

## ОТЗЫВ

официального оппонента Паздерина Андрея Владимировича на диссертационную работу Газизовой Ольги Викторовны «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутривзаводского электроснабжения металлургического предприятия», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.2. «Электротехнические комплексы и системы»

### Актуальность темы диссертационной работы

Расширение собственных источников генерации металлургическими предприятиями в совокупности с ростом мощности питающихся с их шин электроприемников формирует сложные многомашинные электротехнические системы, требующие повышенной устойчивости и надежности. Усложнение структуры заводских электростанций в сочетании с необходимостью выработки не только электрической, но и тепловой энергии, делают совершенствование принципов управления эксплуатационными режимами важным направлением. Несмотря на внедрение современных систем возбуждения, алгоритмы их автоматического регулирования до сих пор базируются на принципах, характерных для генераторов районных электростанций, что снижает эффективность управления режимами. Разработка способов и принципов управления системами регулирования возбуждения и частоты вращения, адаптированных к условиям функционирования генераторов заводских электростанций, может значительно повысить их статическую и динамическую устойчивость в различных эксплуатационных условиях. Это увеличивает вероятность сохранения синхронизма при провалах напряжения в сложной разветвленной сети генераторного напряжения, содержащей токоограничивающие реакторы, и успешных выходов на раздельную работу с тепловой нагрузкой, обеспечивая надежность электроснабжения промышленных потребителей. Современные микропроцессоры, методы обработки данных и комплексы имитационного моделирования позволяют реализовать сложные вычисления в реальном времени, что делает переход на новые алгоритмы технически выполнимым. Это соответствует трендам интеллектуализации энергосистем, в том числе заводских электростанций. Таким образом, исследование актуально, так как предлагает решение современной проблемы промышленной электроэнергетики – адаптацию неэффективных алгоритмов управления режимами в системах внутривзаводского электроснабжения со сложными схемно-режимными условиями работы за счет использования современных цифровых технологий, что повысит надежность и устойчивость промышленной генерации.

### Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и семи приложений.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»	
за №	_____
Дата регистрации	24.03.2026
Фамилия регистратора	_____

**Во введении** обоснована актуальность темы и степень проработанности проблемы исследования, дана характеристика объекта и предмета исследования, сформулирована цель и представлены задачи диссертационной работы, указаны методики исследования, описаны новизна, теоретическая значимость и практическая ценность исследования, показана реализация результатов работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, кратко изложены факты апробации работы и приведена структура диссертации.

**В главе 1** выполнен анализ особенностей функционирования современных систем электроснабжения промышленных предприятий, акцентируя внимание на заводских электростанциях (ЗЭС), имеющих тепловую нагрузку, и связанных с ними проблемах и тенденциях. Исследование коэффициентов запаса статической устойчивости на действующих генераторах ЗЭС выявило, что машины могут длительное время работать при показателях, соответствующих утяжеленным режимам. Рассматриваются современные подходы к управлению эксплуатационными режимами промышленных объектов распределенной генерации (РГ), включая автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ), а также особенности работы делительной автоматики. Подчеркивается необходимость адаптации существующих принципов действия АРВ и АРЧВ к новым условиям работы, связанным с расширением источников РГ, и предлагаются концепции для улучшения их эффективности. Описываются перспективы применения усовершенствованных способов управления режимами ЗЭС для повышения надежности и устойчивости внутривозводского электроснабжения с учетом специфики работы промышленных потребителей.

**Глава 2** посвящена разработке, анализу и развитию методик расчета параметров и исследования статической устойчивости ЗЭС с учетом особенностей ВЗЭС и наличия тепловой нагрузки при совместной и отдельной работе с энергосистемой (ЭС). На основе метода последовательного эквивалентирования разработаны методики расчета установившихся режимов совместной и отдельной работы ЗЭС с ЭС, учитывающие специфичную электрическую и тепловую нагрузку, а также особенности функционирования АРВ и АРЧВ. Выполнен анализ состава индивидуальных электроприемников металлургического предприятия полного цикла, осуществлено математическое моделирование индивидуальных потребителей, а также получена методика расчета статических характеристик комплексной нагрузки в узлах, содержащих РГ. На основе полученных методик расчета установившихся режимов разработаны методики анализа статической устойчивости источников РГ и нагрузки в условиях ВЗЭС с учетом тепловой нагрузки и специфичных потребителей.

**В главе 3** исследовано влияние параметров систем АРВ и АРЧВ на статическую устойчивость генераторов ЗЭС при параллельной и отдельной работе с ЭС. Выполнено описание объекта исследования, в качестве которого рассмотрены центральная и паровоздуховная электростанции ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»), соединенные по шинам генераторного напряжения, имеющие сложную конфигурацию

электрической сети и большое число секционных и линейных реакторов. Приведены характеристики потребителей, получающих питание на генераторном напряжении, осуществлен анализ регулирующего эффекта отдельных электроприемников, цеховой нагрузки, а также получены комплексные статические характеристики с учетом объектов РГ на примере распределительного устройства собственных нужд. Показано, что используемые нагрузочные диаграммы мощности заводских генераторов не учитывают отклонение напряжения со стороны энергосистемы, что вносит существенную погрешность при выборе минимальной реактивной мощности РГ с учетом статической устойчивости машин. Исследовано влияние эксплуатационных показателей на запас устойчивости РГ в островном режиме. Показано, что величины уставок АРВ, регулирующий эффект нагрузки и коэффициенты статизма регуляторов не существенно влияют на предел передаваемой мощности, тогда как в условиях значительной индуктивности распределительной сети влияние оказывает точка включения нагрузки.

В главе 4 исследованы вопросы математического моделирования машин переменного тока при анализе динамической устойчивости в условиях систем ВЗЭС, имеющих РГ. Показано, что при анализе переходных электромеханических процессов с учетом законов АРВ и АРЧВ использованы точные математические модели в среде MATLAB. Для многомашинной системы необходимо эквивалентирование синхронных генераторов и двигателей переменного тока. В работе приведены критерии, при которых допускается эквивалентирование в условиях ЗЭС и электрически близко расположенных генераторов и нагрузки. Показано, что эквивалентирование синхронных и асинхронных двигателей требует более тщательного учета коэффициента загрузки по активной мощности, так как его значение во многом является определяющим. С целью оценки взаимного влияния машин при исследовании динамической устойчивости при выходе в островной режим применены упрощенные математические модели, реализованные в программном комплексе «КАТРАН».

Глава 5 диссертации, посвящена разработке индивидуальных и групповых систем АРВ для повышения статической устойчивости генераторов ЗЭС, распределению функций турбогенераторов по теплу и электроэнергии, а также совершенствованию способов групповой ресинхронизации в условиях ВЗЭС. Отмечена возможность его использования как при параллельной работе с энергосистемой, так и выходе в островной режим. Предложен принцип группового регулирования возбуждения синхронных генераторов ЗЭС при совместной работе с ЭС. Разработан принцип группового АРВ в островном режиме с учетом каналов стабилизации по углу ротора, поддержания заданного напряжения на шинах связи с энергосистемой и возможностью последующей ресинхронизации. Разработана методика распределения функций поддержания давления в общем коллекторе пара между блоками паровая турбина - синхронный генератор. Сформулированы принципы групповой ресинхронизации заводской ТЭЦ с электрической и тепловой нагрузкой с энергосистемой.

**Глава 6** посвящена исследованию эффективности разработанных способа, принципов, методик и алгоритмов с помощью вычислительного эксперимента. Оценена адекватность математических моделей ЗЭС, разработанных в программном комплексе «КАТРАН» и среде MATLAB путем сопоставления результатов расчета и данных, полученных в процессе реальной аварийной ситуации, сопровождающейся выходом ЗЭС на отдельную работу и последующим нарушением устойчивости. Определена эффективность разработанного способа индивидуального АРВ в условиях многомашинной системы с использованием каналов стабилизации и применением сформулированных принципов эквивалентирования, которая показала положительный результат. Оценена эффективность разработанного способа группового АРВ при выходе в островной режим с учетом использования каналов стабилизации по углам роторов. Проведен вычислительный эксперимент групповой ресинхронизации многомашинной ЗЭС сложной конфигурации с энергосистемой. Рассмотрено влияние АРЧВ на статическую устойчивость в автономном режиме с использованием разработанной методики распределения функций поддержания давления между паровыми турбинами и сделан вывод о повышении запаса устойчивости при ее использовании. Показана аппаратно-программная реализация устройств АРВ на объекте исследования. Выполнен анализ динамической устойчивости двигателей собственных нужд при выходе в островной режим с различными небалансами активной и реактивной мощности. Разработаны мероприятия по обеспечению устойчивости при параллельной работе с энергосистемой с учетом экономических показателей и рассчитан экономический эффект от них.

**В заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

**Приложения** содержат акты внедрения результатов исследований, патенты на изобретения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, фактические графики изменения параметров режима действующей ЗЭС и их показатели устойчивости, результаты анализа статической устойчивости генераторов и двигателей собственных нужд, анализ коэффициента запаса статической устойчивости в островном режиме с учетом разработанной методики перераспределения функций поддержания давления в паровом коллекторе, а также результирующей устойчивости ЗЭС при провалах напряжения и выходе в островной режим.

### **Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Представленные в диссертационной работе исследования выполнены на высоком научном уровне с указанием исходных положений и предположений, методов исследования, возможных ограничений. Исследования выполнены с использованием технических характеристик оборудования действующей ЗЭС. Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждена детальным анализом существующих систем АРВ и АРЧВ, результатами их сравнения с иными техническими решениями отечественных и зарубежных

авторов. Результаты вычислительного эксперимента, проведенного с помощью программ собственной разработки автора, подтверждены данными аварийных режимов, полученных с объекта. Обоснованность полученных результатов также подтверждается правомерностью принятых исходных положений и предпосылок, корректным применением положений теории статической и результирующей устойчивости, теории автоматического управления и методов математического моделирования, результатами вычислительных экспериментов, переданных к внедрению на собственную электростанцию ЦЭС ПАО «ММК».

### **Научная новизна положений, выводов и рекомендаций**

К наиболее существенным новым положениям, выводам и рекомендациям можно отнести следующие:

1. Усовершенствованная методика построения комплексных статических характеристик нагрузки ВЗЭС, учитывающая величину критического и защиту минимального напряжения двигательной нагрузки, параметры специфичных электроприемников, передающих сетей и объектов распределенной генерации.

2. 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.

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

4. 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.

5. 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.

6. Принцип групповой ресинхронизации промышленной многомашинной тепловой электростанции (ТЭС) с энергосистемой с выбором ведущего агрегата для регулирования частоты и групповым регулированием возбуждения для коррекции напряжения.

7. Методика выбора блоков паровая турбина - синхронный генератор, работающих в нормальном режиме на постоянство давления в паропроводе, разработанная на основе сформулированной концепции взаимосвязанного

распределения тепловых и электрических нагрузок для сохранения устойчивости при выходе в островной режим, учитывающая выбор генератора для групповой ресинхронизации, а также дифференциальную защиту шин.

8. Результаты исследований и промышленного внедрения разработанных способа, принципов, методик, алгоритма и концепции, подтвердивших технико-экономическую эффективность за счет снижения ущерба от аварийных простоев и энергосбережения.

### **Практическая значимость диссертации**

Практическая ценность работы состоит в создании технических предпосылок для повышения запаса статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС в результате разработки математических моделей источников распределенной генерации и специфичной промышленной нагрузки, принципов и систем управления АРВ и АРЧВ синхронных генераторов.

1. Разработаны и переданы для внедрения на ПАО «ММК» для технической реализации предлагаемых способов и систем управления: программный комплекс «КАТРАН», предназначенный для расчета нормальных и островных установившихся режимов и анализа устойчивости ЗЭС со специфичной нагрузкой; патенты на изобретение, в основу которых положен способ индивидуального АРВ с учетом каналов стабилизации по углу ротора при параллельной и раздельной работе с ЭС большой мощности; методика распределения электрической и тепловой нагрузки между блоками турбина - генератор, учитывающая групповую ресинхронизацию и действие дифференциальной защиты шин.

2. Доказано, что внедрение разработанных технических решений повышает устойчивость генераторов и нагрузки промышленных ТЭС в нормальном и островном режимах.

3. Разработанные технические решения, имеющие высокую эффективность при простоте реализации, рекомендуются для внедрения на промышленных ТЭС, работающих по электрическому и тепловому графикам.

Внедрение разработанных технических решений в промышленную генерацию расширяет возможности действующих электростанций, обеспечивает энерго- и ресурсосбережение за счет повышения устойчивости, возможности увеличения вырабатываемой активной мощности ЗЭС, снижения ущерба от недоотпуска электроэнергии и простоев цехов.

### **Соответствие диссертации области исследования научной специальности**

Научные положения диссертационной работы соответствуют направлениям исследований научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы – по 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 – гл. 1, математические модели электрических нагрузок промышленного предприятия – гл. 2, разработанные математические модели генерирующего оборудования заводской электростанции с учетом систем регулирования возбуждения и скорости – гл. 5 );

- п. 2. «Разработка научных основ ... эксплуатации электротехнических комплексов, систем ...» (концепция взаимосвязанного распределения тепловых и электрических нагрузок для сохранения устойчивости при выходе в островной режим – гл. 5);

- п. 3. «Разработка... алгоритмов эффективного управления» (разработка способа индивидуального управления системой регулирования возбуждения генераторов заводской электростанции – гл. 5, разработка принципа группового управления системой регулирования возбуждения генераторов заводской электростанции – гл. 5, разработка принципа групповой ресинхронизации заводской электростанции с энергосистемой – гл. 5);

- 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 – гл. 2, 3, анализ динамической и результирующей устойчивости генераторов при провалах напряжения в сети и выходе на раздельную работу – гл. 4, 6).

По тематике диссертационной работы опубликовано не менее 64 работ, в том числе четыре монографии, 3 патента на изобретения, 5 свидетельств на программы для ЭВМ. В журналах, входящих в перечень ВАК РФ, опубликовано 35 научных статей. В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования (Scopus) опубликовано не менее 17 научных работ. Материалы докладывались на многочисленных международных и всероссийских научно-практических конференциях.

### **Вопросы и замечания по диссертации**

1. Название работы звучит как «Повышение устойчивости ...» однако в работе рассматриваются не все способы повышения устойчивости многомашинных систем. Отсутствует анализ и предложения по некоторым техническим мерам повышения устойчивости, связанным с установкой устройств компенсации 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, так как выполнялась для конкретного заказчика - Магнитогорского металлургического комбината на основе конкретных данных данного предприятия. В этом ее и положительная и одновременно отрицательная сторона. Генерация новых и современных

промышленных предприятий в основном строится на основе газопоршневых, реже газотурбинных установок. Хотя во введении и Главе 1 упомянуты газопоршневые и газотурбинные установки, в дальнейшем в работе рассматривается только паросиловое оборудование. Общеизвестно, что современные виды генерации за счет меньших постоянных времени, с одной стороны, более склонны к потере устойчивости, но с другой, предоставляют большие возможности для регулирования. Также данные виды генерации обладают принципиально иной связью тепла и электричества. Указанные виды промышленной генерации требуют иных технических решений, но в работе не рассмотрены, 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: Метод Ньютона позволяет математически строго подойти к границе существования режима (точке сингулярности). Метод последовательного эквивалентирования из-за методических упрощений накапливает ошибку именно в тяжелых режимах, выдавая результат с большой погрешностью. 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 эквиваленту может зависеть предел по устойчивости. В диссертации отсутствует такой анализ.

5. В многомашинных системах предприятия возможно нарушение периодической устойчивости (или возникновение самокачаний), которое чаще всего связано с тем, что система переходит в режим с отрицательным демпфированием по ряду причин (взаимное влияние двигателей, агрессивная настройка АРВ, слабые связи с энергосистемой, резонансные явления, связанные с режимами потребления). 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 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 применен в различных эксплуатационных режимах и как это отразится на показателях устойчивости.

### Заключение

Диссертационная работа «Повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем внутриводского электроснабжения металлургического предприятия» является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертация представляет собой оригинальный труд, обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и описывает значительный объём их использования, а также перспективы внедрения. Основные научные и практические результаты в достаточной мере освещены в публикациях автора. Перечисленные замечания не снижают ценность работы, а указывают на возможное продолжение исследований или носят рекомендательный характер. Таким образом, работа удовлетворяет пунктам 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, 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, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные электрические системы», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»



Паздерин Андрей Владимирович

«16» марта 2026г.

Электронная почта: a.v.pazderin@urfu.ru  
Телефон: +7 (343) 375-48-75.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, Э-309

Электронная почта: contact@urfu.ru

Телефон: 8-800-100-50-44

Подпись заверяю /

УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
УРФУ  
МОРОЗОВА В.А.


