

На правах рукописи

Моренов Валентин Анатольевич



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ БИНАРНЫХ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2019

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 – АО «Газпром промгаз».

Защита состоится 06 февраля 2020 г. в 16 ч 00 мин на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Санкт-Петербургского горного университета.

Автореферат разослан 06 декабря 2019 г.

**УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета**



**КОПТЕВА
Александра Владимировна**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышение эффективности электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий в настоящее время является актуальной задачей. Рациональное использование энергетического потенциала газообразного топлива, такого как попутный нефтяной и природный газ, при этом играет важную роль. Нефтегазовую отрасль отличает высокая энергоемкость, в частности затраты на энергоносители в себестоимости продукции для всей вертикали нефтяной промышленности нередко составляют свыше 50 %. Традиционный способ использования централизованных энергосистем, еще несколько лет назад не имевший реальной экономической альтернативы, в настоящее время не отвечает требованиям по уровню надежности электроснабжения нефтегазовой промышленности. С постепенным смещением добывающих предприятий на восток и за полярный круг экономически целесообразно использовать сети с автономными источниками электроэнергии.

В связи с этим разработка энергоэффективного электротехнического комплекса с использованием газообразного энергоносителя является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности направления исследования.

Исследования в направлении, связанном с повышением надежности и экономичности электротехнических комплексов нефтегазодобычи, удаленных от централизованных источников электроснабжения, проводились рядом авторов, в т.ч. Абрамовичем Б.Н., Богуславским Э.И., Дядькиным Ю.Д., Егоровым А.В., Ершовым М.С., Забарным В.Г., Лимитовским А.М., Новоселовым Ю.Б., Полищуком В.В., Фрайштетером В.П., М. Воусе, A.von Meier.

Однако, несмотря на значительный объем работ, к настоящему времени не решен ряд задач, включая обоснование структуры электрогенерирующих комплексов с бинарным циклом, в которой обеспечивается электромагнитная совместимость основного и вспомогательного генераторов в условиях их различных уровней и частот напряжений, а также обеспечение параллельной работы комплексов между собой и электрической сетью переменного тока. Не обоснован вопрос числа и мощности электроустановок с

бинарным циклом генерации применительно к электроснабжению кустовых площадок.

Соответствие темы работы паспорту научной специальности.

Область исследований диссертационной работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»:

Пункт 2. Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем.

Пункт 3. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

Пункт 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Цель работы: Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса нефтегазовых предприятий, которые не имеют подключения к централизованной энергосистеме, путем использования бинарных электроустановок.

Идея работы: Использование бинарного цикла генерации электрической энергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий с возможностью регулирования выходных параметров в соответствии с показателями графиков энергетических нагрузок потребителей позволит увеличить коэффициент полезного действия преобразования энергии первичного энергоносителя в электрическую энергию, тем самым повысить его энергоэффективность.

Основные задачи исследований:

1. Экспериментальные исследования параметров режима потребления электрической энергии объектами предприятий нефтегазовой отрасли в соответствии с показателями графиков энергетических нагрузок;
2. Обоснование структуры и параметров электротехнического комплекса с бинарными электроустановками, а

также последующая разработка системы комплексного энергоснабжения объектов нефтяных и газовых предприятий;

3. Обеспечение эффективной совместной работы силовых элементов разработанного электротехнического комплекса при их включении через звено постоянного тока;

4. Осуществление компенсации высших гармонических составляющих напряжения, возникающих при синхронизации электрогенераторов, входящих в структуру электротехнического комплекса с бинарными электроустановками, с системой электроснабжения нефтегазового предприятия;

5. Техничко-экономическое обоснование эффективности эксплуатации электротехнического комплекса с бинарными электроустановками в условиях нефтяных и газовых предприятий, не имеющих подключения к единой энергосистеме.

Научная новизна работы

Предложена структура электротехнического комплекса, позволяющая повысить коэффициент полезного действия преобразования энергетического потенциала первичного энергоносителя в электрическую энергию до 55 %, и при этом обеспечить нормированные показатели её качества;

установлены закономерности влияния показателей графиков энергетической нагрузки потребителей нефтегазовых предприятий на режимы работы бинарного электротехнического комплекса;

разработан алгоритм управления работой бинарного электротехнического комплекса, отличающийся тем, что он позволяет варьировать выходные параметры генерируемой энергии с учётом показателей графиков энергетической нагрузки потребителей;

разработанные имитационные модели бинарного электротехнического комплекса позволяют проводить исследования режимов функционирования системы при параллельной работе электроустановок, входящих в структуру комплекса.

Теоретическая и практическая ценность:

1. Разработана структура электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии, обеспечивающего преобразование энергии первичного энергоносителя в электрическую энергию с коэффициентом

полезного действия до 55% в соответствии с показателями графиков электрических нагрузок нефтегазовых предприятий.

2. Выявлены критерии выбора режима работы электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии, позволяющие обеспечить его эффективную работу с учётом показателей графиков электрической нагрузки нефтегазовых предприятий и условий окружающей среды.

3. Обоснована экономическая целесообразность применения электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии для повышения надежности электроснабжения технологических потребителей.

4. Получены патенты на изобретение Российской Федерации № 2567112 и № 2626182.

Методология и методы исследования

В работе использованы методы теории электрических цепей, теории систем электроснабжения электротехнических комплексов, теории термодинамики и гидравлики, численные методы решения уравнений, графического построения в среде MS Visio, теория планирования эксперимента, численного анализа с использованием пакета MATLAB, MS Excel, экспериментальных исследований электротехнических и энергетических комплексов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Электротехнический комплекс с повышенными энергетическими характеристиками для автономного электропитания объектов нефтегазовых предприятий при использовании в качестве энергоносителя газообразного топлива должен выполняться в виде бинарной электроустановки при включении в её состав основного и вспомогательного генераторов переменного тока, силовых полупроводниковых преобразователей, подключенных к общей шине постоянного тока, и инвертора напряжения с системой управления, обеспечивающей электромагнитную совместимость составляющих компонент комплекса, с возможностью эксплуатации установки в режимах когенерации и тригенерации.

2. Разработанная структура и алгоритм управления режимом электропитания электротехнического комплекса нефтегазовых предприятий с бинарными электроустановками позволяют

осуществить согласование параметров и синхронизацию основного и вспомогательного генераторов, а также распределение генерации электрической энергии в соответствии с заданными параметрами графиков электрической нагрузки потребителей с возможностью обеспечения требуемых показателей качества электрической энергии.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы базируется на использовании методов теории электрических цепей, электрических машин, систем электроснабжения электротехнических комплексов, компьютерного моделирования в среде MATLAB Simulink, экспериментальных исследований электротехнических комплексов нефтегазовых предприятий.

Реализация результатов работы

Структура разработанного электротехнического комплекса и алгоритм управления им принят к использованию в компаниях ПАО «Татнефть» и ПАО «Газпром».

Личный вклад автора

Разработана структура электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии на основе двух генераторных электроустановок и силовых полупроводниковых преобразователей, в которой энергетический потенциал отходящих газов основного электроагрегата может быть использован как для генерации дополнительного количества электрической энергии, так и для производства тепловой энергии и холода. Выполнено обоснование параметров разработанного электротехнического комплекса для обеспечения электроэнергией потребителей нефтегазовых предприятий. Разработан алгоритм управления электротехническим комплексом в соответствии с показателями графиков электрических нагрузок предприятия.

Апробация работы. Работа была апробирована на 12 конференциях, в т.ч.: 17-я международная научная конференция "ICOGST - 2015", 2015 г., г. Цюрих, Швейцария; семинар участников программы DAAD «Михаил Ломоносов», 2016 г., г. Бонн, Германия; конференция стипендиатов совместных программ Минобрнауки РФ и DAAD «Михаил Ломоносов» и «Иммануил Кант» 2017 г., г. Москва; Русско-немецкий газовый форум, 2017 г., г.

Фрайберг, Германия; VIII научно-практическая конференция молодых ученых и специалистов ООО «Газпром подземремонт Уренгой», 2017 г., г. Санкт-Петербург; Второй Германо-Российский форум по природному газу «Сжиженный природный газ. Проблемы и пути решения», 2018 г., г. Москва; III Международная научно-практическая конференция «Бурение скважин в осложненных условиях», 2018 г., г. Санкт-Петербург.

Публикации. Результаты диссертации в полной мере освещены в 8 печатных работах, из них 4 в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования России, 3 - в изданиях, цитируемых БД Scopus и Web of Science; получены 2 патента на изобретение РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, содержит 46 рисунков, 13 таблиц, список литературы из 120 наименований. Общий объем диссертации 155 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования.

В главе 1 рассмотрены современные способы автономного электроснабжения предприятий нефтегазового комплекса. Приведены характеристики электроагрегатов, обеспечивающих электропитание нагрузки в промышленных условиях, а также представлены схемы когенерационного и тригенерационного энергоснабжения производственных потребителей. Выявлены научно-технические проблемы применения электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии для эффективного электроснабжения нефтегазовых предприятий.

В главе 2 проанализированы схемы электротехнических комплексов, используемых для автономного электроснабжения нефтегазовых предприятий, приведены результаты исследований характера электропотребления на примере производственных объектов нефтегазовых предприятий. Представлена разработанная структура электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии. Обоснована целесообразность эксплуатации электротехнического комплекса в бинарном цикле генерации электрической энергии.

В главе 3 обоснована необходимость использования силовых фильтров для компенсации высших гармоник, источником которых является силовой преобразователь, входящий в состав электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии. Выполнен расчет параметров силовых пассивных фильтров высших гармоник для интеграции в структуру комплекса. Обоснована целесообразность применения силовых активных фильтров.

В главе 4 разработан алгоритм и система управления турбогенераторами в составе электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии. Проведен анализ вариантов синхронизации генераторов. Разработана схема синхронизации генераторов основной и вспомогательной электроустановок на общих шинах постоянного тока с учётом рабочих параметров основного генератора.

В главе 5 выполнено технико-экономическое обоснование разработанного электротехнического комплекса для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий. Приведена эколого-экономическая оценка использования попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя при генерации электрической энергии.

Заключение отражает обобщенные выводы по результатам исследований в соответствии с целью и решаемыми задачами.

По результатам проведенных исследований на защиту выносятся следующие положения:

1. Электротехнический комплекс с повышенными энергетическими характеристиками для автономного электропитания объектов нефтегазовых предприятий при использовании в качестве энергоносителя газообразного топлива должен выполняться в виде бинарной электроустановки при включении в её состав основного и вспомогательного генераторов переменного тока, силовых полупроводниковых преобразователей, подключенных к общей шине постоянного тока, и инвертора напряжения с системой управления, обеспечивающей электромагнитную совместимость составляющих компонент комплекса, с возможностью

эксплуатации установки в режимах когенерации и тригенерации.

С увеличением объемов добычи нефти и газа и удаления перспективных запасов от централизованных энергосистем актуальной является задача эффективного энергоснабжения проводимых работ. При этом в настоящее время доля энергетической составляющей в себестоимости добычи нефти и газа может превышать 50%.

В ходе работы был проведен комплексный анализ графиков электрических нагрузок ряда действующих нефтяных месторождений. Объектами исследования в диссертационной работе являются энергоцентры ПАО «Газпром», ПАО «Гатнефть» и ООО «Лукойл-Коми». На данных объектах проводились экспериментальные исследования на базе 59 эксплуатирующихся газогенераторных установок суммарной мощностью 13320 кВт, в т.ч. 40 газотурбинных установок мощностью 6995 кВт и 19 газопоршневых установок мощностью 6325 кВт. В условиях нефтяных и газовых месторождений была определена возможность применения режима когенерации, а в условиях газотранспортных предприятий - режима тригенерации, позволяющих повысить коэффициент использования энергетического потенциала первичного энергоносителя в виде природного и попутного нефтяного газа (ПНГ). Однако также было установлено, что, несмотря на высокую эффективность применения этих режимов эксплуатации электроагрегатов, получаемую энергию не всегда возможно утилизировать в полном объеме. В периоды высоких температур окружающего воздуха остается значительное количество невостребованной тепловой энергии, и эффективность преобразования энергетического потенциала первичного энергоносителя падает. Дополнительное получение энергии холода повышает данный показатель, однако общий КПД энергосистемы не превышает 64% (рисунок 1).

Более того, исследование нагрузки в условиях нефтяных месторождений показало, что показатели графиков потребления электрической энергии производственными объектами варьируются в широких пределах в течение суток.

С учетом невозможности полного использования полученной тепловой энергии и варьирования потребления электрической энергии электротехнический комплекс нефтегазовых предприятий целесообразно эксплуатировать в бинарном режиме генерации электрической энергии, позволяющим регулировать выходные параметры электроснабжения производственных и сопутствующих объектов.

Бинарный цикл генерации электрической энергии представляет собой совместное использование микрогазотурбинного электроагрегата (МГТЭА) и паротурбинного электроагрегата (ПТЭА) для выработки электрической энергии. Отходящие газы МГТЭА с высоким остаточным энергетическим потенциалом используются для передачи энергии низкокипящей среде, пары которой вращают паровую турбину, приводящую вспомогательный генератор. Выбор МГТЭА в качестве основной электроустановки обусловлен использованием в качестве топлива попутного нефтяного газа с повышенным содержанием сероводорода. В виду конструктивных особенностей и высокой частоты вращения ротора МГТЭА обеспечивается возможность утилизации ПНГ с долей H_2S до 7% в виде энергоносителя. При этом мероприятия по доведению нефтяного газа до требуемых норм качества при его применении в традиционных газогенераторных установках сделают утилизацию ПНГ нецелесообразной. В электротехническом комплексе с бинарным циклом генерации электрической энергии также возможна генерация тепловой энергии или энергии холода в случае наличия свободного остатка располагаемой мощности установки с учётом показателей графиков энергетических нагрузок потребителей.

Потенциал производства электрической энергии в электротехническом комплексе с бинарными электроустановками зависит от остаточного энергетического потенциала отходящих газов основного электроагрегата. В результате исследований, проведенных на энергетических объектах ПАО «Татнефть» установлено, что для газотурбинных установок соотношение между мощностью, которую можно использовать для генерации электрической энергии в бинарном цикле, и электрической мощностью основной установки составляет 2:1. Для газопоршневых

установок, имеющих более высокий электрический КПД, данное соотношение принимается равным 1,5:1.

На основе полученных данных по режимам работы электроагрегатов установлено, что электрическая мощность генераторов в структуре электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии при использовании МГТЭА в качестве основной установки может быть определена по формуле:

$$P_{б.ц.} = P_n + (2 \cdot P_n \cdot K_{ти} \cdot K_з \cdot K_n) \cdot \alpha \quad (1)$$

где P_n – номинальная мощность основной электроустановки, кВт; $K_{ти}$ – коэффициент технического использования установки; $K_з$ – коэффициент загрузки по установке; K_n – коэффициент, учитывающий потери мощности с отходящими газами; α – коэффициент преобразования мощности остаточного энергетического потенциала основной электроустановки (0,1-0,22).

Значения коэффициентов загрузки и технического использования электроагрегатов отдельных энергетических объектов были определены в ходе анализа. Коэффициент технического использования для газотурбинных установок составил 0,79-0,84. Коэффициент загрузки агрегатов составил 0,8-0,9. коэффициент, учитывающий потери мощности с отходящими газами равнялся 0,9.

С учетом (1) КПД преобразования энергетического потенциала первичного энергоносителя в электрическую энергию при эксплуатации электроустановок в бинарном режиме генерации электрической энергии достигает 55% (рисунок 2). При этом в электротехническом комплексе сохраняется возможность использования режимов когенерации и тригенерации.

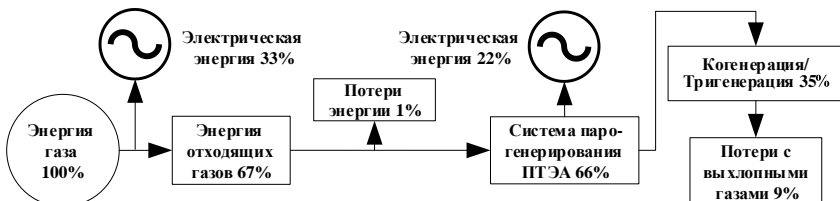
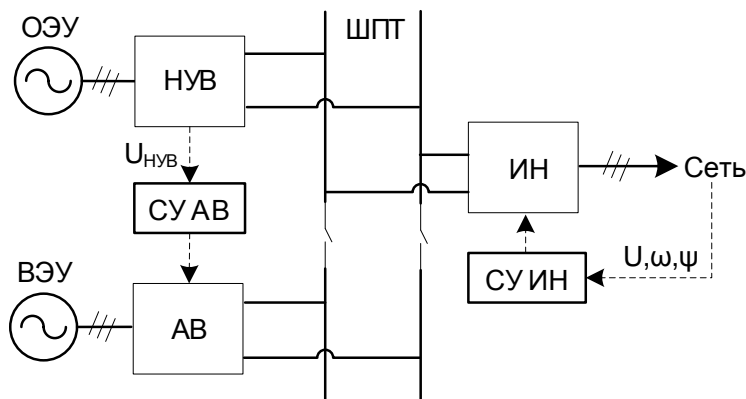


Рисунок 2 – Структура преобразования параметров энергетического потенциала первичного энергоносителя

В виду высокой скорости вращения ротора основного генератора, а также варьирующихся характеристик привода вспомогательного генератора, для согласования взаимодействия электрогенераторов между собой через общие шины постоянного тока, и организации параллельной работы с сетью нефтегазового предприятия в структуру электротехнического комплекса необходимо включить неуправляемый и активный выпрямители напряжения и инвертор напряжения (рисунок 3). При этом должны обеспечиваться нормированные показатели качества электрической энергии.



ОЭУ – основная электроустановка; ВЭУ – вспомогательная электроустановка; НУВ – неуправляемый выпрямитель напряжения; АВ – активный выпрямитель напряжения; СУ АВ – система управления активным выпрямителем; ШПТ – шина постоянного тока; ИН – инвертор напряжения; СУ ИН – система управления инвертором напряжения, U , ω , ψ – значения напряжений, угловых частот, фазы напряжения

Рисунок 3 – Структурная схема электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии

Таким образом, в диссертационной работе был разработан электротехнический комплекс с бинарным циклом генерации электрической энергии (патент на изобретение РФ № 2626182), и возможностью параллельного использования режимов когенерации или тригенерации, при этом обеспечивается наиболее полная утилизация энергетического потенциала первичного энергоносителя с питанием потребителей электрической энергией согласно показателям графиков нагрузок предприятия.

2. Разработанная структура и алгоритм управления режимом электропитания электротехнического комплекса нефтегазовых предприятий с бинарными электроустановками позволяют осуществить согласование параметров и синхронизацию основного и вспомогательного генераторов, а также распределение генерации электрической энергии в соответствии с заданными параметрами графиков электрической нагрузки потребителей с возможностью обеспечения требуемых показателей качества электрической энергии.

По результатам сравнительного анализа различных способов организации совместной работы генераторов в диссертационной работе разработана система генерирования электрической энергии (патент на изобретение РФ № 2567112) с использованием силовых полупроводниковых преобразователей и фильтрокомпенсирующих устройств. Данная структура позволяет организовать совместную работу генераторов в составе электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии, при этом электроснабжение потребителей осуществляется в соответствии с параметрами графиков электрических нагрузок с обеспечением нормированных показателей качества электрической энергии.

Разработанная схема предполагает работу на общие шины постоянного тока с двойным преобразованием параметров генерируемой электрической энергии. Для этого генератор МГТЭА подключен к неуправляемому выпрямителю напряжения. Высокочастотное переменное напряжение преобразуется выпрямителем в постоянное с учетом требований сети нефтегазового предприятия. Так как при использовании энергетического потенциала отходящих газов МГТЭА для генерации электрической энергии рабочие параметры ПТЭА могут варьироваться, генератор ПТЭА подключен к активному выпрямителю, который обеспечивает соответствие генерируемой величины напряжения значению на выходе неуправляемого выпрямителя.

Для оценки эффективности электротехнического комплекса было проведено компьютерное моделирование в среде MATLAB Simulink (рисунок 4) с основным и вспомогательным генераторами,

параметры которых приведены в таблице 1. При соотношении мощностей основного и вспомогательного генераторов 4,8 результаты компьютерного моделирования практически совпадают.

Таблица 1 – Характеристики основной и вспомогательной электроустановок

Основная электроустановка	
Максимальная полезная электрическая мощность, кВт	600
Амплитуда генерируемого напряжения, В	173
Частота вырабатываемого тока, Гц	1000
Вспомогательная электроустановка	
Максимальная полезная электрическая мощность, кВт	125
Амплитуда генерируемого напряжения, В	77
Частота вырабатываемого тока, Гц	450

Напряжение неуправляемого выпрямителя $U_{d_нуб}$ напрямую зависит от частоты вращения синхронного генератора ОЭУ и, как следствие, не может изменяться скачкообразно. На рисунке 5 показаны осциллограммы выходного напряжения НУВ и АВ при колебаниях напряжения основной электроустановки электротехнического комплекса.

Диапазон значений напряжения находится в пределах $286 \text{ В} \pm 10 \%$. Напряжения $U_{d_нуб}$ и $U_{d_ав}$ в момент времени $t = 0$ равны установившемуся значению, так как АВ подключается к шинам постоянного тока при работе ОЭУ в режиме максимальной мощности после зарядки выходного конденсатора. В установившемся режиме работы подстройка выходного напряжения АВ происходит менее чем за 0,1 с, что позволяет минимизировать протекание уравнивающих токов при колебаниях напряжения.

Индуктивность соединительных шин способствует уменьшению величины уравнивающих токов. Биения этих токов обусловлены разностью частот пульсаций выходного напряжения НУВ и несущей частоты АВ (рисунок 6 а, б).

Для описания процессов, протекающих на шинах постоянного тока, при компьютерном моделировании в среде MATLAB Simulink статическая характеристика активного выпрямителя представлялась в виде:

$$U_{d_ав} = \frac{\frac{3}{4} M_a U_c \frac{R}{z^2} (r \cos \varphi_m - x \sin \varphi_m)}{1 + \frac{3}{8} M_a^2 \frac{rR}{z^2}} \quad (2)$$

где $U_{d_ав}$ – напряжение на выходе активного выпрямителя, В; M_a – коэффициент амплитудной модуляции; U_c – напряжение сети, В; R – сопротивление нагрузки, Ом; $z = \sqrt{x^2 + r^2}$ – полное сопротивление контура со стороны сети, Ом; r, x – активное и реактивное сопротивления контура, образованного сетью, буферным реактором и полупроводниковыми ключами, Ом; φ_m – фаза между напряжением модуляции и напряжением сети.

Коэффициент модуляции активного выпрямителя и величина циркуляционных токов, протекающих между АВ и НУВ, определялись исходя из условия $U_{d_ав} = U_{d_нуб}$ путем компьютерного моделирования электротехнического комплекса в среде MATLAB Simulink. При этом величина небаланса напряжений составляла 1,2 % от среднего значения.

Чтобы обеспечить синхронизацию получаемого переменного напряжения по фазе, в систему генерирования вводится блок фазовой синхронизации, выполняющий фазовую автоподстройку частоты. При этом в качестве опорного сигнала могут быть использованы сигналы трехфазных напряжений, заданные отдельно, либо полученные от централизованной энергосистемы при ее наличии. В случае несоответствия параметров напряжения, блок синхронизации корректирует фазу генерируемого напряжения и изменяет выходной сигнал инвертора на стороне переменного напряжения.

При этом выходное напряжение характеризуется наличием высших гармоник, для компенсации которых на выходе устанавливается пассивный фильтр. В случае недостаточной компенсации гармонических искажений к общей шине также подключается активный фильтр, параметры которого выбираются по остаточному уровню гармоник после работы пассивного фильтра. Такое решение позволяет снизить массогабаритные показатели активного фильтра. В результате обеспечиваются нормированные параметры генераторов и энергосистемы (величина напряжения, частоты, фазового угла, отсутствие высших гармонических

составляющих). Получаемое напряжение подается на общую шину переменного тока для питания нагрузки (рисунок 7).

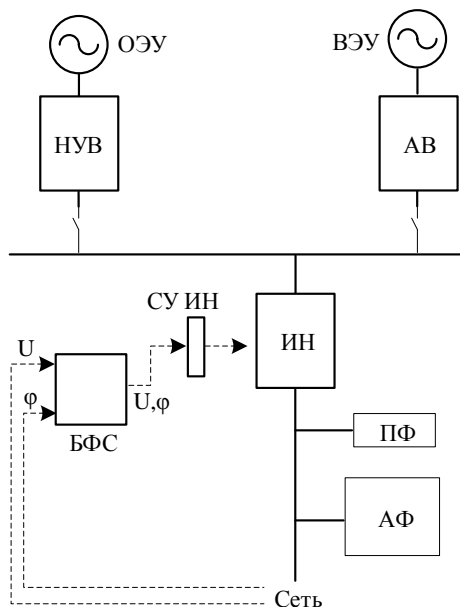


Рисунок 7 – Структурная схема электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии

Компьютерная модель разработанного электротехнического комплекса с фильтрокомпенсирующими устройствами в среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 8. Осциллограммы тока и напряжения в точке присоединения электротехнического комплекса к сети предприятия представлены на рисунке 9.

Таким образом, разработанный электротехнический комплекс с бинарным циклом генерации электрической энергии позволяет наиболее полно использовать потенциал топливного газа при производстве электрической энергии и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, а также снизить высшие гармонические составляющие тока и напряжения при осуществлении бесперебойного электроснабжения удаленных от централизованных сетей потребителей нефтедобычи (рисунок 10).

В диссертационной работе также было выполнено технико-экономическое обоснование разработанного электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии. Осуществлен сравнительный анализ использования для электроснабжения дизель-генераторной установки, одного микрогазотурбинного электроагрегата и бинарной установки. Установлено, что разработанный комплекс обладает наименьшим сроком окупаемости наряду с более высокими техническими характеристиками. Экономический эффект утилизации попутного нефтяного газа рассчитывался как:

$$Ш_{сж.пнг} = \frac{V_{г.н.}(C_{г.н.} + \beta C_{г.сн.})}{1000} \quad (3)$$

где $V_{г.н.}$ - объем газа при сжигании в пределах норматива, тыс. м³ в год; $C_{г.н.}$ - ставка за нормативное сжигание газа на факеле, руб./тыс. м³ в год; $V_{г.сн.}$ - объем газа при сжигании газа сверх норматива, тыс. м³ в год; $C_{г.сн.}$ - ставка за сверхнормативное сжигание газа на факеле, руб./тыс. м³ в год; $\beta = \frac{V_{г.сн.}}{V_{г.н.}}$ - коэффициент отношения объемов сжигания ПНГ сверх и в пределах норматива.

Экономия от использования ПНГ в качестве первичного энергоносителя в электротехническом комплексе с бинарным циклом генерации электрической энергии составила более 31 млн. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации содержится решение актуальной научно-технической задачи повышения надежности и экономичности электроснабжения удаленных объектов нефтегазовых предприятий с использованием природного и попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя в районах, не имеющих доступа к централизованной энергосистеме.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. По результатам теоретических и экспериментальных исследований выявлены основные показатели графиков электрической нагрузки потребителей нефтегазодобычи, позволяющие обосновать требования к автономным электротехническим комплексам, первичным энергоносителем которых является природный или попутный нефтяной газ.

2. Обоснована необходимость использования электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии для увеличения коэффициента полезного действия до 55 % с сохранением возможности генерации тепловой энергии и энергии холода.

3. Разработана структура электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии на основе микрогазотурбинной и паротурбинной установок с силовыми преобразователями, фильтрокомпенсирующими устройствами и системой фазовой синхронизации, обеспечивающего гарантированное энергоснабжение удаленных потребителей нефтегазодобычи.

4. Обоснована необходимость компенсации высших гармоник тока и напряжения активными и пассивными фильтрокомпенсирующими устройствами при электроснабжении удаленных потребителей нефтегазодобычи от разработанного электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии, а также представлена методика выбора основных параметров пассивных фильтрокомпенсирующих устройств для компенсации высших гармоник тока и напряжения.

5. Обоснована возможность параллельной работы генераторов переменного тока различной частоты с активным и неуправляемым выпрямителями в цепях якоря на общие шины постоянного тока при минимизации протекания уравнительных токов.

6. Выполнено технико-экономическое обоснование применения разработанного электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии.

Результаты диссертации опубликованы в следующих основных работах:

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования России:

1. Моренов, В.А. Применение попутного нефтяного газа в качестве энергоносителя // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2012. – №3-2 (154), Серия "Наука и образование". – С. 61-65;

2. Моренов, В.А. Когенерационная установка с бинарным циклом для электроснабжения объектов нефтегазовых предприятий / В.А.

Моренов, В.В. Полищук, А.Н. Касьянова // Естественные и технические науки. – 2015. – № 5. – С. 102-105;

3. Моренов, В.А. Энергообеспечение производственных объектов в условиях севера при кустовом строительстве скважин / В.А. Моренов, Е.Л. Леушева // Территория Нефтегаз. 2015. № 5. С. 92-95;

4. Моренов, В.А. Комбинированная энергетическая установка для энергоснабжения горных предприятий / Б.Н. Абрамович, Ю.А. Сычев, В.А. Моренов // Горное оборудование и электромеханика. – 2016. – № 4 (122). – С. 36-41.

В изданиях, цитируемых БД Scopus и Web of Science:

5. Моренов, В.А. Система комплексного энергоснабжения нефтегазопромыслов с использованием нефтяного газа в качестве энергоносителя / В.А. Моренов, Е.Л. Леушева // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 96–100;

6. Morenov, V. Energy Delivery at Oil and Gas Wells Construction in Regions with Harsh Climate, International Journal of Engineering (IJE) / V. Morenov, E. Leusheva // TRANSACTIONS B: Applications, Vol. 29, No. 2, (February 2016). – P. 274-279;

7. Моренов, В.А. Разработка когенерационного комплекса с бинарным циклом для энергообеспечения нефтегазовых предприятий / В.А. Моренов, Е.Л. Леушева // Нефтяное хозяйство. – 2017. – № 7. – С. 104–106.

Патенты РФ:

8. Патент на изобретение Российской Федерации №2567112 Система генерирования электрической энергии / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Моренов В.А.**, Леушева Е.Л., Турышева А.В., Устинов Д.А.; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (RU); опубл. 10.11.2015, Бюл. № 31 – 9 с.;

9. Патент на изобретение Российской Федерации №2626182 Система генерирования электрической и тепловой энергии / Абрамович Б.Н., Сычев Ю.А., **Моренов В.А.**; заявитель и патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU); опубл. 2015, Бюл. № 21 – 9 с.

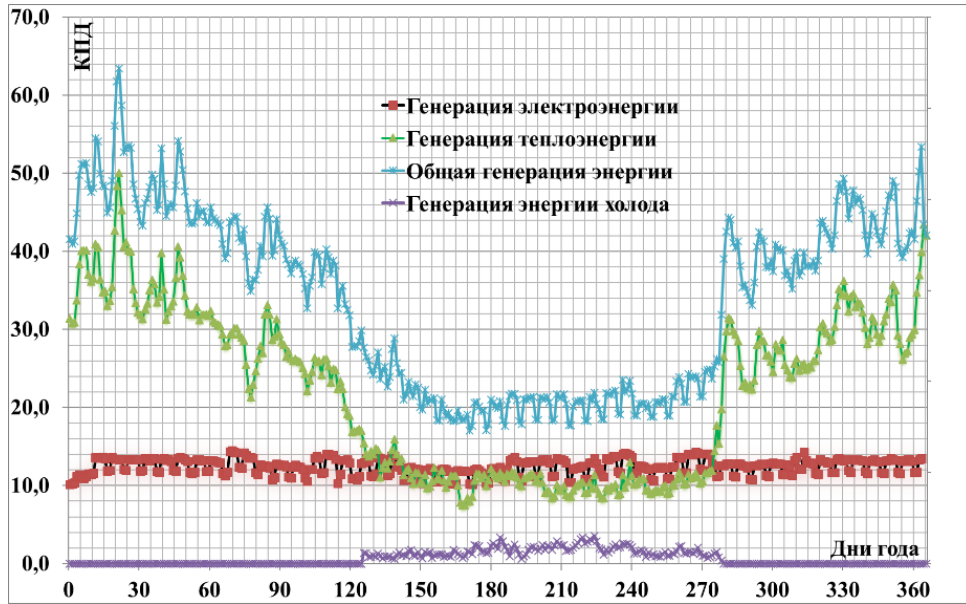


Рисунок 1 – Показатели генерирования энергии в течение года энергоцентром газового предприятия

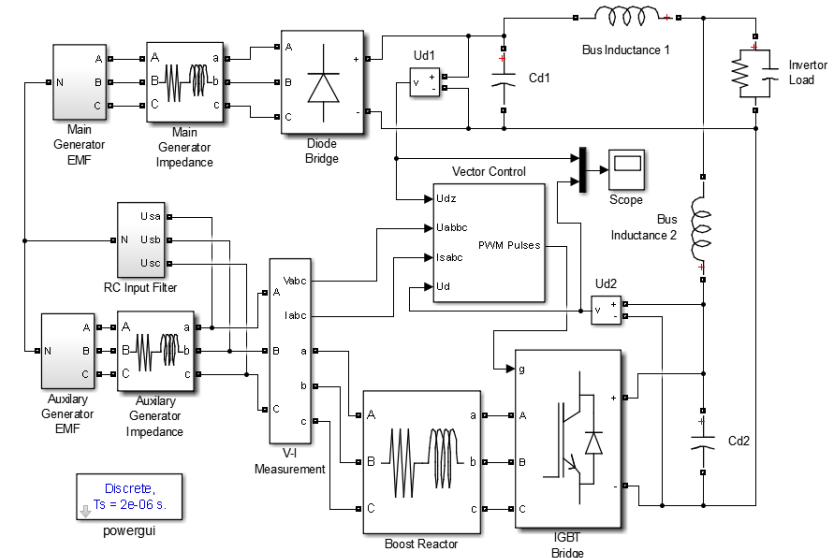


Рисунок 4 – Компьютерная модель электротехнического комплекса с бинарной генерацией электрической энергии при согласовании генераторов через ШПТ в среде MATLAB Simulink

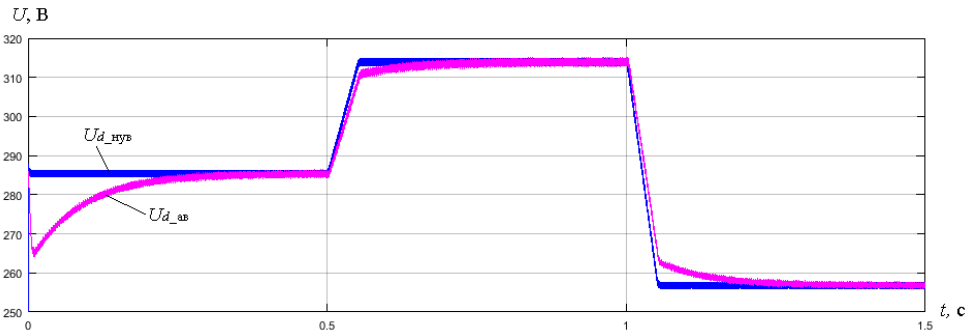


Рисунок 5 – Осциллограммы выходного напряжения НУВ и АВ при колебаниях напряжения основного генератора.

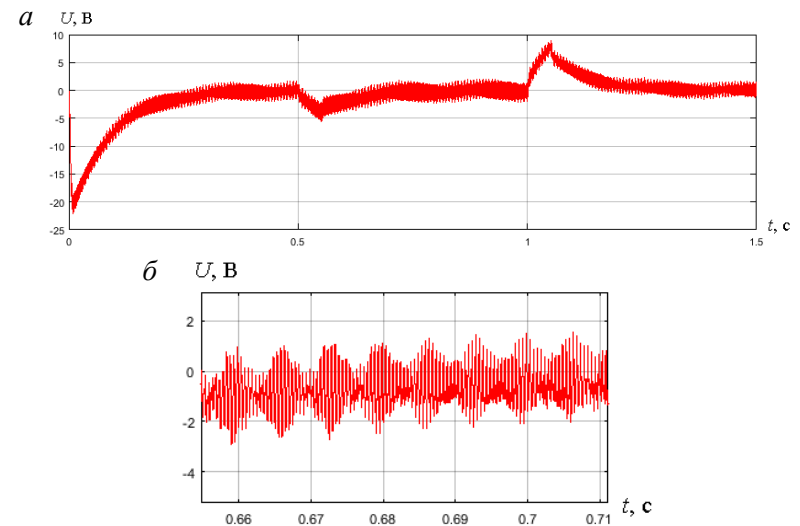


Рисунок 6 – Осциллограммы небаланса напряжений НУВ и АВ.

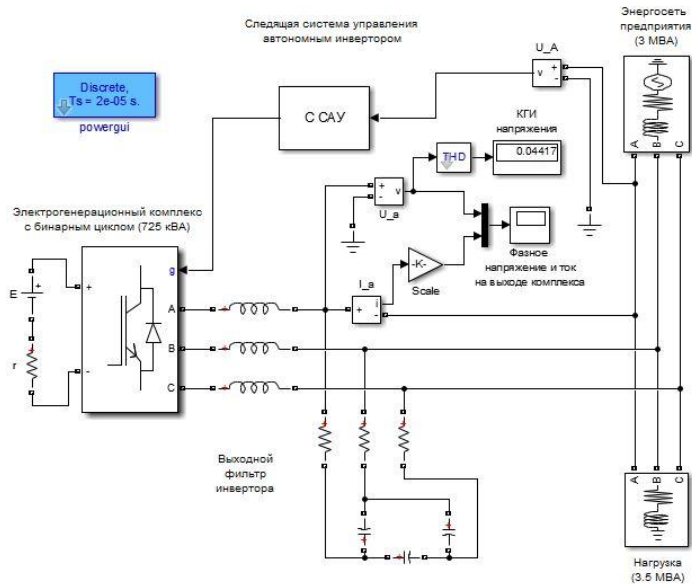


Рисунок 8 – Компьютерная модель, имитирующая синхронизацию электротехнического комплекса с электроэнергетической сетью предприятия в среде MATLAB Simulink

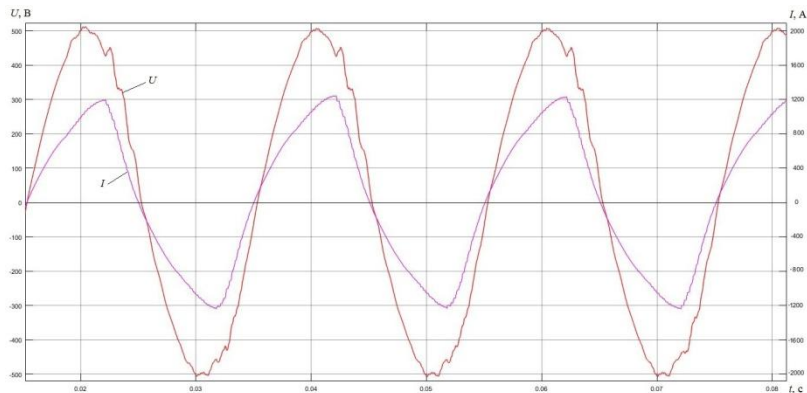


Рисунок 9 – Осциллограммы тока и напряжения в точке присоединения электротехнического комплекса с бинарным режимом генерации электрической энергии к сети предприятия

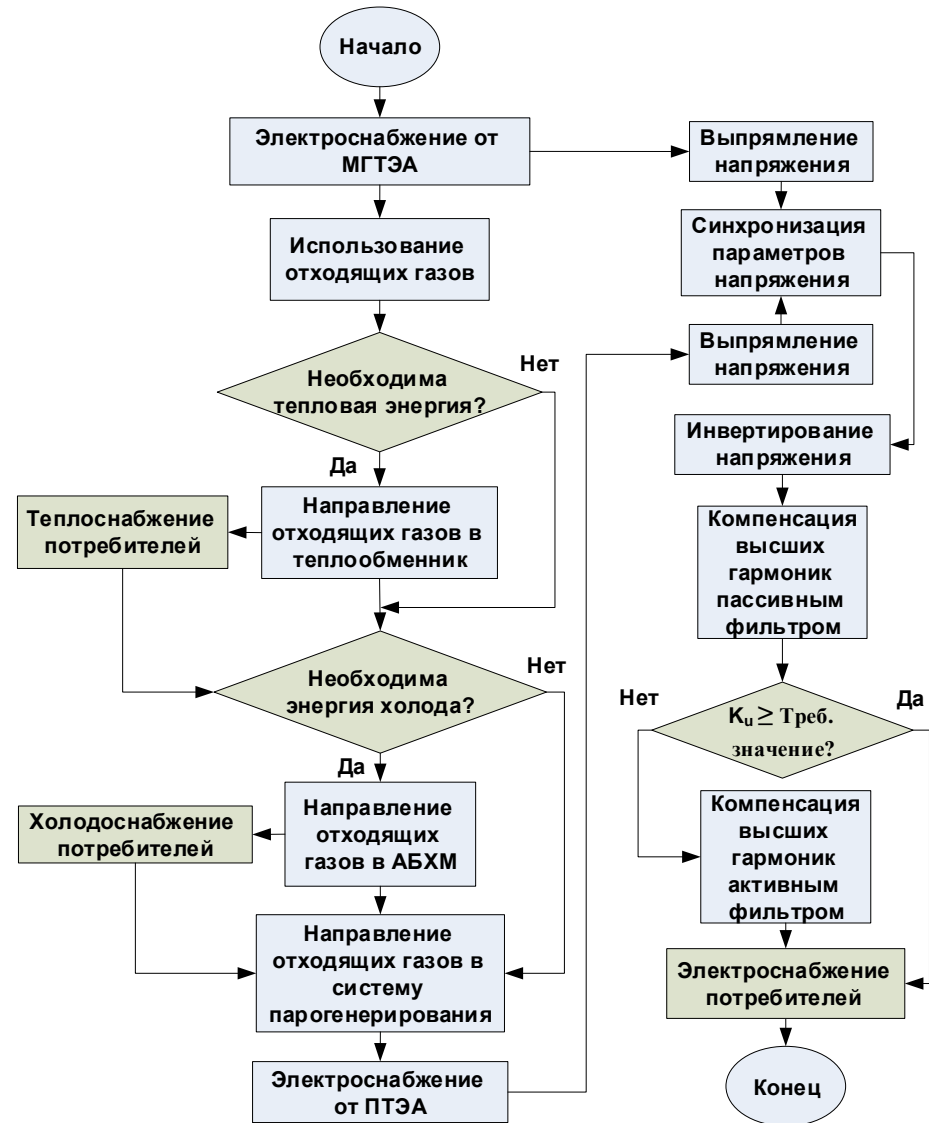


Рисунок 10 – Алгоритм функционирования электротехнического комплекса с бинарным циклом генерации электрической энергии