

На правах рукописи

Богданов Иван Андреевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВТОРИЧНЫХ
ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы
и системы*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Абрамович Борис Николаевич

Официальные оппоненты:

Сушков Валерий Валентинович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижевартовский государственный университет», кафедра энергетики, профессор;

Зацепин Евгений Петрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра электрооборудования, доцент.

Ведущая организация – Акционерное общество «Газпром промгаз», г. Москва.

Защита диссертации состоится 24 сентября 2021 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, ауд. 1171 а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 июля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень её разработанности

Развитие современных промышленных предприятий способствует значительному увеличению требований к системам электроснабжения и электротехническим комплексам. В связи с этим растет спрос на распределенную генерацию (РГ) как наиболее гибкую, прогнозируемую, надежную и экономичную. По состоянию на 2017г. доля объектов РГ в ЭЭС России оценивается в 9-10% или около 23 ГВт, при этом наблюдается ежегодный прирост.

Многообразие методов осуществления РГ обуславливается популярностью во всех отраслях промышленности, как правило имеющих собственные ресурсы первичных энергоносителей, однако наиболее популярными и стремительно развивающимися являются источники РГ на базе газотурбинных (ГТУ) и паротурбинных (ПТУ) ввиду доступности газового сырья. Однако даже при проектировании энергетических узлов РГ возникают задачи по повышению энергоэффективности использования энергии первичного энергоносителя.

Эффективность использования топлива в электротехнических комплексах оценивается коэффициентом использования топлива (КИТ). В классическом исполнении КИТ электротехнических комплексов равен электрическому коэффициенту полезного действия (КПД) и не превышает 40% при номинальном режиме работы установки, а при возникновении сложных условий эксплуатации, в том числе повышения температуры и влажности воздуха показатель КИТ снижается до 30%. Использование тригенерационного режима позволит исключить снижение КПД, при этом используя порядка 5% тепловой энергии выхлопных газов, оставшуюся часть которой можно реализовать в бинарном цикле, для повышения электрического использования энергии первичного энергоносителя до 60% и в виде полезного использования тепловой энергии или энергии холода в технологических процессах или системах обеспечения, что может позволить повысить КИТ до 90 – 95 %. При

многообразии режимов работы систем снабжения появляется задача создание методологии сравнения и оценки различных режимов.

Помимо энергоэффективности для большинства предприятий важным является критерий надежности систем электроснабжения. Собственные объекты РГ также могут быть исполнены в различных режимах работы: изолированный с полным обеспечением собственных нагрузок; параллельная работа с электроэнергетической системой с выдачей или без выдачи избыточных мощностей в сеть для повышения показателей надежности и экономичности процесса электроснабжения; комбинированный режим, при котором в случае возникновения аварийных ситуаций система электроснабжения способна переходить на изолированный режим работы.

При этом становится важной задачей анализ и учет систем РГ для снижения рисков развития нарушений устойчивости и возникновения каскадных аварийных ситуаций и обеспечения необходимой или требуемой надежности, живучести, безопасности и экономичности электроснабжения. Подобный анализ осуществляет оценкой имеющихся методов и режимов работы систем электроснабжения, с учетом имеющихся ресурсов и необходимых требований по надежности и всегда сводится к моделированию систем электроснабжения и модельной оценке надежности и энергоэффективности системы электроснабжения, после чего оценивается экономичность, что на сегодняшний момент не описывается единой методологией и соответственно имеет риск низкой эффективности. Проблемой повышения эффективности электротехнических комплексов занимались Абрамович Б.Н., Аверьянов В.К., Лимитовский А.М. Вопросам повышения надежности электротехнических комплексов газотранспортных систем, в том числе с использованием логико-вероятностного метода, посвящены работы Абрамовича Б.Н., Петрова С.П., Бабурина С.В., Махалина А.Н., Моренова В.А, Турышевой А.В., Поплевина В.М. и др.

В работе Лимитовского А.М. показана эффективность применения когенерационного цикла в условиях геологоразведки. В

работах Абрамовича Б.Н., Петрова С.П. рассмотрена возможность построения схемы функциональной целостности при применении графического исполнения логико-вероятностного метода для оценки влияния отдельных элементов системы электроснабжения на общие показатели надежности и возможности исключения наименее эффективных по критериям надежности элементов для минимизации общей структуры. Однако не рассмотрены вопросы применения различных схем электроснабжения и вопросы АВР.

В монографии Абрамовича Б.Н. и Бабурина С.В. обосновано применение логико-вероятностного метода для оценки показателей надежности электротехнических комплексов. Но не рассмотрено применение данных методов для оценки надежности объектов нефтегазовых предприятий.

В работе Турышевой А.В. рассматриваются способы повышения энергоэффективности и качества электрической энергии автономных электротехнических комплексов электроснабжения объектов нефтегазового производства с попутным нефтяным газом в качестве энергоносителя путем использования промежуточного накопителя энергии, выпрямительно-инверторного преобразователя для осуществления пуска турбогенераторной установки.

В работе Моренова рассмотрен вариант повышения эффективности электротехнических комплексов путем увеличения коэффициента использования первичного энергоносителя в когенерационных установках и бинарном режиме, однако не освещен метод работы данного комплекса в тригенерационном режиме, с применением энергии выхлопа для охлаждения воздуха на воде в компрессорное воздухоочистительное устройство (КВОУ) ГТУ.

Таким образом работы по повышению энергоэффективности электроснабжения электротехнических комплексов объектов нефтегазового производства с использованием энергии вторичных энергоресурсов путем реализации тригенерационного режима для поддержаний номинальной и снижении установленной мощностей турбогенераторов при вариации параметров окружающей среды и создании структур электроснабжения рассматриваемых комплексов,

позволяющих улучшить такие параметры надежности как коэффициент готовности, средняя наработка на отказ, вероятность безотказной работы, время восстановления системы, а также обеспечить качественное и бесперебойное питание ответственных потребителей являются актуальными.

Цели и задачи

Повышение энергетической эффективности, надежности и обеспечение бесперебойности электроснабжения электротехнических комплексов при ограничении до 40 % установленной мощности источников от расчетной при температуре окружающей среды до 40 °С и высоты над уровнем моря до 1200 м.

Основные задачи исследований:

1. Анализ методов повышения энергоэффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий с использованием вторичных энергоресурсов.

2. Обоснование структуры электротехнического комплекса с автономным источником при использовании тригенерационного режима, позволяющего функционировать турбогенератору в номинальном режиме независимо от температуры окружающего воздуха и высоты над уровнем моря.

3. Разработка структуры автономного электротехнического комплекса нефтегазовых предприятий, обеспечивающей секционирование источников электроэнергии, повышение качества электроэнергии, надежности электроснабжения, позволяющей реализовать бесперебойное питание потребителей.

4. Технико-экономическое обоснование эффективности использования энергии первичного энергоносителя в газотурбинных электростанциях при тригенерационном режиме работы.

Идея работы

Автономные генераторы, функционирующие с использованием вторичных энергетических ресурсов, позволяют осуществить надежное и бесперебойное электроснабжение электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий без дополнительного потребления топлива от первичных источников.

Научная новизна

Разработан алгоритм стабилизации температуры на входе тригенерационной системы на уровне 15 °С, с амплитудой погрешности не превышающей 0,5 °С, независимо от параметров окружающей среды, что позволяет уменьшить установленную мощность турбогенераторной установки до 25 % от расчетного значения при использовании их на объектах газотранспортных систем практически во всех климатических зонах РФ и достигнуть величины коэффициента использования топлива 90-95 %.

Обоснована мостиковая структура электротехнического комплекса автономного электроснабжения компрессорных станций с применением тиристорной системы автоматического ввода резерва, обеспечивающей быстроедействие секционирование источников электроэнергии при аварийных режимах для повышения надежности электроснабжения, активного фильтра, позволяющего повысить уровень качества электроэнергии и реализовать бесперебойное питание потребителей на время безаварийного завершения технологического процесса.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке, планировании, организации и проведении комплексных мероприятий по повышению уровня энергосбережения, энергоэффективности, устойчивости и надежности систем электроснабжения в автономных электротехнических комплексах.

Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при реализации специальных образовательных программ.

Методология и методы исследований

Анализ теоретических и экспериментальных данных в областях: режимов работы газотурбинных установок в когенерационном и тригенерационном режимах автономных электротехнических комплексов, надежности элементов системы электроснабжения.

Методы математического и имитационного моделирования электротехнических комплексов и систем автоматического

управления в промышленных предприятиях в среде Simulink программы Matlab и программном комплексе «Арбитр».

Методы теории планирования эксперимента и математической статистики, теории автоматического управления.

Методы оценки надежности систем электроснабжения.

Соответствие паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы (технические науки) –п. 3 Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления и п. 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Положения, выносимые на защиту

1.Повышение уровня энергоэффективности в части снижения установленной мощности автономных источников до 40 % достигается путем использования вторичных энергоресурсов и организации тригенераионного цикла для охлаждения окружающего воздуха и подачи его на вход установки распределенного генератора.

2.Для повышения надежности и обеспечения бесперебойности газотранспортных систем топология распределения электрической энергии должна выполняться с использованием мостиковых структур, технических средств секционирования систем сборных шин и активных фильтров для компенсации провалов напряжения и гармонических искажений.

Степень достоверности и апробация результатов

Научные положения, выводы и рекомендации подтверждаются известными теориями оценки электроснабжения электротехнических комплексов, методами математического и компьютерного моделирования, а также сходимостью теоретических и экспериментальных исследований с погрешностью не более 10%.

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики федерального

государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», докладывалась и получила положительную оценку на конференциях и семинарах: Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: *IPDME-2018*» на базе Горного университета, г.Санкт-Петербург, Россия, 2018г.; Международной конференции «*69TH Bergund Huttenmannischer Tag 2018*» на базе Фрайбергской горной академии, г. Фрайберг, Германия, 6-8 июня 2018 г.; XVII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов на базе Горного университета, г.Санкт-Петербург, Россия, 2019г (диплом за III место); Международной научно-практической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: *IPDME-2019*» на базе Горного университета, г.Санкт-Петербург, Россия, 2019г (диплом за II место); «*2019 International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering*» на базе Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия, 20 ноября 2019 г.

Личный вклад автора

Непосредственное участие в получении исходных данных и в научных экспериментах, проведение анализа существующих систем электроснабжения электромеханических комплексов и систем охлаждения в тригенерационном режиме. Сформулированы цели, задачи исследований, основные научные положения.

Созданы имитационные модели структур электроснабжения электромеханического комплекса в том числе с применением систем компенсации провалов и искажений напряжения и обеспечения бесперебойного питания потребителей, системы автоматического регулирования расхода охлаждающей жидкости цикла охлаждения газотурбинной установки, в том числе разработка алгоритма работы данной системы. Произведен расчет надежности полученной системы электроснабжения графическим способом логико-вероятностного метода при построении и оценке параметров схем функциональной целостности в программном комплексе «Арбитр».

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (*Scopus* и *Web of Science*). Получены 2 свидетельства на программы для ЭВМ.

Структура диссертации

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой из них, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 105 наименований, и 1 приложение. Диссертация изложена на 111 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлено общее описание работы, обоснована актуальность выполненной работы, сформулированы цель и задачи исследований.

В первой главе представлено современное состояние электротехнических комплексов на основе газотурбинных установок, выделены недостатки, формирующие цель диссертационной работы.

Рассмотрены когенерационный, с применением бинарного цикла, и тригенерационный режимы использования вторичных энергоресурсов с целью повышения коэффициента использования топлива. Обоснована нецелесообразность применения когенерационного режима с бинарным циклом для повышения электрического КПД электротехнического комплекса нефтегазовых предприятий, как структурно сложного технического процесса, для реализации которого необходимо разработка системы синхронизации работы разнородных генераторов на общего потребителя.

Во второй главе обоснована структура тригенерационного электротехнического комплекса с охлаждением основной электрогенерирующей установки по разработанному алгоритму регулирования расхода охлаждающей жидкости, поступающей из АБХМ.

КПД ГТУ может снижаться до 28 % при повышении температуры воздуха окружающей среды до 40 °С (рисунок 1).

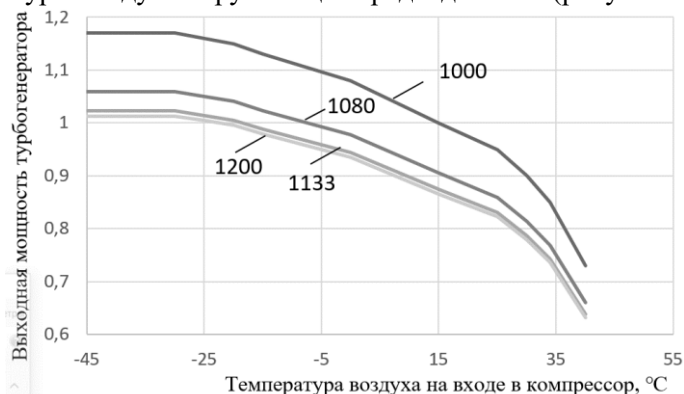


Рисунок 1 – График зависимости показателей выходной мощности ГТУ от температуры окружающей среды при работе на высотах 1000 м, 1080 м, 1133 м, 1200 м над уровнем моря

Для поддержания номинальной мощности турбогенератора, при изменении параметров окружающей среды и снижения установленной мощности электротехнического комплекса необходимо охлаждать воздух на входе ГТУ. По результатам анализа методов генерации энергии холода наиболее эффективным является применение абсорбционной холодильной машины, способной работать на вторичных энергоресурсах в виде выхлопных газов турбогенератора. Использование АБХМ позволяет поддерживать номинальную мощность ГТУ при потреблении до 3 % мощности тепловой энергии выхлопных газов и до 1 % электрической энергии турбогенератора (при повышении мощности его до 28%).

Для поддержания номинального значения мощности ГТУ необходимо изменение энергии холода, подаваемого на вход

турбогенератора. Для выполнения этой задачи в АБХМ предусмотрено автоматизированное управление расходами теплообменных жидкостей: бромисто-литиевого раствора, хладагента и охлаждающей воды. Однако автоматизированное управление имеет недостатки, среди которых низкая оперативность и человеческий фактор.

В качестве альтернативного метода поддержания необходимого температурного показателя воздуха на входе турбогенератора возможно создание процесса автоматического регулирования расходом охлаждающей жидкости в водовоздушный теплообменный аппарат контура охлаждения ГТУ. Для разработки алгоритма регулирования была использована система уравнений теплопереноса в теплообменном аппарате в соответствии с законом сохранения энергии.

По данным уравнениям построена имитационная модель в среде Matlab Simulink, анализ работы которой показал возможность поддержания температуры на входе в ГТУ не превышающий значения 15°C даже при наличии изменяющихся возмущений: температуры воздуха в диапазоне от 13 до 37°C и влажности от 0 до 100%.

Приведено экономическое сравнение реализации условной системы электроснабжения нефтегазового предприятия с мощностью нагрузки до 50МВт автономным способом с применением тригенерационного режима, без применения тригенерационного режима, смешанного автономного и централизованного электроснабжения и централизованного электроснабжения.

Из технико-экономического анализа следует, что режим тригенерации может позволить снизить капитальные затраты на установленную мощность на 24% затраты на ежегодные расходы на 28%.

Срок окупаемости создания автономного электротехнического комплекса относительно электроснабжения от ЭЭС составляет 2,4 года.

В третьей главе рассмотрены методы повышения надежности системы электроснабжения электромеханического комплекса с тригенерационным режимом. Предложена методология оценки надежности. Проведен сравнительный анализ надежности различных систем электроснабжения.

Нефтегазовые предприятия являются потребителями первой категории, однако при подключении компрессорного цеха или центра управления, подключаемого как нагрузка собственных нужд, данные потребители при выходе из строя электрических аппаратов основной цепи, не имеют доступа к электрической энергии, что не соответствует требованиям по категории надежности. Применение мостиковой схемы по сети низкого напряжения позволяет создать дополнительные контуры питания, для указанных потребителей (рисунок 2).

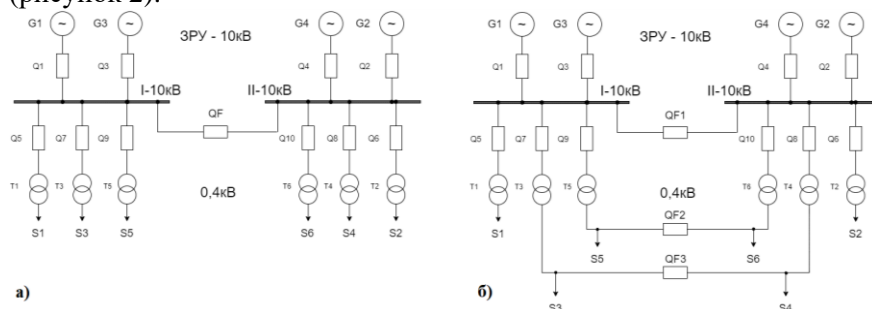


Рисунок 2 – Разделенная (а) и мостиковая (б) силовые структуры электроснабжения

где G1 – G4 генераторы автономного электротехнического комплекса НГП, QF1 – QF3 – секционные выключатели; Q1-Q8 – высоковольтные выключатели 10 кВ в ЗРУ 10 кВ, T1-T6– трансформаторы 10/0,4 кВ, S3 и S4 – КТП компрессорного цеха, S5 и S6 – КТП собственных нужд.

Для сравнительной оценки надежности представленных структур целесообразно применять логико-вероятностный метод. Для оценки сложных систем параметры и связи элементов структур представляются в графическом виде, что при применении

программного обеспечения позволяет проводить сложные расчеты за доли секунды.

Применение логико-вероятностного метода оценки в ПК «Арбитр» позволяет провести анализ системы по четырем основным параметрам надежности системы электроснабжения: коэффициент готовности системы КГс, средняя наработка на отказ Тос, среднее время восстановления системы Твс, вероятность безотказной работы в останавливаемой системе Рвс.

Результаты сопоставления показателей надежности рассмотренных структур даны в таблице 1, из которой следует, что при применении мостиковой структуры среднее время восстановления системы увеличивается на 0,6 %, среднее время восстановления системы уменьшается на 40 %, средняя наработка на отказ увеличивается на 33 %, вероятность безотказной работы увеличивается на 15 %. Полученные результаты позволили рекомендовать к применению в автономных ЭТК НПП топологии с мостиковыми структурами на стороне 6(10) и 0,4 кВ.

Таблица 1 – Результаты сопоставления показателей надежности рассмотренных структур

КГс	Твс, ч.	Тос, ч. (лет)	Рвс
0.9989	15.5	15170 (1.732)	0.5612
0.9995	9.41	20250 (2.312)	0.6488

Теперь при аварийном останове электростанции технологическое оборудование без перерыва в электроснабжении продолжило работу, а оставшая нагрузка ступенчато переведена на оставшийся в работе агрегат по напряжению 0.4 кВ с кратковременной потерей питания.

График наброса нагрузки, показывает, что именно такая нестандартная схема обеспечивает надежное резервирование питания ГПА и ступенчатое переключение остальных потребителей на оставшуюся в работе электростанцию.

В четвертой главе разработана топологии системы электроснабжения для повышения качества и бесперебойности систем электроснабжения НГП.

Помимо длительных провалов напряжения по причине остановов генераторов необходимо исключить влияние краткосрочных провалов и искажений напряжений, связанных в нефтегазовой промышленности, как правило, с резким увеличением нагрузки при пусках мощных синхронных электродвигателей буровых или насосных установок систем поддержания давления углеродного сырья, а также в аварийных режимах, в особенности при возникновении коротких замыканий.

Исходя из указанных причин разработана структура (рисунок 3), содержащая активный фильтр, который реализует следующие функции:

- подавление высших гармоник тока и напряжения;
- компенсация провалов и отклонений напряжения;
- бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей на время безаварийного завершения технологического процесса.

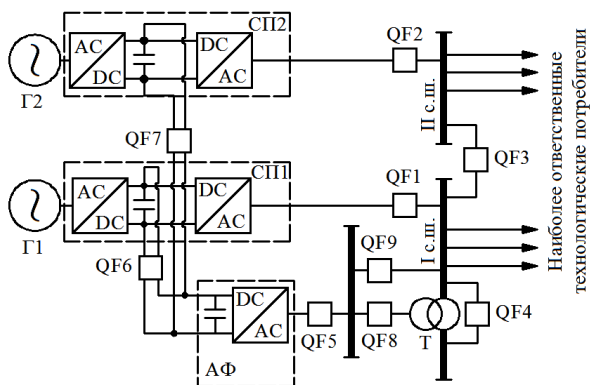


Рисунок 3 – Структура СЭС на основе источников РГ с АФ

В соответствии с рисунком 3 построена имитационная модель в среде MatLab Simulink. Результаты моделирования доказывают возможность активного фильтра выступать в роли ДКПН на период действия автоматического ввода резерва в

системах распределенной генерации при переходе электроснабжения с одного автономного источника на другой, в таком режиме возможны бестоковые паузы до 0,1 сек (рисунок 4.). В случае внезапных перебоев электроснабжения.

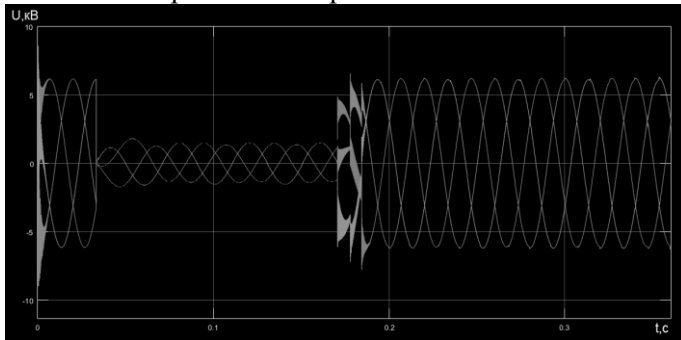


Рисунок 4 – Осциллограмма напряжения на шинах ответственных потребителей

Внезапные перебои с подачей электрической энергии такой продолжительности приводят к нарушению технологического процесса добычи, отключению синхронных и асинхронных двигателей, значительному ущербу из-за снижения добычи нефти.

Ограничение перерывов электроснабжения в сетях 6(10) кВ и исключение бестоковой паузы может осуществляться с помощью ТАВР, в которых секционный выключатель для ускорения действия на время включения секционный выключатель шунтируется встречно-параллельно включенными тиристорами, что позволяет исключить бестоковую паузу.

Принципиальные особенности ТАВР:

- время определения неисправного ввода - 0,034 с после отключения ввода;
- практически синхронное переключение электродвигателей неисправной секции сборных шин на исправную секцию с углом фазового рассогласования менее 19 эл. градусов;
- провал напряжения на неисправной секции сборных шин до 0,85 от номинального;

- отсутствие переходного процесса у переключаемых электродвигателей;
- сохранение поля возбуждения у синхронных электродвигателей.

В настоящее время не существует других устройств подобного типа, способных провести переключение электродвигателей с неисправной секции сборных шин на исправную секцию с подобных ТАВР параметрами.

Выполнена оценка надежности мостиковой структуры автономных электротехнических комплексов НПП с включением в их состав АФ и ТАВР логико-вероятностным методом. В результате сравнительного анализа установлено, что внедрение в систему электроснабжения АФ и ТАВР не приводит к значительному изменению показателей надежности автономного электротехнического комплекса НПП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи: повышения эффективности использования энергии первичного энергоносителя посредством создания бинарного цикла и использования тригенерационной системы с использованием абсорбционной холодильной машины для охлаждения потока воздуха на входе ГТУ и создание системы автоматического регулирования расходом охлаждающей жидкости для поддержания номинальной работы турбогенератора при вариации параметров ОС.

Основные научные результаты и практические рекомендации отражены в следующих выводах:

1. Произведен анализ методов энергоэффективности автономных электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий с использованием вторичных энергоресурсов, в результате которого доказана целесообразность использования тригенерационного режима с осуществлением охлаждения потока воздуха на входе газотурбинных установок для снижения установленной мощности турбогенератора на 40% при достижении

температуры окружающей среды 40 °С и расположении на высоте порядка 1200м над уровнем моря и достижения величины коэффициента использования топлива 90-95 %.

2. Разработаны математические и имитационные модели системы автоматического регулирования расхода жидкости для стабилизации температуры на входе газотурбинной установки на уровне 15 °С, что позволяет обеспечивать номинальную мощность турбогенератора при вариации параметров окружающей среды.

3. Результаты технико-экономического обоснования эффективности показали, что применение электротехнического комплекса автономного электроснабжения на основе тригенерационного цикла на 24% выгоднее повышения установленной мощности ГТУ и имеет срок окупаемости около 2,4 года при сравнении с электроснабжением от ЕЭС.

4. Доказано, что в многосвязных системах электроснабжения газотранспортных систем условию повышения надежности на стороне 6(10) кВ целесообразно применять мостиковые структуры коммутации оборудования, обеспечивающие повышение коэффициента готовности на 0,6 %, средней наработки на отказ на 33 %, вероятности безотказной работы на 15 %, снижения среднего время восстановления уменьшается на 40 %.

5. Показана эффективность применения активного фильтра для компенсации кратковременных отклонений напряжения, возникающих при секционировании источников электротехнического комплекса автономного электроснабжения, а также для осуществления бесперебойного электроснабжения на период безаварийного завершения технологического процесса.

6. Показано, что применение тиристорных быстродействующих устройств автоматического ввода резерва (ТАВР) в составе электротехнического комплекса автономного электроснабжения газотранспортных систем позволяет ограничить перерывы электроснабжения на стороне 6(10) кВ и минимизировать длительность бестоковой паузы, при этом секционный выключатель для ускорения действия на время включения шунтируется встречно-параллельно включенными тиристорами.

7. В результате сравнительного анализа установлено, что внедрение в систему электроснабжения АФ и ТАВР не приводит к значительному изменению показателей надежности автономного электротехнического комплекса газотранспортной системы.

8. Научные положения диссертации и технические разработки обеспечивают дальнейшее развитие методов повышения энергоэффективности автономных электротехнических комплексов, использования вторичных энергоресурсов, повышения надежности и обеспечения бесперебойности электроснабжения потребителей первой и второй категории надежности.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Богданов, И.А. Повышение энергоэффективности электротехнических комплексов когенерационных установок для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий / Богданов, И.А., Веприков А.А., Касьянова А.Н., Моренов В.А. // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. – № 12-5 (66). – С. 59-63.

2. Богданов, И.А. Система тригенерации как средство повышения эффективности бинарных комплексов для производства электрической и тепловой энергии / В. И. Маларев, И. А. Богданов, А. В. Турышева – DOI 10.34831/EP.2020.66.67.001 // Промышленная энергетика. – 2020. – № 3. – С. 21-27.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science:

3. Bogdanov, I.A. The system of trigeneration with binary cycle for use as an energy source for gas fuel / В. N. Abramovich, I. A. Bogdanov, A. V. Kopteva, V. I. Malarev – DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012092 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, Saint Petersburg, 23–24 мая 2019 года. – Saint Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 012092. (Scopus)

4. Bogdanov, I.A. Algorithm for automatic compensation of voltage dips in power supply of industrial facilities. Malarev V., Bogdanov I.,

Senchilo N. // Journal of Applied Engineering Science, 2020, 18(2), стр. 173–180. (Scopus)

5. Bogdanov, I.A. Automatic system for compensation of voltage dips in electric power systems of vessels with electric motor / Bogdanov I.A., Senchilo N.D. // Marine Intellectual Technologies. – 2020. – № 3-1(49). – p. 212-218. – DOI 10.37220/MIT.2020.49.3.028. (Web of Science)

6. Bogdanov, I.A. Solutions to Improving the Self-Contained Power Supply to the Gas Industry Facilities when Operating Gas Turbine Power Plants in the Binary Cycle and Trigeneration Modes / Tokarev I.S., Bogdanov, I.A., Serikov, V.A. // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. (Scopus)

Свидетельства:

7. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2018616011 РФ. Имитационная модель системы тригенерации с бинарным циклом для повышения эффективности использования первичного энергоносителя / Б.Н. Абрамович, И.А. Богданов, В.И. Маларев / правообладатель: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (RU); заявл. 26.03.2018 регистр. 21.05.2018 - 1с.

8. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2019611491 РФ. Имитационная модель системы автоматического управления установкой динамической компенсации провалов напряжения / Б.Н. Абрамович, И.А. Богданов, В.И. Маларев / правообладатель: ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» (RU); заявл. 10.01.2019; опубл. 28.01.2019. 1 с.