

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

На правах рукописи



Полякова Ольга Юрьевна

**РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ДЕФИЦИТНОГО
ЭНЕРГОРАЙОНА С ПГУ НА ИЗОЛИРОВАННУЮ РАБОТУ**

05.14.02 – Электрические станции
и электроэнергетические системы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Екатеринбург – 2020

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированные электрические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Паздерин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:

Кавалеров Борис Владимирович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, заведующий кафедрой «Электротехника и электромеханика»;

Сацук Евгений Иванович, доктор технических наук, доцент, Акционерное общество «Системный оператор Единой энергетической системы», г. Москва, начальник службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики;

Комаров Олег Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», г. Екатеринбург, доцент кафедры «Турбины и двигатели»

Защита состоится 24 ноября 2020 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 05.02.03 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=1610>.

Автореферат разослан « » октября 2020 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Самойленко Владислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Частота напряжения электропитания является одним из важнейших показателей качества электрической энергии. При отклонении частоты от номинального значения все системы регулирования частоты действуют на восстановление баланса мощности между нагрузкой и генерацией. Первичный резерв реализуется одним из первых при возникновении небаланса мощности, тем самым препятствуя развитию аварии. Первичное регулирование осуществляется с помощью корректоров частоты энергоблоков.

В связи с высокой степенью важности регулирования частоты АО «Системный оператор Единой энергетической системы (ЕЭС)» предъявляет жесткие требования к генерирующему оборудованию, участвующему в первичном регулировании частоты. Для проверки этих требований проводятся испытания генерирующего оборудования и определяется адекватность реакции на отклонение частоты. Но не всегда данные испытания могут выявить, как поведет себя установка в реальных условиях при достаточно больших отклонениях частоты. В связи с этим актуальной задачей является получение дополнительной информации о генерирующем оборудовании с целью определения его поведения в различных режимных условиях, особенно если это оборудование обеспечивает большую долю генерирующей мощности.

В настоящее время в энергосистеме России появляется большое количество новых генерирующих установок. Основные объемы вновь вводимого оборудования приходятся на парогазовые установки (ПГУ), газотурбинные установки (ГТУ) и различные установки на основе возобновляемых источников электроэнергии (ВИЭ). С каждым годом быстрыми темпами растет доля ПГУ в суммарной выработке электроэнергии в связи с их высокой эффективностью и стабильностью в отличие от установок на основе ВИЭ.

В связи с большим ростом объемов ПГУ появляется необходимость в тщательном исследовании условий эксплуатации данных установок. В основном ГТУ, работающие в составе ПГУ, изготовлены иностранными фирмами, и не всегда известно, как поведет себя установка при отклонении режима от нормального. Зарубежный опыт эксплуатации показал, что в аварийных ситуациях с глубоким снижением частоты системы регулирования ПГУ могут действовать не всегда корректно с точки зрения режима энергосистемы. В ряде случаев это связано с тем, что ГТУ обладают особенностями регулирования мощности, которые отличают их от паротурбинных установок (ПТУ).

В настоящее время распространены установки, где компрессор, турбина и генератор расположены на одном валу. Одной из основных особенностей таких установок является зависимость мощности ПГУ от частоты сети. В случае снижения частоты снижается подача воздуха в камеру сгорания, а значит снижается и мощность, которую может выдать установка. Если произошло глубокое снижение частоты, то установка может начать снижать мощность, и это приведет к еще большему увеличению дефицита. Аналогичная ситуация может случиться и при небольшом отклонении частоты, если установка работала на уровне близком к максимуму выдаваемой мощности.

Так как ЕЭС России является мощной и инерционной энергосистемой, то даже потеря крупных станций не приводит к глубокому снижению частоты. Однако в ходе развития аварии нередко происходит отделение какой-либо части энергосистемы от ЕЭС, вследствие чего и может произойти снижение частоты в выделившемся энергорайоне более чем на 1-2 Гц. Статистика свидетельствует, что за последние пять лет зафиксировано 145 случаев отделения энергорайонов на изолированную работу. Часть из них сопровождалась неправильной реакцией ПГУ на отклонение частоты.

Настоящая работа посвящена исследованию изменения частоты при отделении дефицитного энергорайона с ПГУ от ЕЭС и разработке мер для предотвращения лавинообразного развития аварии. В работе на основе математических моделей элементов энергосистемы рассмотрены различные схемно-режимные ситуации работы ПГУ на выделившийся дефицитный энергорайон. Предложен алгоритм форсировки мощности ПГУ, который позволяет в первые секунды аварии поддержать частоту в энергорайоне, тем самым, не допуская перегрева и снижения мощности ПГУ. Разработанный алгоритм выдачи сигнала форсировки мощности адаптируется под динамические характеристики энергосистемы. Кроме того, для предотвращения глубокого снижения мощности ПГУ рассматривается такая мера, как небольшое снижение напряжения в целях снижения величины нагрузки в соответствии со статическими характеристиками.

Степень научной разработанности темы исследования. Первыми вопросы реакции ПГУ на отклонение частоты начали поднимать зарубежные ученые. Наибольший вклад в исследование вопросов реакции ПГУ на отклонение частоты внесли такие ученые как В. Роуен, Л. Меегахаттола, Д. Флинн, П. Повербек, Д.Лэйлор. Также, крупные работы в этой части выполнялись научными группами таких организаций, как IEEE (Институт инженеров по электротехнике и радиоэлектронике) и CIGRE (Международный совет по большим электрическим системам).

В отечественной науке наиболее крупные работы, направленные на изучение динамики ПГУ и ГТУ, выполнены А.В. Давыдовым, Ю.А. Радиным, А.С. Александровым, П.И. Першиным, С.Р. Хуршудяном, А.С. Герасимовым, А.Н. Смирновым, О.В. Бахмисовым и другими исследователями.

Целью исследования является разработка мер по обеспечению поддержания частоты в выделившемся дефицитном энергорайоне с ПГУ.

Задачи исследования:

- Анализ изменения частоты и баланса мощности при отделении дефицитного энергорайона с генерацией типа ПГУ;
- Разработка алгоритма предотвращения лавинообразного снижения частоты за счет форсировки мощности ПГУ;
- Разработка схемы изменения уставки АРВ в целях снижения небаланса мощности при глубоких снижениях частоты в энергорайонах с ПГУ;
- Тестирование предложенных в работе мер для предотвращения глубокого снижения частоты при помощи вычислительных экспериментов в ПК MATLAB;

- Выбор необходимых пусковых факторов для реализации разработанных алгоритмов;
- Сравнение разработанных алгоритмов с существующими мерами, предназначенными для предотвращения глубокого снижения частоты в дефицитных энергорайонах с ПГУ;
- Анализ эффективности работы предложенных алгоритмов при выделении ПГУ на энергорайон в составе с ПТУ.

Объектом исследования являются энергорайоны с генерацией в виде ПГУ, подверженные риску выделения на изолированную работу с дефицитом мощности.

Научная новизна работы:

- Обоснована необходимость учета возможного действия регулятора температуры уходящих газов, препятствующего набору мощности, при проведении испытаний ПГУ на участие в регулировании частоты и при выборе объемов автоматической частотной разгрузки (АЧР);
- Предложена форсировка мощности ПГУ в качестве меры по предотвращению лавинообразного снижения частоты при выделении дефицитного энергорайона с ПГУ на изолированную работу;
- Разработан алгоритм форсировки мощности ПГУ при выделении дефицитного энергорайона с ПГУ на изолированную работу;
- Предложено применение алгоритма регулирования напряжения в выделившемся энергорайоне, имеющем генерацию в виде ПГУ, с целью снижения небаланса мощности.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке алгоритмов для снижения небаланса мощности и регулирования частоты в дефицитном энергорайоне с ПГУ. Данные алгоритмы позволяют не допустить лавинообразного развития аварии при выделении дефицитного энергорайона с ПГУ на изолированную работу и сократить объем нагрузки, отключаемой от АЧР.

Методы исследования. В ходе выполнения работы использовались методы теоретических основ электротехники; методы математического моделирования, параметрической оптимизации. Для расчетов использовались программные комплексы MathCAD, MATLAB Simulink, RastrWin.

Основные положения диссертационного исследования, выносимые на защиту:

1. Подходы к моделированию ПГУ для исследования процессов изменения частоты в энергосистеме.
2. Алгоритм форсировки мощности ПГУ при выделении установки в составе дефицитного энергорайона на изолированную работу.
3. Алгоритм регулирования напряжения при выделении ПГУ в составе дефицитного энергорайона на изолированную работу.

Личный вклад автора заключается в разработке и тестировании алгоритмов регулирования частоты при выделении ПГУ в составе дефицитного энергорайона на изолированную работу.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры «Автоматизированные электрические системы» УралЭНИН УрФУ, Екатеринбург, в период с 2015 года по 2019 год, а также на 8 конференциях, в том числе:

1. Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи» - Казань-2016, 2018, Самара-2017, Иркутск-2019;
2. Всероссийская конференция «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем России» - Чебоксары, 2017;
3. The 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering, ICITEE 2017, Phuket, Thailand, 2017;
4. 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), 2018, Riga, Latvia;
5. 2019 16-th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), Varna, Bulgaria, 2019.

Публикации. По результатам работы всего опубликовано 12 работ, в том числе в 6 изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографического списка из 110 наименований и 2 приложений. Содержит 122 страницы, 56 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность выполненного исследования, сформулированы цели, задачи и научная новизна работы, охарактеризована практическая ценность результатов исследования, выделены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа установленных генерирующих мощностей, свидетельствующие о широком распространении ПГУ в России и в мире. Кратко описана конструкция ПГУ. Более детально рассмотрены системы регулирования, влияющие на изменение мощности ПГУ при отклонении частоты. Представлены основные нормативные требования к участию ПГУ в регулировании частоты. Рассмотрены крупные аварийные ситуации, которые возникали в связи с некорректной работой ПГУ при отклонении частоты, приведен обзор литературы на тему проблемы снижения мощности ПГУ при снижении частоты. Также представлена информация об отделениях энергорайонов с ПГУ на изолированную работу в ЕЭС России, приведена статистика таких событий. Глава позволяет сформировать достаточно полную картину об актуальности исследования.

В настоящее время ввод новых генерирующих мощностей в основном осуществляется за счет ПГУ. Это связано с тем, что в отличие от установок на основе ВИЭ, они являются стабильными в выработке мощности, а в сравнении с ПТУ, являются более эффективными и экологичными. На сегодняшний день ПГУ имеют коэффициент полезного действия (КПД) порядка 60%. Есть

перспективы получить КПД 65% и даже выше. В случае с ПГУ при решении существующих научных проблем наиболее реальным представляется получение КПД не более 46 – 49%, что значительно ниже, чем у ПГУ. Все эти преимущества привели к тому, что на текущий момент установленная мощность ПГУ в России составляет более 26 ГВт и продолжает расти. Такой значительный объем установленной мощности говорит о том, что влияние поведения этих установок на работу энергосистемы становится существенным и требует особого внимания.

В Европе данные установки начали распространяться несколько раньше, чем в России, кроме того, сейчас в ЕЭС России преимущественно устанавливаются ГТУ иностранного производства. Все это побуждает обратиться к зарубежному опыту при изучении вопросов эксплуатации ПГУ. Особенно широко в зарубежной литературе рассматривается реакция ПГУ на отклонения частоты. Чтобы раскрыть эту тему, необходимо, в первую очередь, обратиться к особенностям конструкции ПГУ.

Принципиальная схема ПГУ показана на рисунке 1.

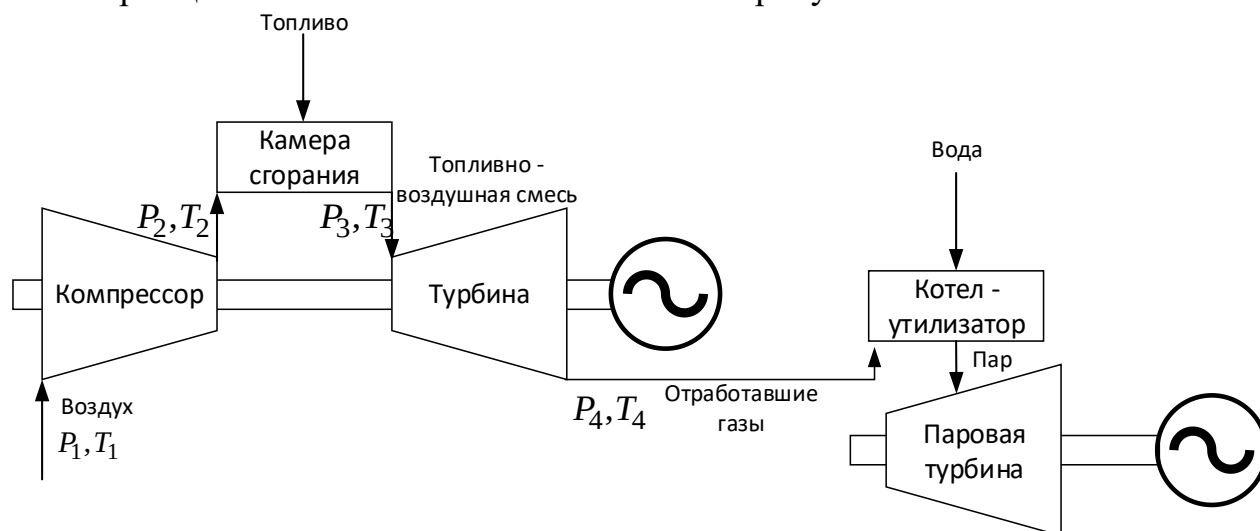


Рисунок 1 – Принципиальная схема ПГУ

Упрощенно цикл ПГУ выглядит следующим образом: воздух поступает в компрессор, где сжимается, проходя через венцы подвижных и неподвижных лопаток. В камере сгорания воздух смешивается с топливом, в результате чего происходит процесс горения. Горячие газы, образующийся в результате процесса горения, входят в газовую турбину. Далее они расширяются в турбине, а она, в свою очередь, вращает генератор и компрессор. Затем отработавшие газы уходят в котел-утилизатор, где нагревают воду и превращают ее в пар, который вращает паровую турбину.

Наибольшую температуру газы имеют на входе в турбину (T_3 на рисунке 1). Данную температуру необходимо поддерживать на определенном уровне по условию наибольшей эффективности работы котла-утилизатора. С этой целью устанавливается регулятор температуры и регулятор положения лопаток входного направляющего аппарата (ВНА). Так как температура на входе в турбину очень высокая и ее сложно измерить, для работы регуляторов используют значение температуры на выходе из турбины T_4 .

Температура в камере сгорания зависит от соотношения подачи воздуха и топлива. Важной особенностью является то, что отклонение частоты приводит к изменению скорости вращения компрессора и, как следствие, к изменению объема подачи воздуха на турбину. Увеличение частоты может привести к срыву пламени, а снижение частоты приводит к повышению температуры уходящих газов. Причем указанные явления более характерны для ПГУ, чем для отдельно работающих ГТУ, так как для ПГУ важно исключить работу котла-утилизатора на плавающих параметрах.

Если в ПГУ отсутствует дополнительное дожигание топлива в котле-утилизаторе, то при снижении частоты регулирование производится преимущественно газовой турбиной. Выдаваемая мощность паровой турбины напрямую зависит от мощности газовой турбины. После изменения загрузки газовой турбины загрузка паровой турбины изменяется автоматически и выходит на необходимую величину только через несколько минут, в связи с большим временем реакции котла-утилизатора.

Когда ПГУ работает в составе крупной энергосистемы, как правило проблем не возникает, так как довольно большие резервы мощности не позволяют значительно отклониться частоте. Но если случается отделение энергорайона вследствие какого-либо аварийного возмущения, отклонение частоты может быть значительным.

По данным статистики, отделение энергорайонов в ЕЭС России происходят достаточно часто. В таблице 1 представлено количество выделений на изолированную работу энергорайонов в ЕЭС России в 2018-2019 гг. и их продолжительность по времени.

Таблица 1 – Время изолированной работы различных энергорайонов ЕЭС России

Квартал, год	Количество отделений	Суммарное время изолированной работы
3 кв 2019	14	8 ч 50 мин
2 кв 2019	11	42 ч 5 мин
1 кв 2019	4	8 ч 15 мин
4 кв 2018	10	47 ч 14 мин
3 кв 2018	3	37 мин
2 кв 2018	15	7 ч 48 мин
1 кв 2018	7	16 ч 37 мин

Как видно из таблицы 1, за некоторые периоды зафиксировано до 15 выделений на изолированную работу энергорайонов от ЕЭС России. Следует учитывать, что не каждое такое отделение сопровождалось возникновением значительных небалансов мощности и появлением крупных аварийных ситуаций. В подобных условиях даже если аварийные события и возникают, в ЕЭС России существует надежная система противоаварийного управления. Как правило, системы автоматического ограничения повышения частоты (АОПЧ) и автоматического ограничения снижения частоты (АОСЧ) ликвидируют аварии с минимальными потерями. Однако, работа АОСЧ направлена на отключение потребителей, что экономически неэкономично при наличии альтернатив.

Таким образом, тщательное изучение способов минимизации числа отключенных потребителей также является актуальной задачей.

В данной работе особое внимание уделяется проблеме снижения мощности ПГУ при падении частоты. К настоящему моменту в мире выполнено существенное число исследований, так или иначе затрагивающих обозначенную проблему. В европейских странах указание величины допустимого снижения мощности при отклонении частоты уже стало обязательным пунктом требований к генерирующему оборудованию, работающему в составе энергосистемы. В основном для установок допускается снижение мощности не более, чем на 10% на 1 Гц при их параллельной работе с энергосистемой. Однако, к примеру, для энергосистемы Великобритании и Ирландии определено более жесткое ограничение на уровне 2% на 1 Гц, так как велик риск отделения от остальной энергосистемы.

Во второй главе приведен краткий обзор моделей ГТУ, используемых для исследования процессов, связанных с изменениями частоты. Более подробно рассмотрена модель, которая применялась для вычислительных экспериментов, приведенных в работе.

Для анализа режимов работы ПГУ можно использовать различные методы, например, натурные испытания и математическое моделирование. При анализе процессов, связанных с отклонением частоты, испытания, как правило, проводят путем подачи на вход систем регулирования сигнала, имитирующего изменение частоты. Для анализа режимов работы ПГУ при больших отклонениях частоты такой метод проведения испытаний не подходит, так как в этом случае скорость вращения компрессора и, следовательно, подача воздуха, будут оставаться неизменными, что даст ложное представление о происходящих процессах. Полноценные испытания с реальным отклонением частоты проводятся в ЕЭС России, но отклонение частоты при этих испытаниях составляет около $\pm(80-100)$ мГц, что недостаточно для исследований всех интересующих процессов. Поэтому в данной работе исследование проводилось с помощью наиболее доступного метода – математического моделирования.

На настоящий момент разработано большое количество моделей ГТУ. Существуют детальные модели, но они требуют знания большого числа параметров, некоторые из которых могут быть недоступны в документации к установкам. Более того, для исследования системных вопросов такого подробного моделирования не требуется. В настоящей работе используется упрощенная модель – модель Роуена. В этой модели используются уравнения, аппроксимирующие описание термодинамических процессов, происходящих в турбине. Эта модель позволяет моделировать работу реальной ГТУ при отклонениях частоты, она широко используется для исследования процессов, связанных со значительными небалансами мощности. Структура модели представлена на рисунке 2.

Уставка по мощности определяется как минимальное значение из выходных сигналов регулятора температуры и частотного корректора. Сигнал частотного корректора формируется исходя из отклонения частоты вращения

ротора от номинальной. Сигнал регулятора температуры определяется отклонением температуры уходящих газов от уставки. Блоки F1 и F3 – это математические выражения, по которым рассчитывается температура газов в модели.

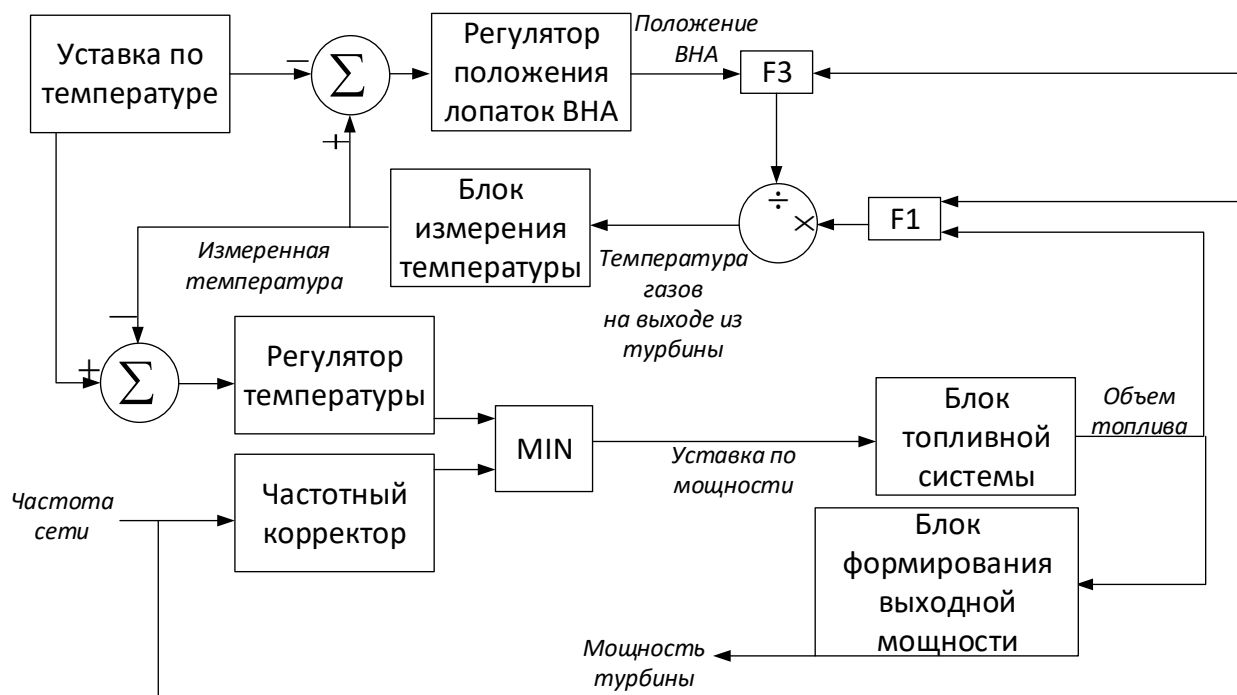


Рисунок 2 – Структура модели ГТУ

Паровая часть ПГУ моделируется более упрощенно, в сравнении с другими элементами модели, так как ее реакция полностью зависит от реакции ГТУ и в первые десятки секунд она практически не оказывает влияния на процесс. Модель паровой части состоит из двух компонентов: котла-утилизатора и паровой турбины, которые моделируются апериодическими звеньями.

Третья глава посвящена проблеме увеличения небаланса мощности при отделении дефицитного энергорайона с ПГУ на изолированную работу по причине снижения мощности установки. В главе приведены результаты моделирования отделения энергорайона с ПГУ на изолированную работу. Рассмотрены особенности проведения испытаний по участию генерирующего оборудования в регулировании частоты. Проанализировано какие последствия могут быть, если ориентироваться исключительно на результаты испытаний. Также представлены результаты моделирования отделения энергорайона с ПГУ с учетом работы АЧР. Показано, как наличие регулятора температуры влияет на объем нагрузки, отключенной АЧР.

В нормальном режиме температура газов в турбине поддерживается на установленном уровне по условию наибольшей эффективности работы котла-утилизатора. В случае, если компрессор расположен на одном валу с турбиной (такой тип установок наиболее распространен), то при снижении частоты в сети будет снижаться и скорость вращения компрессора. Указанное явление приведет к снижению объемов подачи воздуха в камеру сгорания, что в свою очередь вызовет рост температуры уходящих газов.

При отклонении температуры от уставки начинает действовать регулятор положения лопаток ВНА, открывая их. В случае, если воздействия недостаточно для восстановления температуры на заданный уровень, регулятор температуры выдает сигнал на снижение подачи топлива. В это же время частотный корректор в соответствии с принципом действия выдает сигнал на увеличение подачи топлива.

Для модели, схема которой представлена на рисунке 3, проводилось моделирование выделения на изолированную работу энергорайона с ПГУ. Тестовая схема состояла из энергорайона с эквивалентной нагрузкой, мощность которой варьировалась в зависимости от цели эксперимента, и ПГУ суммарной номинальной мощностью 450 МВт. ПГУ состоит из двух ГТУ и одной ПТУ. Для большей ясности происходящих процессов первоначально моделирование проводилось без учета действия АЧР.

Первоначальная загрузка установки для первой серии экспериментов составляла 60% (270 МВт). Проводилось два эксперимента. В первом случае нагрузка в энергорайоне составляла 280 МВт (первоначальный дефицит 10 МВт), во втором случае была увеличена до 290 МВт (первоначальный дефицит 20 МВт). Результаты моделирования представлены на рисунке 4.

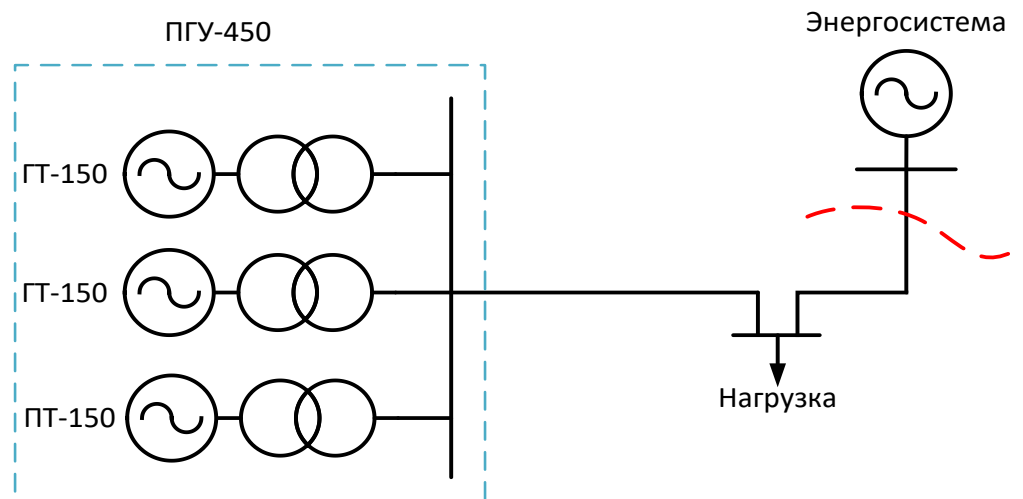


Рисунок 3 – Схема тестовой энергосистемы

Мощность ГТ, как отмечалось ранее, определяется минимальным из значений частотного корректора и регулятора температуры. На рисунке 4 (а) сигнал частотного корректора показан сплошной линией, сигнал регулятора температуры показан пунктирной линией. Выделение происходило в момент 10 с. Из рисунка видно, что в момент выделения сигнал частотного корректора начинает увеличиваться, а сигнал регулятора температуры наоборот – снижаться. Если в начальный момент времени сигнал частотного корректора меньше, чем регулятора температуры (а это значит, что он является преобладающим), то уже меньше, чем через секунду сигналы регуляторов пересекаются и минимальным становится сигнал регулятора температуры.

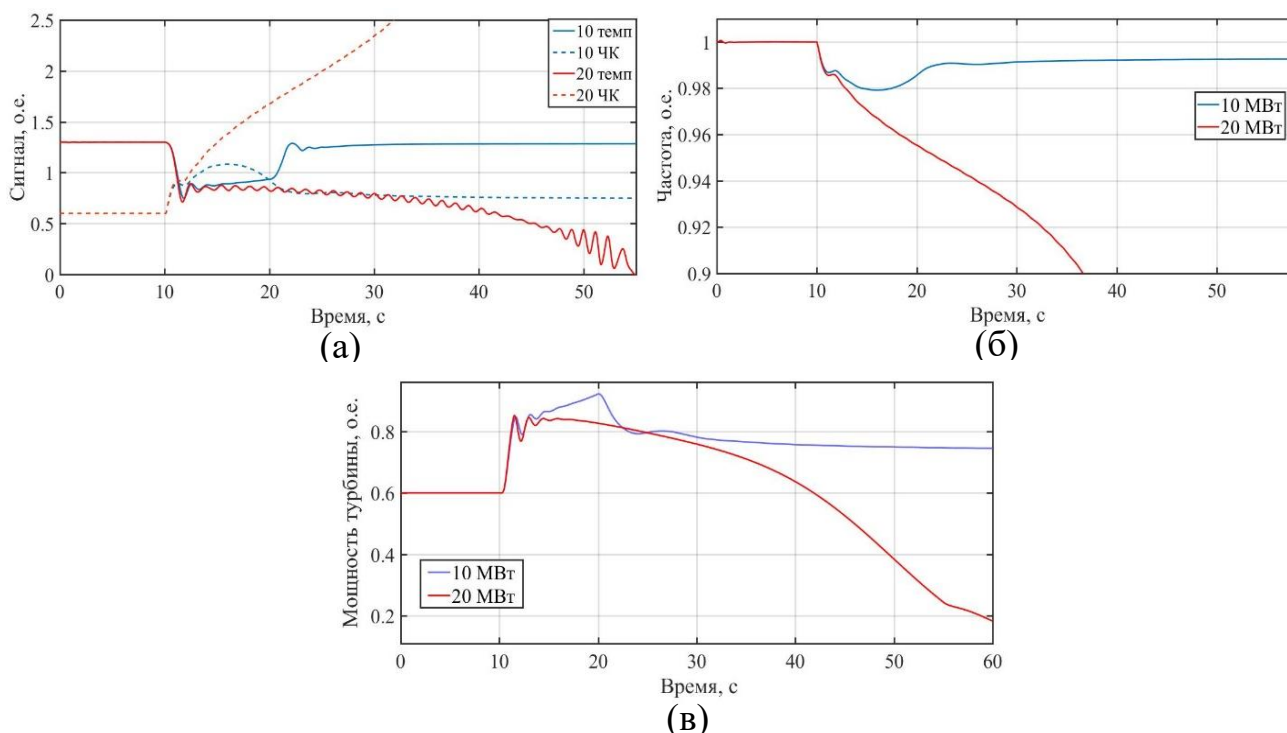


Рисунок 4 – Процессы при отделении энергорайона с ПГУ при различной величине небаланса мощности: (а) – изменение сигналов регулятора температуры (сплошная линия) и частотного корректора (пунктирная линия); (б) – изменение частоты; (в) – изменение мощности ГТ

В случае с нагрузкой 280 МВт спустя примерно 10 с сигнал регулятора температуры увеличивается, вновь происходит пересечение сигналов регуляторов и преобладающим становится сигнал частотного корректора. В случае с нагрузкой 290 МВт восстановления сигнала регулятора температуры не происходит, что приводит к дальнейшему снижению мощности установки и дальнейшему снижению частоты.

В России испытания генерирующего оборудования на готовность к участию в регулировании частоты проводятся с помощью подачи на вход частотного корректора сигнала, имитирующего изменение частоты. Очевидно, что данный подход не учитывает реальное изменение скорости вращения турбины, а значит и изменение подачи воздуха в камеру сгорания. В результате это может привести к серьезной погрешности при оценке выдаваемой мощности. Особенно явная ошибка может возникнуть не при малых отклонениях частоты, которые подаются со входа имитатора изменения частоты при испытаниях, а при более значительных отклонениях частоты. Предполагается, что, если при небольших симитированных отклонениях частоты во время испытаний установка набрала требуемый объем первичной мощности, то она наберет не меньший объем и при более глубоких отклонениях частоты. Однако, в случае с ПГУ, этого может не произойти, так как глубокое снижение частоты приведет к ограничению мощности турбины регулятором температуры.

Было проведено моделирование при 100% загрузке ПГУ. Если не принимать во внимание действие регулятора температуры, то при снижении частоты мощность ПГУ не должна измениться. Это связано с тем, что при

снижении частоты генерирующие установки должны набирать мощность для снижения небаланса. В рассматриваемом случае установка загружена на максимум, и изменения мощности происходить не должно. На рисунке 5 представлены графики изменения мощности ПГУ при различных отклонениях частоты, в случае подачи на вход имитатора частоты сигнала и в случае «реального» отклонения частоты в энергосистеме. Под «реальным» отклонением частоты здесь понимается моделирование изменения частоты в результате возникновения небаланса мощности в смоделированной энергосистеме. В этом эксперименте значения частоты записывались в массив данных. В эксперименте с имитацией изменения частоты записанное изменение частоты подавалось на вход частотного корректора, при этом небаланса в системе не было. Таким образом, частота вращения ротора при моделировании с «имитацией изменения частоты» оставалось неизменным, в то время как при «реальном» изменении частоты, скорость вращения ротора отклонялась от номинальной.

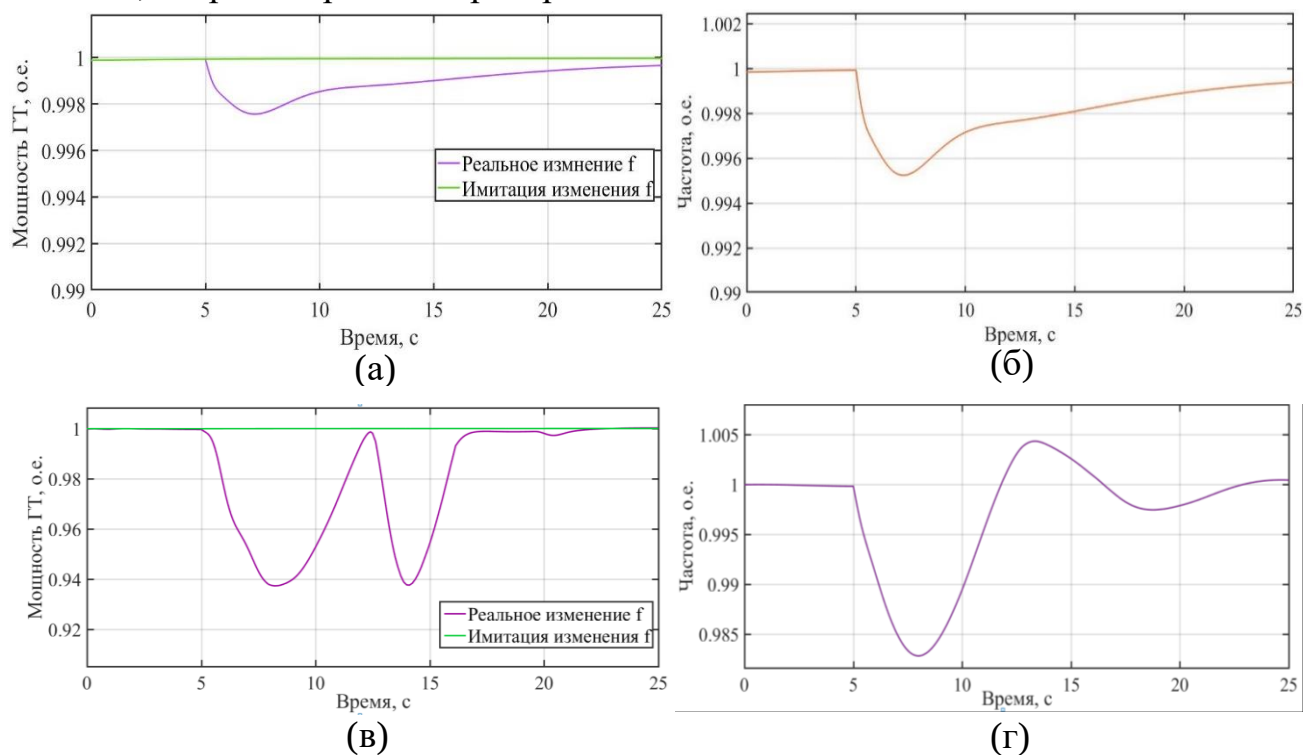


Рисунок 5 – Изменение частоты и мощности ГТ в составе ПГУ при реальном и имитационном отклонении частоты (начальная нагрузка установки 100 %): (а), (б) – при малом отклонении частоты; (в), (г) – при значительном отклонении частоты

Из графиков следует, что при таком отклонении частоты, которое обычно подается с имитатора на частотный корректор в ходе испытаний, уже имеет место снижение мощности ПГУ. Однако при небольших отклонениях частоты, которые регламентируются условиями проведения испытаний, изменение мощности незначительное. Как видно из рисунка 5 (б), при отклонении частоты 0,004 о.е. (0,2 Гц) ГТ снизила мощность на 0,002 о.е. (0,3 МВт). При большем отклонении частоты снижение мощности уже становится значительным. При отклонении частоты до 0,015 о.е. (0,75 Гц) мощность ГТ снижается на 0,06 о.е., что эквивалентно 9 МВт.

При неполной загрузке установки ожидается, что ПГУ наберет мощность. Это и происходит, если проводить испытания с имитацией изменения частоты. Если проводить моделирование с «реальным» отклонением частоты, то ПГУ после кратковременного набора мощности снизит ее. Результаты моделирования такой ситуации представлены на рисунке 6. Первоначальная загрузка установки находилась на уровне 90%. При имитации снижения частоты на 1,4% установка загрузилась до максимального значения и затем, когда частота восстановилась, вернулась на первоначальный уровень. Однако при моделировании «реального» отклонения частоты, установка сначала увеличила мощность, но потом, при прохождении частотой минимального значения, установка снизила мощность. Так как в этой ситуации рассматривалась работа установки совместно с другими генерирующими установками, ими был компенсирован увеличившийся дефицит и через некоторое время частота восстановилась.

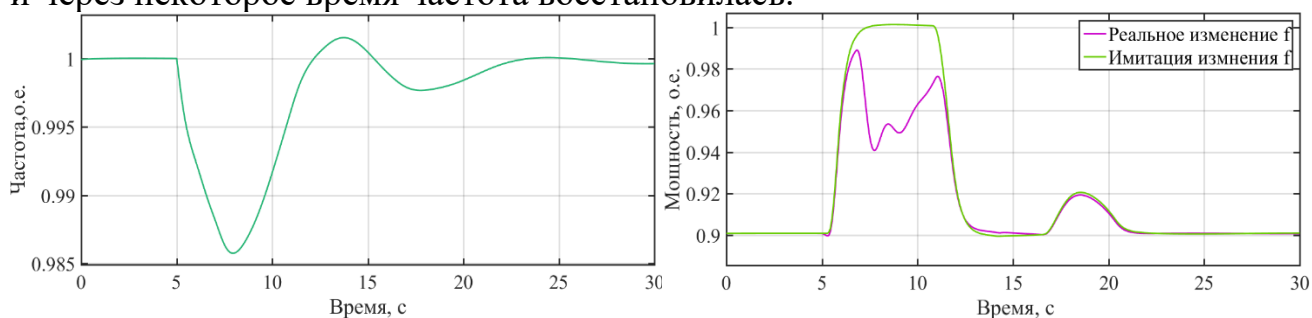


Рисунок 6 – Изменение частоты и мощности ГТ в составе ПГУ при «реальном» и имитационном отклонении частоты (начальная загрузка установки 90 %)

В связи с тем, что мощность ПГУ снижается при снижении частоты, дефицит в отделившемся энергорайоне с ПГУ будет составлять большую величину, чем первоначально ожидалось. Помимо представленных выше результатов, в ходе исследования было проведено моделирование отделения энергорайона с учетом действия АЧР. Результаты представлены в таблице 2. Необходимо заметить, что в одной серии экспериментов, выделенных в отдельный столбец, регулятор температуры уходящих газов был выведен, потому что при его выводе мощность установки не снижается. Это позволило оценить влияние снижения мощности установки на количество отключаемых очередей АЧР-1 (включая специальную очередь АЧР-САЧР) и АЧР-2.

В таблице 2 столбцы соответствуют определенной мощности генерации ПГУ, строки таблицы соответствуют определенной нагрузке, указанной в первом столбце. Для балансовых ситуаций с избытком мощности эксперименты не проводились, так как это тема отдельного исследования.

Как видно из таблицы 2, при моделировании без учета регулятора температуры, то есть, когда установка изменяет свою мощность только в соответствии с указаниями частотного корректора, количество отключенных очередей значительно меньше, чем при моделировании с учетом ограничений, накладываемых регулятором температуры. Таким образом, если не учитывать действие регулятора температуры, то объемы АЧР могут оказаться ниже требуемых, так как небаланс в этой ситуации будет значительно больше.

Таблица 2 – Количество отключаемых очередей АЧР при различных величинах нагрузки и генерации

Мощность нагрузки, МВт	Мощность ПГУ, МВт					
	Без учета регулятора температуры			С учетом регулятора температуры		
	270	360	450	270	360	450
450	САЧР; 1 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР;	АЧР не срабатывает	САЧР; 5 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 2 оч. АЧР-1; 2 оч. АЧР-2;	АЧР не срабатывает
495	САЧР; 4 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 3 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 2 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 7 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 5 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 4 оч. АЧР-1; 2 оч. АЧР-2;
540	САЧР; 5 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 5 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 4 оч. АЧР-1; 2 оч. АЧР-2;	САЧР; 9 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 7 оч. АЧР-1; 1 оч. АЧР-2;	САЧР; 6 оч. АЧР-1; 2 оч. АЧР-2;

В четвертой главе приведен разработанный алгоритм форсировки мощности ПГУ, а также предложена схема изменения уставки АРВ в целях регулирования напряжения для предотвращения увеличения небаланса в дефицитном энергорайоне с ПГУ. Представлены результаты тестирования разработанных алгоритмов в различных схемно-режимных условиях. Проведен анализ совместной работы предложенных алгоритмов, выполнено их сравнение с существующими, определены пусковые факторы, необходимые для их работы.

В целях предотвращения недопустимого снижения частоты в результате действия регулятора температуры ПГУ в работе предлагается использовать форсировку мощности при глубоком снижении частоты. На рисунке 7 представлена структура модели ГТУ, дополненная блоком форсировки мощности (выделен красным), используемым при выделении установки на изолированную работу. Сигнал данного блока складывается с минимальным из сигналов регулятора температуры и частотного корректора.

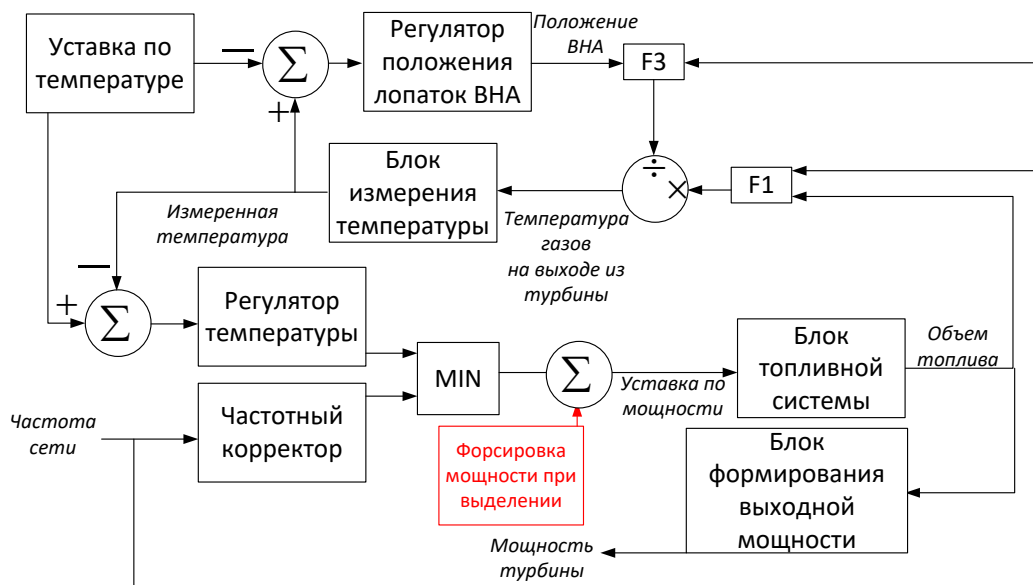


Рисунок 7 – Структура модели ГТУ с блоком форсировки мощности

Для предотвращения глубокого снижения частоты необходимо реализовать сигнал форсировки таким образом, чтобы поддерживать значение

мощности турбины на максимальном уровне. Затем сигнал необходимо снимать по мере восстановления частоты, чтобы избежать перегрева и повторного снижения частоты.

На рисунке 8 показана обобщенная схема алгоритма формирования сигнала форсировки мощности, предложенного в настоящей работе. Также на данном рисунке представлено изменение задания мощности при соответствующем изменении частоты. Принцип работы предложенного алгоритма заключается в том, что, когда частота снижается, мощность установки увеличивается до максимального значения, за это отвечает постоянная составляющая сигнала (С). Затем, как только частота начинает восстанавливаться, сигнал снижается, за это отвечает переменная составляющая сигнала (А). Снижение сигнала происходит по аperiodическому закону. Постоянная времени снятия сигнала рассчитывается исходя из отклонения частоты от номинального значения и скорости изменения частоты. Сигнал формируется таким образом, чтобы минимизировать наибольшее и интегральное отклонение частоты, при этом не допустив перегрева. Также, в алгоритме есть дополнительный блок, осуществляющий корректировку по температуре. В случае, если измеренная температура приближается к максимально допустимому значению, значение сигнала корректируется с понижающим коэффициентом (скорректированный сигнал обозначен K_t).

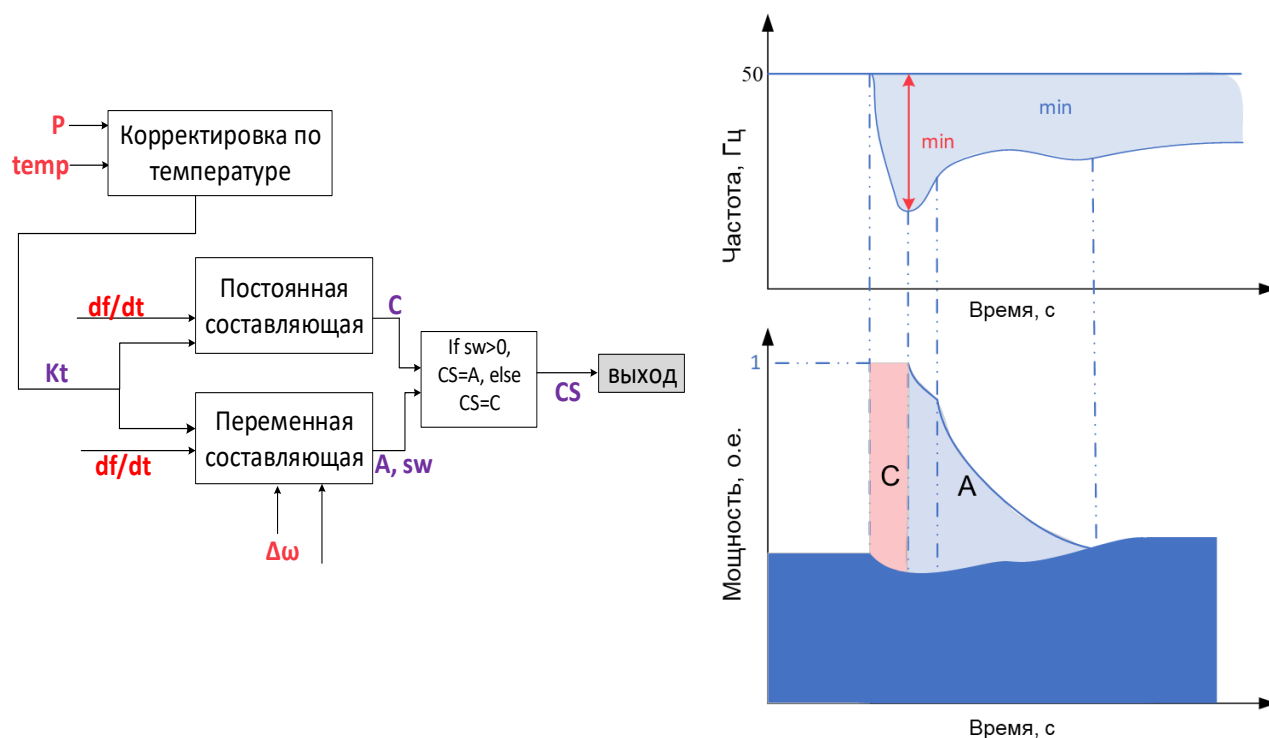


Рисунок 8 – Обобщенная схема формирования сигнала форсировки мощности

Постоянная составляющая рассчитывается исходя из увеличения мощности до максимального значения с учетом допустимого перегрева. Переменная составляющая формируется более сложным путем. Ее характер может быть описан с помощью системы (1).

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \begin{cases} -T_{cor} \frac{d(A)}{dt} + P'_k, & sw > 0 \\ 0, & sw \leq 0 \end{cases} \\ P'_k = \begin{cases} P'_{k-1}, & \left[\frac{d(Kt)}{dt} \geq -0.05 \text{ AND } (min1 < 0) \right] \\ Kt, & \left[\frac{d(Kt)}{dt} < -0.05 \text{ OR } (min1 > 0) \right] \end{cases} \\ 0,05 \left(\frac{dT_{\Delta\omega}}{dt} \right) = \frac{K1}{\Delta\omega} - T_{\Delta\omega} \\ T_{d\Delta\omega/dt} = K2 \cdot \frac{d(\Delta\omega)}{dt} \\ T_{dec} = \begin{cases} 0, & \left[\left(\frac{d(\Delta\omega)}{dt} \right) < -0.0005 \right] \text{ OR } \left[\left(\frac{d(\Delta\omega)}{dt} \right) > 0.0005 \right] \text{ OR } (min1 < 0) \\ \int 1 dt, & \left[-0.0005 \leq \left(\frac{d(\Delta\omega)}{dt} \right) \leq 0.0005 \right] \text{ AND } (min1 \geq 0) \end{cases} \\ T_{cor} = \begin{cases} T_{\frac{d\Delta\omega}{dt}} - T_{\Delta\omega} - T_{dec} + T, & [(-0,99T) < (T_{d\Delta\omega/dt} - T_{\Delta\omega})] \text{ AND } sw > 0 \\ -0,99T, & [(-0,99T) \geq (T_{d\Delta\omega/dt} - T_{\Delta\omega})] \text{ AND } sw > 0 \\ T, & sw \leq 0 \end{cases} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где Kt – значение сигнала, увеличивающего мощность до максимума, с учетом корректировки по температуре; $min1$ – разность сигнала регулятора температуры и сигнала регулятора скорости; $\Delta\omega$ – отклонение частоты вращения ротора; $\Delta f/dt$ – скорость изменения частоты сети; sw – сигнал переключения между постоянной и переменной составляющей; T – исходное значение постоянной времени; $K2$; $K1$ – коэффициенты, определяемые эмпирически; A – выход блока переменной составляющей.

На рисунке 9 представлены результаты сравнения изменения сигналов частотного корректора и регулятора температуры, а также частоты и мощности установки при наличии и отсутствии дополнительного регулирования. Графики в левой части рисунка (а, в, д) получены в условиях отсутствия сигнала форсировки мощности, графики в правой части рисунка (б, г, е) соответствуют ситуации, когда сигнал форсировки мощности был использован. Как можно видеть из рисунка 9 (а), после выделения сигнал регулятора температуры постепенно снижается, а сигнал частотного корректора увеличивается. В то же время из рисунка 9 (б) следует, что при наличии дополнительного регулирования в первое время после выделения преобладающим становится регулятор температуры, но спустя еще несколько секунд сигнал регулятора скорости вновь становится минимальным.

При отсутствии сигнала форсировки мощности частота не устанавливается на определенном уровне, а продолжает все время снижаться. Это связано с тем, что первоначальное снижение частоты привело к повышению температуры уходящих газов и, как можно видеть из рисунка 9 (д), к последующему снижению мощности газовой турбины. Снижение мощности привело к дальнейшему перегреву и возник лавинообразный процесс.

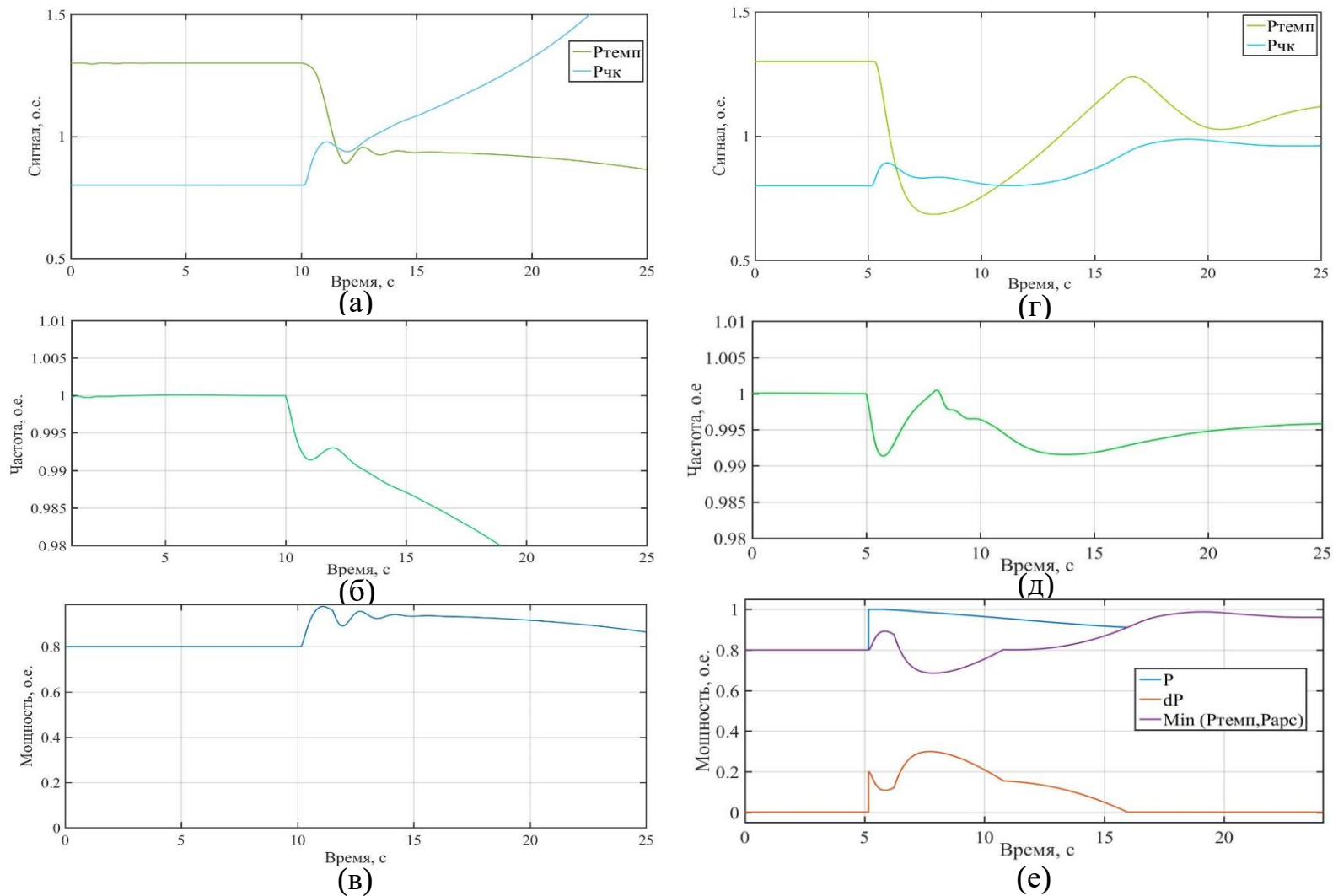


Рисунок 9 – (а)- сигналы регулятора скорости и температуры без дополнительного регулирования; (б) – то же с дополнительным регулированием; (в) – частота без дополнительного регулирования; (г) – частота с дополнительным регулированием; (д) – изменение мощности ГТ без дополнительного регулирования; (е) – изменение мощности ГТ (синяя кривая), дополнительный сигнал (коричневая кривая) и минимум из сигналов регулятора температуры и частотного корректора

Предложенная форсировка мощности позволяет предотвратить глубокое снижение частоты и избежать перегрева. Из рисунка 9 (е) можно видеть, что в момент выделения появляется дополнительный форсировочный сигнал (коричневая кривая), который увеличивает мощность газовой турбины до максимальной (синяя кривая) путем сложения с минимальным из сигналов регулятора температуры и частотного корректора (сиреневая кривая). Затем форсировочный сигнал изменяется таким образом, чтобы происходило постепенное снижение мощности. В итоге мощность вновь полностью начинает определяться блоком выбора минимального значения.

В целях определения эффекта, приобретаемого от действия форсировки мощности, производилось изменение нагрузки и сравнение графиков частоты для турбины без дополнительного регулирования и с дополнительным регулированием. Первоначальная загрузка ПГУ в следующих опытах составляла 60% (270 МВт), величина нагрузки изменялась в диапазоне от 280 до 310 МВт. Результаты представлены на рисунке 10. В легенде приведены величины небаланса мощности, для которых производилось моделирование. Пунктирными линиями изображены графики изменения частоты без дополнительного регулирования, сплошными линиями изображены графики изменения частоты с дополнительным регулированием. Как видно из рисунка, в рассмотренных условиях при наличии дополнительного регулирования удастся увеличить до 40 МВт небаланс, при котором не происходит лавинообразного снижения частоты.

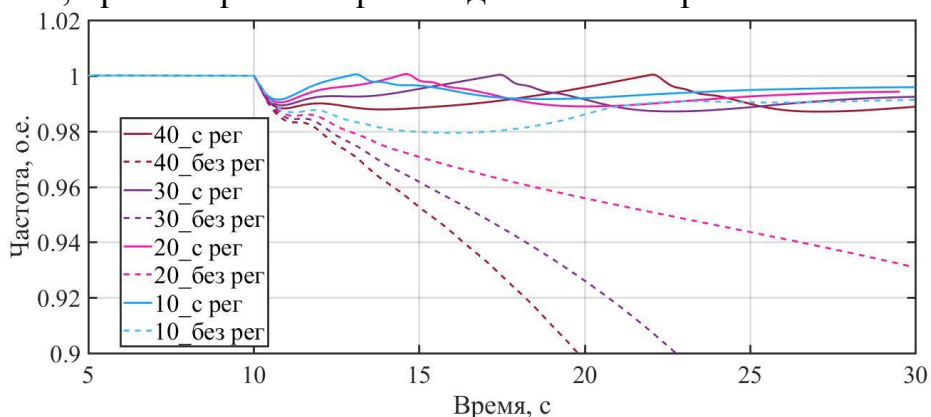


Рисунок 10 – Изменение частоты при различных небалансах мощности без форсировки мощности (пунктирные линии) и с форсировкой мощности (сплошные линии)

В работе также было проанализировано количество отключаемых очередей АЧР-1 при отсутствии/наличии форсировки мощности. Как видно из таблицы 3, применение форсировки мощности позволяет избежать отключения примерно двух очередей АЧР-1.

Помимо генерации на баланс мощности энергосистемы можно воздействовать через нагрузку. Основной способ снижения нагрузки – это ее отключение, на что и направлено действие АЧР. Но подействовать на нагрузку можно не только посредством отключения потребителей, но и с помощью изменения напряжения на ее шинах. Основная часть нагрузки зависит от напряжения, причем при снижении напряжения нагрузка также снижается в соответствии со статическими и динамическими характеристиками.

Таблица 3 – Количество отключенных очередей АЧР-1 при отсутствии/наличии форсировки мощности

Величина нагрузки, МВт	Количество отключенных очередей АЧР/ объем нагрузки, МВт		Итоговая эффективность, МВт
	Без регулирования	С форсировкой мощности	
100 % загрузка установки (450 МВт)			
590	9/265.5	8/236	29.5
570	8/228	7/199.5	28.5
550	7/192.5	6/165	27.5
80 % загрузка установки (360 МВт)			
480	9/216	7/168	48
460	8/184	6/138	46
440	7/154	6/132	22
60% загрузка установки (270 МВт)			
380	8/152	6/114	38
360	7/126	5/90	36
340	5/85	4/68	17

В связи с вышеизложенным, в качестве дополнительной меры для предотвращения увеличения дефицита мощности в работе предложено регулирование напряжения при снижении частоты. Для проверки работоспособности данной меры выполнялось моделирование на тестовой схеме, приведенной на рисунке 3. Путем снижения уставки АРВ на 5% производилось снижение напряжение на шинах генератора, также напряжение снизилось и на шинах нагрузки на величину, не превышающую 5%.

На рисунке 11 представлено изменение частоты во времени для различной величины нагрузки и соответственно различной величины небаланса. Нагрузка моделировалась в виде обобщенной СХН по напряжению. Как видно из рисунка, в рассматриваемом режиме при дефиците мощности 20 МВт без регулирования напряжения частота не смогла установиться на определенном уровне. В то же время, с регулированием напряжения удалось увеличить величину дефицита мощности, при которой частота устанавливается на определенном уровне, до 30 МВт.

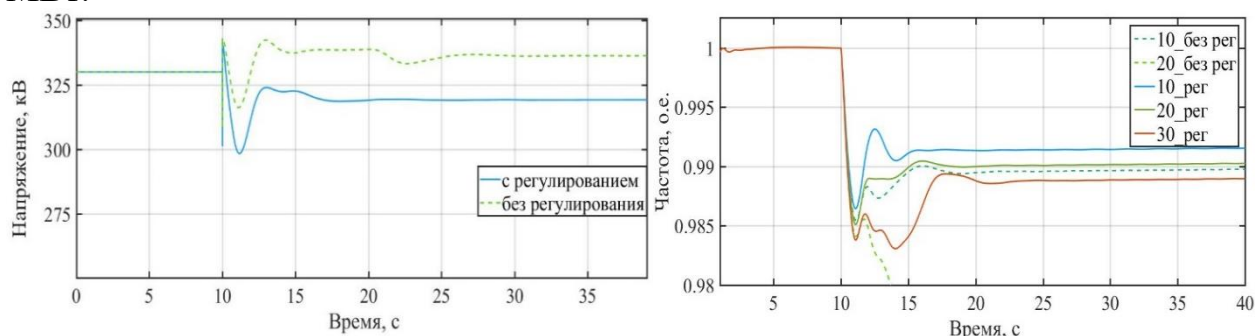


Рисунок 11 – Изменение режимных параметров при различной величине небаланса мощности с регулированием и без регулирования напряжения

Также проводились эксперименты при совместном действии форсировки мощности и регулирования напряжения для тех же схемно-режимных условий, что описаны выше. В этом случае еще удавалось увеличить допустимый дефицит практически в два раза относительно применения этих мер по отдельности.

В заключении приведены выводы и обобщены основные результаты.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. В работе показано, что одной из наиболее серьезных проблем, связанных с эксплуатацией ПГУ в условиях снижения частоты, является возможное снижение мощности установки. Указанная проблема вызвана тем, что при снижении частоты ПГУ, вследствие действия регулятора температуры уходящих газов, может начать снижать мощность вместо ее увеличения.
2. Показано отсутствие возможности экстраполяции результатов испытаний участия ПГУ в регулировании частоты для больших ее отклонений, так как такие испытания не отражают изменения скорости вращения компрессора. При небольших отклонениях частоты подобную погрешность можно считать незначительной. Но, как правило, при испытаниях предполагается, что и при больших отклонениях частоты установка наберет не меньшую мощность. Однако, в случае с ПГУ, при глубоком снижении частоты она не может набрать даже мощность, на которую выходила при небольших отклонениях частоты в связи с действием регулятора температуры газов.
3. Разработан алгоритм форсировки мощности ПГУ при снижении частоты. Предложенный алгоритм позволяет с помощью кратковременного увеличения мощности установки в первые моменты аварии поддержать частоту и предотвратить перегрев уходящих газов. В результате разработанная мера помогает предотвратить снижение мощности установки и связанное с ним нарастающее увеличение дефицита мощности. В работе продемонстрировано, что температура уходящих газов ПГУ может кратковременно превышать номинальное значение на 10-12%, что делает эту меру допустимой. Показано, что предложенный алгоритм форсировки мощности ПГУ позволяет уменьшить объем нагрузки, отключаемой АЧР, на величину до 30%.
4. Сравнение разработанного алгоритма форсировки мощности с другим существующим алгоритмом, основанном на увеличении потенциального перегрева, позволило заключить, что предложенный алгоритм позволяет получить меньший перегрев уходящих газов ПГУ при той же величине образовавшегося небаланса мощности. Кроме того, в разработанном алгоритме есть возможность изменять допустимую величину перегрева. Это отличает его от существующего алгоритма, где допустимая величина перегрева зависит от положения лопаток входного направляющего аппарата, то есть остается константой при полностью открытом входном направляющим аппарате.
5. В качестве дополнительной меры для предотвращения увеличения дефицита мощности предложено регулирование напряжения при снижении частоты. Большая часть нагрузки связана с напряжением посредством статических характеристик нагрузок. Таким образом, в большинстве случаев, при снижении напряжения происходит снижение мощности нагрузки. Очевидно, что эта мера имеет свои недостатки, связанные со снижением

производительности собственных нужд. Однако, в работе показано, что даже снижение напряжения в пределах 5% помогает предотвратить нарастающее увеличение дефицита мощности. Особенно эффективна и безопасна указанная мера в случае, если после отделения происходит увеличение напряжения в сети.

6. Смоделировано совместное действие предложенных алгоритмов форсировки мощности и регулирования напряжения. Результаты моделирования показали, что совместное действие разработанных алгоритмов дает лучший результат, чем применение их по отдельности.
7. Перспективы развития настоящей работы связаны повышением адаптивности предложенных алгоритмов, а также с проработкой предложенных мер при отделении ПГУ на дефицитный энергорайон, содержащий ветровые и солнечные электростанции.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ:

1. **O.Y. Polyakova**, P.V. Chusovitin, A.V. Pazderin. Operational Features of Combined-Cycle Power Plants at Large Frequency Excursions // *Power Technology and Engineering*, September 2019, Volume 53, Issue 3, pp 376–382. 0,7 п.л./0,6 п.л. (*Scopus*).
2. **O. Poliakova**, I. Gabdulin, P. Chusovitin, A. Pazderin. Improving of the combined cycle power plant operation under islanding conditions through voltage control // 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, ELMA 2019 - Proceedings, Varna, Bulgaria, 2019, 8771655. 0,43 п.л./ 0,35 п.л. (*Web of Science u Scopus*)
3. **O. Malozemova (O. Poliakova)**, P. Chusovitin and A. Pazderin. Power boosting algorithm for combined cycle power plant control during frequency excursion // 2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Riga, Latvia, 2018, 8659819. 0,41 п.л./0,35 п.л. (*Web of Science u Scopus*)
4. **O. Malozemova (O. Poliakova)**, P. Chusovitin and A. Pazderin. Combined cycle power plant control during frequency excursions // 2017 9th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Phuket, 2017, pp. 1-5. 0,35 п.л./0,3 п.л. (*Web of Science u Scopus*)
5. A. Tavlintsev, A. Pazderin, A. Suvorov, P. Chusovitin, **O. Malozemova (O. Poliakova)**, Experimental investigation of static load characteristics // 3rd International Conference on Energy and Environmental Protection, ICEEP 2014; Xi'an; China; 2014, pp. 969-973. 0,26 п.л./0,15 п.л. (*Scopus*)
6. A. Tavlintsev, A. Pazderin, **O. Malozemova (O. Poliakova)** and P. Chusovitin, Identification of static polynomial load model based on remote metering systems information // 2013 13th International Conference on Environment and Electrical

Engineering (EEEIC), Wroclaw, 2013, pp. 213-216. 0,43 п.л./0,2 п.л. (*Web of Science и Scopus*)

В других изданиях:

7. **Полякова О.Ю.** Управление нагрузкой при выделении энергорайона с парогазовой установкой на изолированную работу / И.И. Габдулин, **О.Ю. Полякова**, А.В. Паздерин // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, 16 - 20 сентября 2019 г., Иркутск. – В 3 т. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т.1. С. 251-255. 0,42 п.л./0,2 п.л.
8. **Полякова О.Ю.** Сравнение алгоритмов идентификации выделения ПГУ в составе дефицитного энергорайона на изолированную работу / Е.А. Михайленко, **О.Ю. Полякова** // Электроэнергетика глазами молодежи-2019: материалы юбилейной X Международной научно-технической конференции, 16 – 20 сентября 2019 г., Иркутск. – В 3 т. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2019. Т.1. С. 110-114. 0,39 п.л./0,25 п.л.
9. **Малоземова О.Ю. (Полякова О.Ю.)** Анализ работы АЧР при выделении ПГУ на изолированную работу в составе дефицитного энергорайона/ А.С. Харин, **О.Ю. Малоземова (О.Ю. Полякова)** // Электроэнергетика глазами молодежи-2018: материалы IX Международной научно-технической конференции, 01 – 05 октября 2018 г., Казань. – В 3 т. Т. 2. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2018. – 150-153 с. 0,4 п.л./0,2 п.л.
10. **Малоземова О.Ю. (Полякова О.Ю.)** Исследование режимов работы парогазовой установки при выделении на изолированную работу в составе дефицитного энергорайона/ **О.Ю. Малоземова (О.Ю. Полякова)**, П.В.Тошаков, П.В.Чусовитин, А.В.Паздерин // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции, 2 – 6 октября 2017 г., Самара. – В 3 т. Т. 2. – Самара: Самар. гос. энерг. ун-т, 2017. – 370 с. 0,4 п.л./0,3 п.л.
11. **Малоземова О.Ю. (Полякова О.Ю.)** Регулирование мощности ПГУ с целью предотвращения недопустимого снижения частоты/ **О.Ю. Малоземова (О.Ю. Полякова)**, П.В. Чусовитин, А.В. Паздерин// Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики, №1 – Чебоксары, Чувашский гос. ун-т, 2017. 0,24 п.л./0,2 п.л.
12. **Малоземова О.Ю. (Полякова О.Ю.)** Особенности регулирования частоты при выделении энергорайона с парогазовой установкой/ М.К. Мурашкин, **О.Ю. Малоземова (О.Ю. Полякова)**, П.В. Чусовитин, П.А. Парамонов, А.В. Паздерин // Электроэнергетика глазами молодежи-2016: материалы VII Международной научно-технической конференции, 19 – 23 сентября 2016 г., Казань. – В 3 т. Т. 1. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2016. – 379 с. 0,3 п.л./0,15 п.л.