учитывающая регулирующий эффект специфических промышленных потребителей электроэнергии и наличие тепловой нагрузки. Исследованы вопросы математического моделирования источников питания, элементов электрической сети и промышленной нагрузки. Разработаны алгоритмы расчета регулирующего эффекта индивидуальных электроприемников металлургического предприятия полного цикла производства и методика расчета статических характеристик комплексной промышленной нагрузки. Получены методики анализа статической устойчивости синхронных генераторов ЗЭС при параллельной и отдельной работе с энергосистемой, позволяющие учитывать особенности функционирования ВЗЭС. Создана методика анализа статической устойчивости промышленных двигателей переменного тока.

Третья глава посвящена анализу статической устойчивости синхронных генераторов и потребителей действующей ЗЭС. Приведена подробная характеристика объекта исследования с учетом систем регулирования возбуждения и скорости. Выполнен анализ регулирующего эффекта характерных электроприемников промышленного предприятия и комплексной нагрузки, включая источники распределенной генерации и распределительную сеть. Исследована статическая устойчивость синхронных генераторов ЗЭС при параллельной работе с ЭС. Выполнена оценка влияния закона регулирования возбуждения, напряжения питающей энергосистемы и систем регулирования напряжения трансформаторов на коэффициенты запаса статической устойчивости. Исследована статическая устойчивость источников распределенной генерации при выходе ЗЭС в островной режим с учетом влияния АРВ, АРЧВ и регулирующего эффекта нагрузки. Выполнен анализ статической устойчивости двигателей переменного тока при различных эксплуатационных параметрах.

В четвертой главе рассмотрены вопросы математического моделирования синхронных генераторов и двигателей переменного тока при расчете переходных электромеханических процессов. С целью анализа эффективности работы систем регулирования возбуждения и скорости в среде MATLAB использованы точные математические модели, позволяющие детально оценить изменение магнитных потоков в машине. Сформулированы условия эквивалентирования машин переменного тока в многомашинной системе для исследования подобных переходных электромеханических процессов. Для анализа переходных процессов в многомашинной системе в программном комплексе «КАТРАН» для генераторов и синхронных и асинхронных двигателей

использованы упрощенные математические модели, косвенным образом учитывающие изменение суммарного потокосцепления в машинах. Выполнена оценка допустимости использования статических характеристик комплексной нагрузки в режимах выхода на отдельную с ЭС работу при отклонении напряжения в пределах 10 % от номинальных значений, которая дала положительный результат. Приведена характеристика методов расчета переходных электромеханических процессов, используемых в работе.

Пятая глава посвящена разработке принципов индивидуального и группового регулирования возбуждения, скорости и активной мощности синхронных генераторов ЗЭС. Сформулированы требования к системам регулирования возбуждения промышленных генераторов и разработан принцип индивидуального АРВ при параллельной и отдельной работе с ЭС. Используются каналы стабилизации по изменению угла ротора генератора, улучшающие характеристики переходных процессов. Разработан принцип группового регулирования возбуждения синхронных генераторов ЗЭС при параллельной работе с ЭС с возможностью использования каналов стабилизации и поддержания напряжения на заданных шинах с целью последующей групповой ресинхронизации. Дана общая характеристика систем и законов регулирования возбуждения и частоты вращения на ЗЭС. Разработана методика распределения тепловых нагрузок между блоками турбина-генератор с учетом поддержания давления в общем коллекторе и выхода на отдельную работу. Сформулирован принцип групповой ресинхронизации генераторов ЗЭС с энергосистемой с учетом тепловых нагрузок.

Шестая глава посвящена вопросам исследования динамической и результирующей устойчивости синхронных генераторов и нагрузки ЗЭС при совместной работе с энергосистемой, выходе в островной режим и последующей ресинхронизации с учетом разработанных способов, принципов и методик. Исследованы режимы провалов напряжения со стороны ЭС и оценена динамическая устойчивость машин с учетом разработанного способа индивидуального АРВ. Выполнен анализ режимов выхода на отдельную работу с последующей ресинхронизацией с учетом полученного принципа группового АРВ и работы каналов стабилизации. Смоделирована реальная аварийная ситуация выхода ЗЭС в островной режим, и произведено сравнение результатов, полученных при вычислительном эксперименте, с параметрами, зафиксированными при аварии. Оценено влияние работы автоматических регуляторов частоты вращения и активной мощности на параметры выхода в автономный режим с учетом разработанной методики. Исследована устойчивость двигателей собственных нужд при выходе на отдельную работу при различных небалансах мощностей. Разработаны мероприятия по

обеспечению устойчивости при совместной работе с ЭС с учетом экономических показателей. Оценен экономический эффект от внедрения разработанных мероприятий при параллельной и раздельной работе с ЭС.

#### **6. Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы, содержит информацию об основных положениях и выводах диссертации, позволяет сделать заключение о научном уровне работы, ее содержании и полностью отражает научные положения, результаты, основные выводы, научную новизну и практическую значимость диссертации.

#### **7. Обоснованность и достоверность результатов диссертации**

Обоснованность и достоверность научных положений, теоретических выводов, результатов и рекомендаций обеспечивается правомерностью принятых исходных положений и предпосылок, корректным применением 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».

#### **8. Соответствие диссертации паспорту заявленной научной специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы (далее – курсивом по тексту паспорта) по следующим направлениям исследований:

- п.1. *«...анализ системных свойств и связей, ... математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические преобразователи энергии ... системы ... электроснабжения»* (осуществлен анализ системных свойств системы электроснабжения крупного промышленного предприятия в аварийных режимах, математические модели электрических нагрузок промышленного предприятия, разработанные математические модели генерирующего оборудования заводской электростанции с учетом систем регулирования возбуждения и скорости);

- п. 2. *«Разработка научных основ ... эксплуатации электротехнических*

*комплексов, систем ...»* (концепция взаимосвязанного распределения тепловых и электрических нагрузок для сохранения устойчивости при выходе в островной режим);

- п. 3. *«Разработка... алгоритмов эффективного управления»* (разработка способа индивидуального управления системой регулирования возбуждения генераторов заводской электростанции, разработка принципа группового управления системой регулирования возбуждения генераторов заводской электростанции, разработка принципа групповой ресинхронизации заводской электростанции с энергосистемой);

- п. 4. *«Исследование ... качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях...»* (анализ статической устойчивости генераторов и нагрузки заводской электростанции в нормальном и островном режимах, анализ динамической и результирующей устойчивости генераторов при провалах напряжения в сети и выходе на отдельную работу).

### **9. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Основные научные результаты рекомендуются к применению на любых энергоёмких производствах со сложными системами ВЭС и собственными ТЭЦ. Основная область использования - управление эксплуатационными режимами сменным персоналом электрических станций, службами и группами режимов. Внедрение результатов исследований на ВЭС способствует повышению устойчивости генераторов и снижению ущерба от простоев оборудования цехов и недоотпуска электроэнергии, расширяет возможности действующих и вновь создаваемых электростанций, обеспечивает повышение экономической эффективности за счет энерго- и ресурсосбережения, способствует повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургических предприятий. Разработанные технические решения, преимуществом которых является высокая эффективность при простоте реализации, рекомендуются для внедрения на промышленных ТЭЦ, работающих по электрическому и тепловому графикам. Материалы диссертации в целом рекомендуются к использованию в учебном процессе учреждений высшего образования.

### **10. Публикации и апробация результатов диссертации**

Основные положения диссертационного исследования докладывались и обсуждались на 37 научно-технических конференциях различного уровня.

Все основные результаты диссертации опубликованы в статьях в рецензируемых

изданиях, входящих в перечень ВАК или приравненных к ним: 35 статей в журналах из перечня ВАК, все из которых отнесены к категориям К1, К2, 17 статей в изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus. Издано 4 монографии в соавторстве. Получены также 3 патента РФ на изобретения и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Опубликованные по результатам исследований материалы достаточно полно отражают основное содержание диссертации, имеются ссылки на авторов и источники заимствования материалов.

Автореферат в достаточно полной мере отражает сущность диссертационной работы О.В. Газизовой.

### **11. Вопросы и замечания по диссертационной работе**

1. В главе 4 не сформулированы четкие критерии эквивалентности применительно к синхронным генераторам и двигателям переменного тока.

2. В главе 1 описаны существующие принципы автоматического регулирования возбуждения, однако недостаточно подробно охарактеризованы типы систем возбуждения, применяемые на заводских электростанциях.

3. Методика анализа статической устойчивости разработана применительно к синхронным генераторам в составе паротурбинной ТЭЦ. В работе отсутствует описание возможности использования данной методики 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 в диссертации его характеристика не приведена.

6. Из диссертации не ясно, каковы достоинства разработанной методики получения статических характеристик нагрузки по сравнению с существующими.

7. Недостаточно 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.

Отмеченные замечания не снижают значение и ценность полученных в

диссертации основных научных и практических результатов.

**12. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842**

**Соответствие п.9.** Диссертационная работа Газизовой О.В. является завершенной научно-квалификационной работой, в которой разработаны теоретические положения, направленные на повышение технико-экономической эффективности и устойчивости многомашинных электротехнических систем внутризаводского электроснабжения металлургического предприятия путем совершенствования принципов управления их эксплуатационными режимами.

**Соответствие п.10.** Диссертационная работа написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку. Положения диссертации в достаточной степени аргументированы.

**Соответствие п.11, 12, 13.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Количество публикаций соответствует установленным требованиям.

**Соответствие п.14.** Диссертация соответствует требованиям в отношении ссылок на авторов и источники заимствований материалов или отдельных результатов.

**13. Общее заключение по диссертации**

Диссертационная работа Газизовой Ольги Викторовны «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутризаводского электроснабжения металлургического предприятия» на соискание ученой степени доктора технических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой на базе исследований, выполненных автором, разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Сформулирована новая концепция и научно-технические решения в области управления и планирования эксплуатационных режимов систем внутризаводского электроснабжения металлургических предприятий с собственными электростанциями, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны.

Работа выполнена самостоятельно, обладает внутренним единством, актуальность, научная новизна, практическая значимость соответствуют требованиям, предъявляемым к

диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, изложенным в п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Газизова Ольга Викторовна, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Диссертация соискателя Газизовой Ольги Викторовны обсуждена, а отзыв на нее утвержден на заседании кафедры Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», протокол № 1 от «12» февраля 2026 г.

Заведующий кафедрой

Электроснабжения промышленных

предприятий и электротехнологий

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,

канд. техн. наук, доцент



Михеев Дмитрий Владимирович

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)**

Адрес: 111250, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

Телефон/факс: 8 (495) 362-75-60; 8 (495) 362-89-38

Эл. почта: [universe@mpei.ac.ru](mailto:universe@mpei.ac.ru); Сайт: <http://www.mpei.ru>

**Михеев Дмитрий Владимирович**, заведующий кафедрой Электроснабжения промышленных предприятий и электротехнологий ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ», кандидат технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы», доцент

Адрес: 111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 17, стр. 8, каф. ЭППЭ

Телефон/факс: 8 (495) 362-76-79, Эл. почта: [MikheevDV@mpei.ru](mailto:MikheevDV@mpei.ru)