

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук,
профессора Куликова Александра Леонидовича
на диссертацию 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

Актуальность темы диссертации

В современных условиях функционирования крупных металлургических предприятий одной из тенденций является увеличение собственных генерирующих мощностей с целью снижения себестоимости продукции за счет использования вторичных энергоресурсов. Для питания энергоемких цехов с резкопеременной нагрузкой на генераторном напряжении остается приоритетным использование паротурбинных установок, имеющих существенную инерцию, в качестве основных первичных двигателей. В результате структура заводских электростанций (ЗЭС) существенно усложняется и растет количество возможных эксплуатационных режимов работы, создающих специфичные условия для функционирования автоматических регуляторов возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) и повышающих требования к ним. В частности, большое число токоограничивающих реакторов в условиях разветвленной сети приводит к росту числа провалов напряжения, а наличие распределительных устройств генераторного напряжения в случае действия дифференциальной защиты шин делает неизбежным выход ЗЭС на раздельную работу. Зачастую подобные ситуации ведут к нарушению устойчивости генераторов, сопровождающимся недоотпуском электроэнергии и простоями цехов, то есть существенным ущербом. В то же время, существующие законы регулирования возбуждения и скорости турбогенераторов разработаны применительно к машинам районных электростанций, не имеющих тепловой нагрузки, и в малой степени учитывают особенности внутризаводского электроснабжения (ВЗЭС). Все перечисленные факторы свидетельствуют о необходимости совершенствования принципов и способов управления эксплуатационными, в том числе аварийными, режимами промышленных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ). Поэтому считаю, что диссертация Газизовой О.В., посвященная разработке данных вопросов, является актуальной и практически значимой.

ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова»	
за №	_____
Дата регистрации	23.03.2026
Фамилия регистратора	_____

Научная новизна положений и значимость теоретических результатов

Автором проведен глубокий всесторонний анализ вопросов управления эксплуатационными режимами тепловых электростанций (ТЭС) в условиях ВЗЭС и выполнена оценка эффективности действия систем АРВ и АРЧВ в них. Это позволило сформулировать требования к данным видам автоматики ЗЭС и адаптировать существующие законы регулирования к возможным режимам работы промышленных электростанций.

В диссертации получены результаты, имеющие научную новизну; наиболее значимыми являются 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 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.

На основе полученных теоретических результатов работы сформирован законченный комплекс научно обоснованных методов, методик, алгоритмов, способов и принципов расчета устойчивости и противоаварийного управления эксплуатационными режимами синхронными генераторами ЗЭС.

Практическая значимость диссертации заключается в создании технических предпосылок для повышения запаса статической, динамической и результирующей устойчивости ЗЭС. Внедрение разработанных технических решений обеспечивает энерго- и ресурсосбережение за счет повышения устойчивости, возможности увеличения вырабатываемой активной мощности ЗЭС при совместной работе с энергосистемой (ЭС) и снижения ущерба от недоотпуска электроэнергии и простоев при выходе на отдельную работу. Разработанные методики определения комплексных статических характеристик промышленной нагрузки, расчета и анализа статической устойчивости установившихся режимов, положенные в основу программного комплекса «КАТРАН», способ индивидуального АРВ генераторов ЗЭС в составе патента, методика распределения электрической и тепловой нагрузки между блоками паровая турбина - синхронный генератор для сохранения устойчивости в нормальном и островном режимах переданы для внедрения на ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ПАО «ММК»). Использование данных разработок на электростанциях способствует повышению статической устойчивости генераторов при параллельной работе с энергосистемой (ЭС) большой мощности и автономной работе, а также результирующей устойчивости при провалах напряжения со стороны питающей сети. В результате внедрения разработанных технических решений в промышленную эксплуатацию ЦЭС ПАО «ММК» получен суммарный экономический эффект, составляющий более 10 млн. руб./год. Использование результатов исследований расширяет возможности действующих и вновь создаваемых ТЭЦ, обеспечивает повышение экономической эффективности за счет энерго- и

ресурсосбережения, способствует повышению конкурентоспособности продукции отечественных металлургических предприятий.

Степень достоверности результатов исследования

Достоверность научных исследований подтверждается 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».

Оценка содержания диссертации и ее завершенности

Диссертация Газизовой О.В. изложена логически последовательно с обоснованием всех теоретических положений проведенными экспериментами и расчетами. Диссертационная работа включает 347 страниц основного машинописного текста и содержит введение, 6 глав, заключение, список литературы из 364 наименований, 112 рисунков, 36 таблиц и 7 приложений объемом 78 страниц.

Во введении рассмотрена актуальность проблемы и степень ее разработанности, цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сведения о реализации результатов и апробации работы, приведен перечень основных публикаций.

В первой главе исследованы особенности управления эксплуатационными режимами ЗЭС, подключенной к ЭС большой мощности и питающей ответственную специфичную электрическую и тепловую нагрузки. Выполнен анализ показателей статической устойчивости синхронных генераторов и исследована статистика аварийных ситуаций на ЗЭС с 2003 по 2022 гг, которая показала необходимость совершенствования принципов управления режимами выбранного объекта. Автором были проанализированы труды зарубежных и отечественных ученых, включая новейшие исследования. Произведен анализ публикаций, посвященных вопросам управления режимами промышленных ТЭЦ, который показал недостаточную проработанность вопроса. Выявлено, что современные системы АРВ и АРЧВ, а также устройства делительной автоматики в основном ориентированы на генераторы мощных электростанций и требуют адаптации к условиям ВЗЭС. Также показано, что совершенствование законов управления режимами требует учета статической,

динамической и результирующей устойчивости промышленных источников и нагрузки при совместной работе с ЭС и в островном режиме.

Во второй главе автор приводит разработанные методики расчета установившихся режимов промышленной ТЭЦ на основе модифицированного метода последовательного эквивалентирования. Получены математические модели основных характерных электроприемников металлургического предприятия, которые используются в расчетах установившихся режимов и позволяют рассчитать регулирующий эффект. Разработана методика определения статических характеристик комплексной нагрузки с учетом параметров распределительной сети и наличия объектов распределенной генерации. Разработаны методики анализа статической устойчивости промышленных генераторов и нагрузки при параллельной и раздельной работе с энергосистемой, учитывающие действие АРВ и АРЧВ с учетом питания тепловой нагрузки с поперечными связями по пару.

В третьей главе автором представлены основные параметры объекта исследования – промышленной теплоэлектроцентрали с учетом характеристик систем АРВ и АРЧВ, специфичной электрической и тепловой нагрузки, а также условий связи с энергосистемой большой мощности. Определен регулирующий эффект индивидуальных промышленных потребителей и комплексной нагрузки, питающейся от источников распределенной генерации. Произведена оценка статической устойчивости генераторов и двигателей собственных нужд при действительных эксплуатационных параметрах. Выявлены факторы, влияющие на запас статической устойчивости в нормальном и островном режимах. Представлены рекомендации по повышению устойчивости ЗЭС.

В четвертой главе раскрываются математические модели и методы расчета переходных электромеханических процессов в многомашинной системе в различных эксплуатационных режимах с учетом действия систем автоматического регулирования генераторов. С целью оценки эффективности разработанных систем АРВ и АРЧВ использовано точное математическое моделирование машин переменного тока в среде MATLAB. Сформулированы требования к допустимости эквивалентирования генераторов, синхронных и асинхронных двигателей. Для расчета электромеханических процессов в многомашинной системе с целью оценки взаимного влияния машин использовано приближенное математическое моделирование в сочетании с численным интегрированием уравнения движения ротора, реализованное в программном комплексе «КАТРАН».

В пятой главе рассмотрены основные вопросы и проблемы функционирования систем регулирования возбуждения и скорости в условиях внутривозовского электроснабжения (ВЗЭС). Сформулированы требования к

системам индивидуального и группового регулирования возбуждения. Разработан способ индивидуального АРВ с учетом каналов стабилизации, повышающий статическую и динамическую устойчивость генераторов ЗЭС. Сформулированы и обоснованы принципы группового регулирования возбуждения при параллельной работе с ЭС и выходе в островной режим. Представлена методика выбора блоков турбина-генератор, работающих на поддержание давления в паропроводе и сформулирован принцип групповой ресинхронизации.

В шестой главе приведены результаты вычислительных экспериментов с учетом разработанных способов, принципов и методик. Представлены математические модели исследуемой ЗЭС в среде MATLAB с учетом полученных ранее принципов эквивалентирования генераторов, а также в программе «КАТРАН». Сравнение результатов вычислительного эксперимента применительно к смоделированной аварийной ситуации выхода в островной режим подтвердило правильность расчетов. С помощью вычислительного эксперимента подтверждена эффективность разработанных способов, принципов и методик. Оценена экономическая эффективность предложенных мероприятий по противоаварийному управлению эксплуатационными режимами.

В заключении сформулированы выводы, которые соответствуют целям и задачам, поставленным в работе.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация Газизовой О.В. соответствует паспорту научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы 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.

П.2. Разработка научных основ эксплуатации электротехнических комплексов, систем.

П.3. Разработка алгоритмов эффективного управления.

П.4. Исследование качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Публикации

Основные результаты диссертации обсуждены на международных и всероссийских научно-технических конференциях и семинарах. Материалы диссертации опубликованы в 64 работах, в том числе 35 статьях в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы, 17 в изданиях, индексируемых Scopus; издано 4 монографии, получено 3 патента на изобретения, 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

Качество оформления диссертации

Оформление диссертационной работы соответствует всем требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования России, предъявляемым к докторским диссертациям. Текст работы написан с использованием общепринятой научной и технической терминологии, логически построен. Содержание автореферата полностью коррелирует с содержанием диссертации.

На обсуждение предлагается вынести следующие основные замечания и вопросы по диссертационной работе

1. На стр. 24 диссертации, рис. 1.7 (стр. 14 автореферата, рис. 2) приведены причины аварийных ситуаций на заводской электростанции (ЗЭС) за период с 2003 по 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 предложены методы и методики управления, направленные на повышение устойчивости многомашинных электротехнических систем и связанные преимущественно с проведением организационно-технических мероприятий, а также с моделированием и разработкой специального программного обеспечения.

Однако, целесообразно было бы рассмотреть вопросы реконструкции систем внутриводского 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. В пятой главе для повышения эффективности управления аварийным выходом в островной режим и последующей ресинхронизацией промышленной ТЭС с электроэнергетической системой разработан принцип группового АРВ, в основу которого положено выравнивание углов роторов генераторов с учетом

поддержания заданного напряжения. Это обеспечивает равные условия устойчивости для параллельно работающих источников.

Однако, если поддерживаются одинаковые углы роторов генераторов, и они работают при одинаковых коэффициентах статической устойчивости, то это может:

- отрицательно сказаться на экономии топлива разнородных генераторов,
- ухудшить перетоки мощности по связям и повысит потери электроэнергии в сети в целом,
- понизить резерв, регулировочную способность ведущих генераторов,
- ухудшить динамическую устойчивость некоторых генераторов при электрически близких возмущениях.

Оценивались ли эти последствия? Ведь режим именно одинаковой загрузки генераторов, одинаковости их $K_{уст}$ не может быть самостоятельной целью и не имеет ценности в отрыве от прочих критериев эффективности электроэнергетических систем.

4. Из текста автореферата и диссертации не понятно, исследовалось ли влияние неточности измерений параметров токов и напряжений и режима системы внутриводского электроснабжения металлургического предприятия на эффективность управления в аварийных режимах и обеспечение динамической устойчивости?

5. В главе шесть стр. 261 диссертации, рис. 6.1 (стр. 30 автореферата, рис. 24) 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 внутриводского электроснабжения, том числе включающие двигательную нагрузку, насколько оправдано использование в модели статическое представление нагрузки?

Системы электроснабжения промышленных потребителей функционируют не только в условиях провалов напряжения, но и при отклонениях и других показателях качества электроэнергии от нормативных значений, в том числе при несинусоидальности токов и напряжений.

Каким образом такие отклонения влияют на устойчивость многомашинных электротехнических систем внутриводского электроснабжения?

6. На стр. 31 автореферата указано, что «оценка эффективности разработанных мероприятий по повышению динамической и результирующей устойчивости выявила, что длительность переходных процессов в

послеаварийных режимов снижается более чем на 38 %, а предельное время отключения КЗ возрастает до 40 %».

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

7. По мнению оппонента, следует пояснить 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?

8. Замечания редакционного характера, связанные с расстановкой знаков препинания, наличием опечаток, и др., в том числе неудачные обороты, например:

– для коротких сетей многомашинных промышленных систем подходит анализ коэффициента запаса по напряжению $k_{зан}$ (стр. 16 автореферата);

– смоделирован выход в островной режим, в течение которого регулятор давления «передавил» регулятор скорости (стр. 273 диссертации, стр. 30 автореферата);

и другие.

Заключение по диссертационной работе

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Газизовой О.В., которая представляет в целом законченную научно-квалификационную работу, отражающую результаты многолетних исследований автора по разработке новых принципов, способов и методик противоаварийного управления системами внутриводского электроснабжения с собственной генерацией. Автореферат в должной степени соответствует содержанию диссертации.

Тема диссертации тесно связана с работами, выполненными автором в рамках ведомственной научной программы и государственного контракта, а также научно-исследовательских хоздоговорных работ. Диссертация прошла апробацию на многих международных и российских конференциях. Количество публикаций соответствует требованиям ВАК на соискание ученой степени доктора технических наук.

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

На основании изложенного считаю, что представленную диссертационную работу по уровню научной новизны, значимости теоретических и практических результатов, разработанных и внедренных

автором, можно квалифицировать как решение крупной научной задачи, имеющей важное хозяйственное значение.

Диссертация Газизовой О.В. полностью отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Автор диссертации 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 кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника», ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»
профессор



Куликов Александр Леонидович

«10» марта 2026 г.

Контактные данные: 603074, г. Нижний Новгород, Сормовское шоссе, д. 12, кв. 19,
Тел. +7 (910) 791-26-56. E-mail: inventor61@mail.ru

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева»

Адрес организации: 603155, г. Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.

Телефон: (831) 436-23-25. Факс: (831) 436-23-25.

E-mail: nntu@nntu.ru.

*Ученый секретарь
Ученого совета НН*



Ц.Н. Мерзляков