

На правах рукописи



САЛОВ Роман Алексеевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
С ТУРБИНАМИ КОМБИНИРОВАННОГО ПИТАНИЯ
ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ И СМЕНЕ ТОПЛИВА**

*Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы
и системы*

**Автореферат
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»

Научные руководители:

доктор технических наук, профессор

Шонин Олег Борисович

доктор технических наук, доцент

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Степанов Сергей Федорович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», институт энергетики и транспортных систем, кафедра «Электроэнергетика и электротехника», профессор.

Синюкова Татьяна Викторовна

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

Ведущая организация – ОАО «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения».

Защита диссертации состоится 06 февраля 2020 г. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ212.224.14 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. 1171а.

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

Автореферат разослан 06 декабря 2019 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из наиболее энергоэффективных способов утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) является его использование в качестве топлива для автономных электротехнических комплексов с турбинными генераторными электроустановками, работающими только на ПНГ, и турбинными генераторными электроустановками комбинированного питания. В качестве наиболее важных задач разработки и эксплуатации электротехнических комплексов подобной топологии следует назвать:

1. Обеспечение бесперебойной работы электротехнических комплексов комбинированной топологии в условиях режима смены топлива, возникающего вследствие прекращения поступления ПНГ.

2. Обеспечение бесперебойной работы электропривода газового компрессора, обеспечивающего подачу основного вида топлива к турбинным генераторным установкам электротехнического комплекса, в условиях возникновения провалов напряжения.

Неуспешное завершение режима смены топлива для турбинных генераторных электроустановок комбинированного питания приводит к финансовым затратам, связанным со стоимостью потерянной генерируемой мощности комплекса, и нарушению непрерывного электроснабжения потребителей нефтегазового месторождения.

Возникает необходимость в оценке возможности ликвидации перерывов электроснабжения на основе использования электротехнических средств. Поэтому решение первой поставленной задачи требует совершенствования алгоритмов управления генерируемой электрической мощностью электротехнических комплексов в указанном режиме.

Бесперебойность работы частотно-регулируемого привода (ЧРП) в значительной мере определяется его устойчивостью к возникающим в распределительной сети электроснабжения компрессорной станции выявленным симметричным провалам напряжения глубиной в диапазоне от 10% до 50% и длительностью до 50мс. При снижении напряжения релейная защита отключает привод от сети, нарушая работу газового компрессора и непрерывность технологического процесса подачи ПНГ.

Среди существующих способов компенсации провалов напряжения выделяются способы, основанные на модификации топологий преобразователей и применении специальных алгоритмов управления

ими и позволяющие расширить диапазон регулирования выходного напряжения. В рамках этого направления актуальным подходом является применение преобразователя частоты в виде Z-инвертора напряжения за счет его свойств повышать уровень выходного напряжения без установки дополнительных преобразователей и невосприимчивости к коротким замыканиям в плечах инвертора.

Разработка способа управления Z-инвертором в составе электропривода газового компрессора позволит обеспечить его устойчивую работу при указанных провалах напряжения.

Необходимость решения вышеуказанных задач предопределяет актуальность диссертационной работы.

Степень разработанности исследуемого направления. Проблемами обеспечения электроснабжения потребителей нефтегазового месторождения на основе применения автономных источников на базе турбогенераторных установок занимались многие ученые, среди которых Б. Н. Абрамович, М. С. Ершов, А. Д. Яризов, *R. Vepa* и др. Вопросам разработки способов и алгоритмов управления электротехническими комплексами с турбинами комбинированного питания посвящены исследования Л. И. Бугрима, В. И. Першина, *P. Rivera*, *M. R. B. Tavakoli* и др. Однако в работах авторов уделено недостаточно внимания разработке алгоритмов управления генерируемой мощностью электротехнического комплекса в режиме смены топлива и учету индивидуальных диапазонов регулирования турбинных генераторных установок по активной мощности.

Проблеме повышения устойчивости привода в условиях провалов напряжения посвящены исследования ведущих фирм и университетов, таких как Горный университет, ИГЭУ, *ABB*, *Siemens* и др. Среди ведущих ученых, занимавшихся данными проблемами, следует назвать О. Б. Шонина, А. Е. Козярука, А. Б. Виноградова, А. А. Усольцева, *J. Holtz* и др. Большинство решений основано на применении новых методов управления преобразователем в составе привода.

В последнее время заметное внимание уделяется разработке способов управления Z-преобразователем, позволяющих расширить границы допустимого диапазона снижения напряжения звена постоянного тока. Исследованиям в данной области посвящены работы *F. Z. Peng*, *O. Ellabban*, *R. Strzelecki*, *V. Mierlo*, *P. Lataire*, *Z. Qian*, *X. Ding*, *H. Abu-Rub* и др. Однако в современных публикациях уделяется относительно мало внимания разработке способов управления ЧРП на

базе Z-инвертора в условиях возникновения провалов напряжения глубиной в диапазоне от 10% до 50% и длительностью до 50мс.

Исходя из вышесказанного, **актуальной задачей** является реализация комплексного подхода по обеспечению бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания на основе разработки алгоритма управления его суммарной электрической мощностью и способа управления Z-инвертором в составе электропривода.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы по пунктам: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Объект исследования – электротехнический комплекс с турбинами комбинированного питания и электроприводом газового компрессора, питающий потребителей нефтяного месторождения.

Предмет исследования – алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса и способ управления электроприводом газового компрессора в условиях провалов напряжения.

Цель работы – обеспечение бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания на основе выявления закономерностей перераспределения его суммарной электрической мощности и особенностей компенсаций провалов напряжения на базе Z-инвертора.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных задач:

1. Анализ структур электротехнических комплексов на попутном нефтяном газе и анализ нарушений бесперебойной работы комплекса в режиме смены топлива с последующей разработкой математической и компьютерной моделей для определения влияния на режим работы

электротехнического комплекса перераспределения его суммарной электрической мощности между турбинными генераторными электроустановками различного типа питания.

2. Разработка алгоритма управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса, обеспечивающего его бесперебойную работу в режиме смены топлива как внешнего воздействия.

3. Анализ работы и динамических свойств Z -инвертора для получения передаточных функций преобразователя.

4. Разработка алгоритма выбора параметров Z -инвертора.

5. Разработка способа управления Z -инвертором с учетом особенностей компенсации симметричных провалов напряжения.

6. Разработка модели электропривода газового компрессора и исследование динамических процессов в электроприводе с Z -инвертором для оценки допустимого диапазона снижения напряжения звена постоянного тока при провалах напряжения.

7. Экспериментальная проверка разработанного способа управления Z -инвертором в составе электропривода газового компрессора.

Идея работы. Обеспечение бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинными генераторными электроустановками комбинированного питания достигается путем перераспределения суммарной электрической мощности по разработанному алгоритму, учитывающему диапазоны регулирования по активной мощности турбин различного типа питания, а также обеспечением устойчивой работы электропривода газового компрессора за счет компенсации провалов напряжения на основе разработанного способа управления Z -инвертором.

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и имитационным моделированием процессов в средах *MathCAD* и *Simulink MatLab*. Построение математических моделей инвертора, системы управления и двигателя базируется на основных положениях теории автоматизированного электропривода, теории систем и автоматического управления, теории передачи и распределения электрической энергии и теории цепей.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Для обеспечения бесперебойной работы электротехнического

комплекса с турбинными генераторными электроустановками комбинированного питания в режиме смены топлива как внешнего воздействия управление его суммарной электрической мощностью должно осуществляться в соответствии с разработанным алгоритмом, основанным на распределении суммарной электрической мощности электротехнического комплекса между турбинными генераторными электроустановками согласно полученным зависимостям остаточного давления в системе от активной мощности электроустановок.

2. Устойчивая работа привода газового компрессора электротехнического комплекса с турбинными генераторными электроустановками комбинированного питания при полной загрузке в условиях симметричных провалов напряжения в сети достигается применением разработанного способа управления Z-инвертором, позволяющего обеспечить устойчивую работу привода при минимально допустимом значении напряжения звена постоянного тока до 50% от номинального напряжения.

Научная новизна работы.

1. Выявлены новые закономерности перераспределения суммарной электрической мощности электротехнического комплекса в режиме смены топлива. На основании установленных зависимостей разработан алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса, обеспечивающий его бесперебойную работу в указанном режиме.

2. Разработан алгоритм выбора параметров Z-инвертора в зависимости от значения выходного напряжения, коэффициентов пульсаций, параметров нагрузки и режимов ее работы, отличающийся тем, что обеспечивает работу Z-преобразователя на линейном участке его характеристики. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №20176175283.

3. Выявлена аналитическая временная зависимость изменения напряжения конденсатора звена постоянного тока в условиях симметричных провалов напряжения, на основании которой разработан способ управления Z-инвертором, обеспечивающий бесперебойную работу электропривода газового компрессора.

Теоретическая и практическая значимость исследования:

1. Разработан блок управления Z-преобразователем в составе имитационной модели электропривода газового компрессора, позволяющий определять границы допустимых диапазонов снижения

напряжения звена постоянного тока в условиях симметричных провалов напряжения.

2. Представлены методические рекомендации по обеспечению бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания в виде разработанного алгоритма перераспределения его суммарной электрической мощности.

3. Разработан способ управления Z-инвертором в составе электропривода газового компрессора, обеспечивающий его устойчивую работу при возникновении симметричных провалов напряжения глубиной до 50% и длительностью до 100мс.

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению в учебный процесс Горного университета, а также приняты к внедрению в производственную деятельность АО «Новая ЭРА», что подтверждается соответствующими актом и справкой.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования и сходимостью результатов имитационного моделирования работы Z-инвертора в составе электропривода газового компрессора. Использовано сравнение полученных автором временных зависимостей разряда конденсатора для Z-инвертора при провале напряжения с результатами исследований отечественных и зарубежных ученых.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: международные конференции «Неделя науки СПбПУ» – 2015 и 2017, Санкт-Петербург; международный научно-технический семинар «Современные разработки в области электроснабжения и электропривода» – 2016, Санкт-Петербург; международная конференция «*Efficiency and Sustainability in the Mineral Industry*» – 2016, Фрайберг, Германия; всероссийские научно-практические конференции «Введение в энергетику» – 2016, «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» – 2017 и 2018, Кемерово; международная конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: *IPDME* – 2018, Санкт-Петербург; международные конференции «*IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering*» (*ElConRus*) – 2018 и 2019, Санкт-Петербург; международная конференция «*Topical Issues of Rational Use of Natural Resources*» – 2019, Санкт-Петербург.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; анализе нарушений бесперебойной работы комплекса в режиме смены топлива и в условиях возникающих провалов напряжений; проведении математического и имитационного моделирования работы электротехнического комплекса комбинированной топологии и электропривода на базе Z-инвертора; обобщении и обработке экспериментальных данных; формулировке основных научных положений и выводов, а также в подготовке текстов научных публикаций и диссертации.

Публикации по работе. По теме диссертационного исследования опубликовано 10 работ, в том числе 3 работы в изданиях из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки РФ, и в том числе 3 – в изданиях, индексируемых в международной базе *Scopus*, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, библиографического списка, включающего 115 наименований, и трех приложений. Основная часть диссертационной работы изложена на 125 страницах машинописного текста и содержит 48 рисунков и 10 таблиц.

Благодарность. Автор выражает глубокое уважение и искреннюю признательность своему первому научному руководителю **Шонину Олегу Борисовичу**, ушедшему из жизни на 2 году обучения автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Проблемы обеспечения бесперебойной работы электротехнических комплексов с турбинами комбинированного питания» представлен анализ проблем эксплуатации электротехнических комплексов на ПНГ, приводящих к нарушению бесперебойной работы.

Рассмотрены существующие структуры автономных электротехнических комплексов на ПНГ. Показано, что наиболее эффективной топологией по критерию обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей является комбинированная топология

электротехнического комплекса, включающая турбинные генераторные электроустановки комбинированного питания.

Показано, что режим смены топлива вызывается прекращением поступления ПНГ к электротехническому комплексу. Неуспешное завершение режима приводит к полной остановке комплекса и нарушению электроснабжения потребителей нефтегазового месторождения. Выявлено, что существующие алгоритмы управления распределяют суммарную электрическую мощность электротехнического комплекса равномерно между всеми электроустановками и не учитывают их индивидуальных диапазонов регулирования по активной мощности.

Нарушение бесперебойной работы электротехнического комплекса также может быть вызвано нарушением устойчивой работы электропривода газового компрессора из-за провалов напряжения, возникающих в распределительной сети электроснабжения компрессорной станции, получающей питание от централизованной энергосистемы. Установлено, что наиболее часто возникающими провалами являются симметричные провалы напряжения глубиной в диапазоне от 10% до 50% от номинального значения напряжения и длительностью 10-50мс (рисунок 1¹).

Сравнительный анализ современных способов обеспечения устойчивости ЧРП к провалам напряжения выявил, что они не позволяют обеспечить компенсацию установленных провалов напряжения. Ввиду этого выделено новое направление – модификация топологий преобразователей и использование специальных алгоритмов управления ими, в рамках которого сделан акцент на применении в составе ЧРП Z-инвертора, обеспечивающего повышение уровня выходного напряжения без установки дополнительных преобразователей.

Проведенный анализ исследований в области Z-инверторов показал, что в современных публикациях не в полной мере рассмотрены вопросы разработки систем управления Z-преобразователем и способов управления ЧРП на его базе в условиях возникновения выявленных провалов напряжения.

Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

¹ Рисунки 1, 2 и 5 представлены на вкладке

Во второй главе «Обеспечение бесперебойной работы электротехнического комплекса комбинированной топологии в условиях смены топлива» представлены теоретические исследования влияния режима смены топлива на режим работы электротехнического комплекса комбинированной топологии, на основании которых предложен алгоритм перераспределения суммарной электрической мощности комплекса, обеспечивающий его бесперебойную работу при указанном внешнем воздействии.

Содержание второй главы раскрывает первое защищаемое положение.

Дано описание технологического процесса рассматриваемого объекта исследований, работающего в автономном режиме от единой энергосистемы, и представлена его структурная схема (рисунок 2).

Проведен анализ временных осциллограмм режима смены топлива. Выявлено, что основной причиной нарушения бесперебойной работы электротехнического комплекса является равномерное распределение его суммарной электрической мощности между электроустановками, приводящее к падению остаточного давления в системе со скоростью более 20кПа/с, что превышает значение уставки.

Для решения поставленной задачи выдвинута гипотеза о существовании связи режима смены топлива с распределением суммарной электрической мощности комплекса между электроустановками.

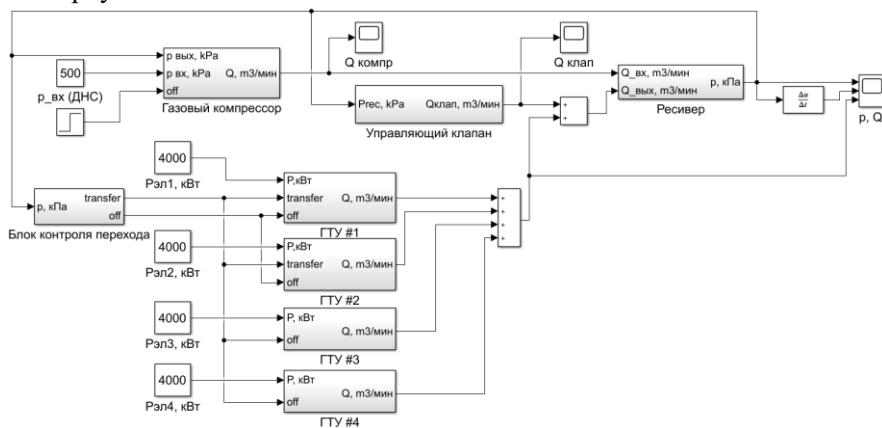


Рисунок 3 – Компьютерная модель электротехнического комплекса

Для ее опровержения разработаны математическая и компьютерная модели электротехнического комплекса комбинированной топологии, представленного совокупностью блоков, связанных между собой выполняемыми функциями (рисунок 3).

Исследование режима работы электротехнического комплекса при различных начальных условиях, определяемых значениями активной мощности турбинных генераторных электроустановок, проводилось с учетом установленных критериев. За исходные данные приняты параметры рассматриваемого объекта исследований – Хасырейского электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания: суммарная электрическая мощность комплекса равна 35 МВт, диапазон регулирования битопливных электроустановок по активной мощности от 0,5 до 4,5 МВт и диапазон регулирования однопаливных электроустановок по активной мощности от 1,0 до 7,5 МВт. В результате исследований получены зависимости, отражающие влияние активной мощности турбинных генераторных электроустановок на остаточное давление в системе в режиме смены топлива как внешнего воздействия (рисунок 4).

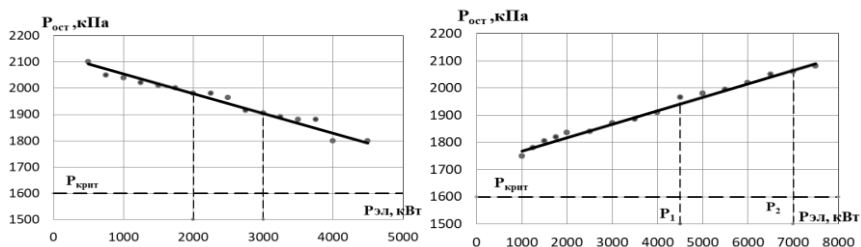


Рисунок 4 – Зависимости остаточного давления в системе от активной мощности, генерируемой битопливными (слева) и однопаливными (справа) электроустановками

Полученные зависимости определяют диапазоны регулирования турбинных генераторных электроустановок по активной мощности. Перераспределение большей части суммарной электрической мощности комплекса на турбинные электроустановки комбинированного питания приводит к значительному снижению остаточного давления в системе, в то время как увеличение нагрузки на однопаливные турбинные электроустановки – к повышению остаточного давления в системе.

Исходя из этого, суммарную электрическую мощность электротехнического комплекса комбинированной топологии

необходимо распределять так, чтобы на турбинные генераторные электроустановки комбинированного питания приходилась ее наименьшая доля.

Таким образом, в ходе проведенных исследований выдвинутая гипотеза не была опровергнута, что подтверждает ее достоверность.

На основании проведенных исследований разработан алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса (рисунок 5), суть работы которого заключается в распределении указанной мощности в соответствии с полученными зависимостями с учетом установленных в ходе исследования диапазонов работы по активной мощности турбинных генераторных электроустановок. Это позволяет обеспечить бесперебойную работу комплекса в режиме смены топлива.

В конце второй главы сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе «Теоретические исследования работы Z-инвертора напряжения при компенсации симметричных провалов напряжения» проведены теоретические исследования работы Z-инвертора напряжения при компенсации симметричных провалов напряжения.

Суть работы Z-инвертора заключается в накоплении энергии в L и C -элементах в течение периода короткого замыкания (КЗ) для последующей ее передачи в нагрузку в активном режиме (рисунок 6),

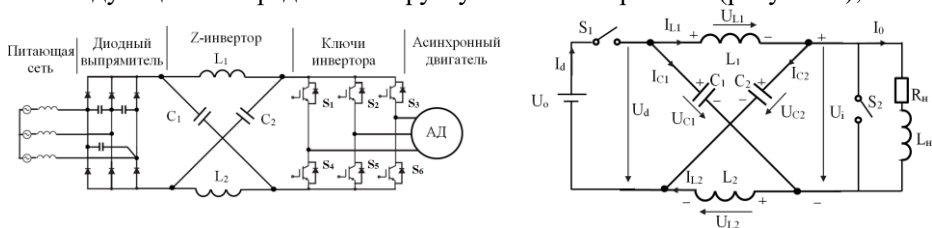


Рисунок 6 – Функциональная схема ЧРП с Z-инвертором (слева) и схема замещения Z-инвертора (справа)

где: U_0 – напряжение источника, В; U_d , I_d – напряжение и ток на входе Z-инвертора, В, А; U_L , I_L – напряжение и ток катушки индуктивности, В, А; U_C , I_C – напряжение и ток конденсатора, В, А; I_0 – ток нагрузки, А; U_i – напряжение ЗПТ, В; R_n , L_n – сопротивление и индуктивность нагрузки, Ом, Гн; ключ S_1 моделирует работу диодного выпрямителя, S_2 моделирует работу полупроводниковых ключей инвертора.

Режим КЗ образуется при одновременном замыкании двух транзисторных ключей в одном, двух или сразу трех плечах фазы.

Получены выражения для установившегося режима работы Z-инвертора:

$$U_C = U_0 \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0} \quad I_L = I_0 \frac{1 - D_0}{1 - 2D_0}, \quad (1)$$

где: $D_0 = T_0 / T_s$ – скважность состояния КЗ для Z-инвертора, равная отношению длительности указанного состояния T_0 ко времени всего цикла коммутации T_s .

В результате сравнительного анализа способов внедрения импульсов состояния КЗ Z-инвертора в цикл коммутации на основании сложности построения системы управления, уровня пульсаций переменных состояния и уровня гармонических искажений в выходном линейном напряжении и выходном фазном токе, выбран простой способ модуляции.

В целях осуществления дальнейшего синтеза системы управления проведено динамическое моделирование. Получены передаточные функции Z-инвертора, показавшие, что динамика изменения переменных состояния в значительной мере определяется скважностью состояния КЗ D_0 :

$$G_{ud}(s) = \frac{a_3 s^2 + a_4 s + a_5}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0} \quad G_{id}(s) = \frac{a_8 s^2 + a_9 s + a_{10}}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}, \quad (2)$$

где: $a_3 = LL_{\text{H}}(-2I_L + I_0)$;

$a_4 = (1 - 2D)(2U_C - U_0)L_{\text{H}} + R_{\text{H}}L(-2I_L + I_0) + L(1 - D)(2U_C - U_0)$;

$a_5 = R_{\text{H}}(1 - 2D)(2U_C - U_0)$;

$a_8 = L_{\text{H}}C(2U_C - U_0)$;

$a_9 = CR_{\text{H}}(2U_C - U_0) + (-2I_L + I_0)(2D - 1)L_{\text{H}}$;

$b = \begin{bmatrix} LL_{\text{H}}C & LCR_{\text{H}} & 2(1 - D)^2 L + L_{\text{H}}(2D - 1)^2 & R_{\text{H}}(2D - 1)^2 \end{bmatrix}$

Разработан алгоритм выбора параметров Z-преобразователя, обеспечивающий его работу на линейном участке характеристики и получено свидетельство о государственной регистрации разработанной программы для ЭВМ №20176175283 «Программа для вычисления параметров Z-инвертора с активно-индуктивной нагрузкой».

Для выбранного способа модуляции Z-инвертора параметры C и L определяются по полученным выражениям:

$$C = \frac{3T_s I_m \cos \varphi \cdot (2U_m - U_0)}{8k_u U_0 (4U_m - U_0)} \quad L = \frac{2U_0 T_s (2U_m - U_0)}{3k_i I_m \cos \varphi (4U_m - U_0)}, \quad (3)$$

где: I_m – максимальный фазный ток на стороне AC, A; φ – угол сдвига между током и напряжением; k_u, k_i – коэффициенты пульсаций тока индуктивности и напряжения конденсатора; U_m – максимальное значение выходного фазного напряжения инвертора, В.

В результате проведенных теоретических исследований динамического поведения Z-инвертора в составе ЧРП получено выражение изменения напряжения конденсатора в начальный период возникновения симметричного провала напряжения:

$$CU_C^2(t) + L \left(I_{L0} - \frac{D_0 U_C(t) \cdot t}{(1 - D_0)L} \right)^2 = CU_{C0}^2 + \frac{P_{cp}^2 (1 - D_0)^2 L}{U_{C0}^2} - Pt, \quad (4)$$

где: U_{C0}, I_{L0} – напряжение конденсатора и ток индуктивности в момент возникновения провала напряжения, В, А; P – номинальная мощность двигателя, кВт, P_{cp} – средняя мощность, передаваемая от ЗПТ в нагрузку в течение активного периода, кВт.

Построены кривые разряда конденсатора звена постоянного тока для различных значений параметров Z-инвертора, позволяющие судить об устойчивости ЧРП по скорости изменения напряжения конденсатора и времени достижения значения уставки срабатывания защиты минимального напряжения (рисунок 7).

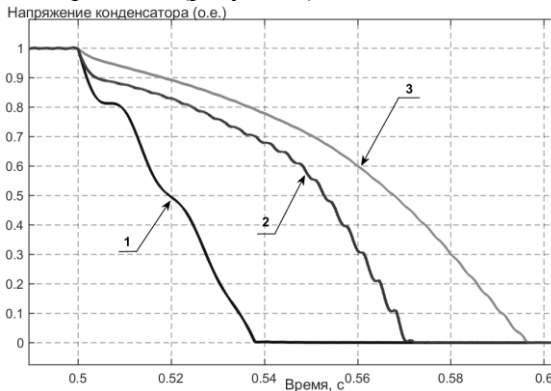


Рисунок 7 – Кривые разряда конденсатора звена постоянного тока

Кривая 1 построена для параметров: $L = 0$, $C = 100$ мкФ и характерна для электропривода стандартной топологии только с одним накопителем энергии в звене постоянного тока; кривая 2 – для параметров, рассчитанных по формуле (3): $L = 250$ мкГн, $C = 100$ мкФ; кривая 3: $L = 250$ мкГн, $C = 1000$ мкФ.

Сравнительный анализ полученных кривых с кривыми разряда других исследователей на основании выделенных критериев, позволил установить, что разрабатываемая топология обеспечивает повышение устойчивости работы привода к симметричным провалам напряжения в 2,6 раза, что достигается регулированием длительности режима КЗ Z-инвертора.

В четвертой главе «Разработка и экспериментальная проверка способа управления Z-инвертором в составе частотно-регулируемого привода при компенсации провалов напряжений» представлены результаты экспериментальной проверки полученных в третьей главе теоретических выражений. Содержание третьей и четвертой глав раскрывают второе защищаемое положение.

Результаты моделирования полученных решений системы переменных состояния в виде передаточных функций в среде *MatLab-Simulink* представлены на рисунке 8. Их адекватность подтверждается идентичностью вида кривых переходных процессов.

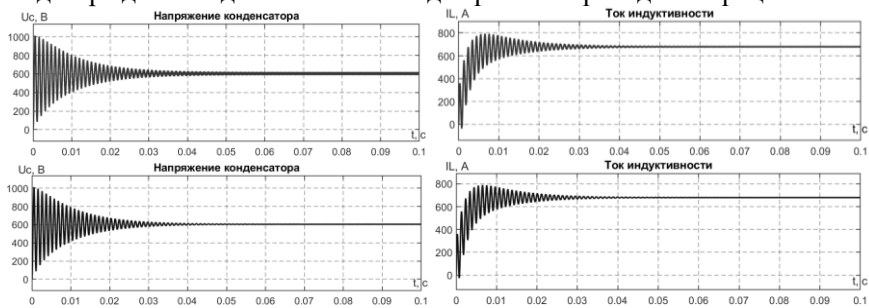


Рисунок 8 – Графики теоретических (низ) и экспериментальных (верх) передаточных функций Z-инвертора

Разработана компьютерная модель электропривода газового компрессора с Z-инвертором с целью оценки допустимых диапазонов снижения напряжения ЗПТ при полной нагрузке в условиях провалов напряжения. Основным ее отличием от существующих моделей является блок управления Z-инвертором (рисунок 9), реализующий разработанный способ управления.

Способ управления Z-инвертором в режиме компенсации провалов напряжения заключается в добавлении импульсов КЗ в цикл коммутации, скважность которых регулируется согласно полученной аналитической зависимости изменения напряжения конденсатора (4). Это обеспечивает поддержание номинального значения напряжения на выходе преобразователя при провалах напряжения.

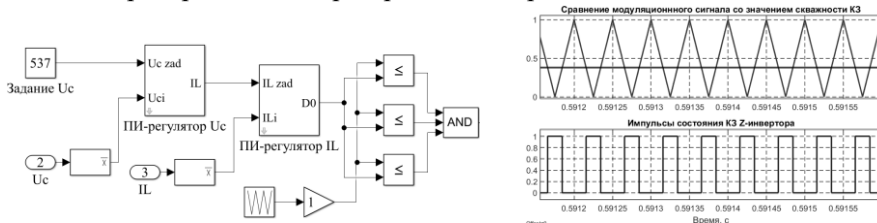


Рисунок 9 – Блок управления Z-инвертором (слева) и формирование импульсов КЗ (справа)

Результаты имитационного моделирования работы ЧПП с разработанным способом управления Z-инвертором при провалах напряжения глубиной 30%, 50% и 60% и длительностью 0,1с представлены на рисунках 10, 11 и 12.

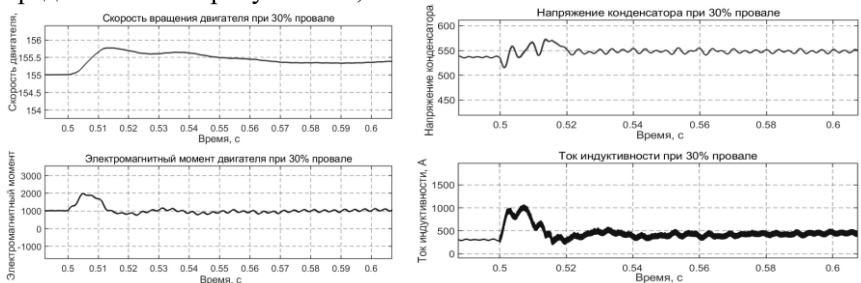


Рисунок 10 – Результаты моделирования при провале глубины 30%

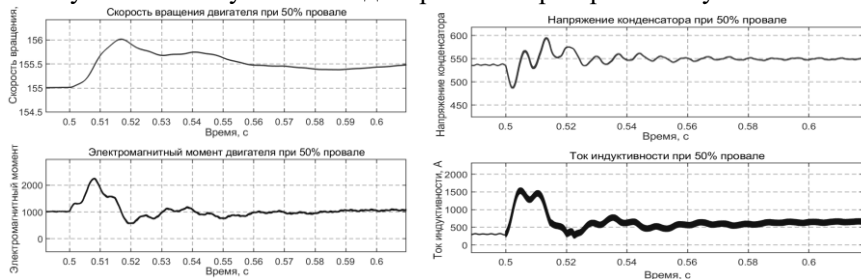


Рисунок 11 – Результаты моделирования при провале глубины 50%

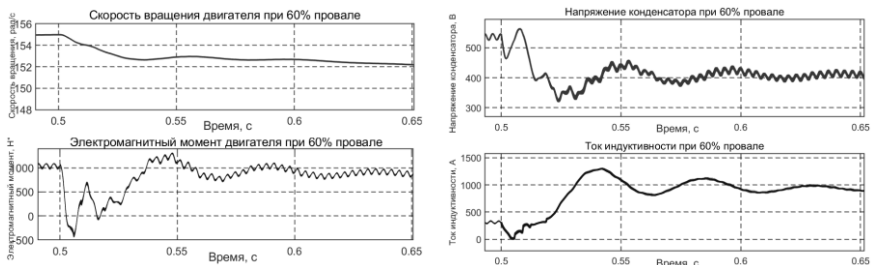


Рисунок 12 – Результаты моделирования при провале глубины 60%

В результате анализа представленных имитационных кривых экспериментально установлено, что минимально допустимым снижением напряжения ЗПТ, при котором обеспечиваются параметры работы двигателя, близкие к номинальным значениям, является снижение напряжения до 50% от номинального значения.

Сравнительный анализ полученных результатов моделирования с результатами других способов компенсации провалов выявил, что явным преимуществом предлагаемого подхода на основе управления Z-инвертором в составе ЧРП согласно разработанному способу является обеспечение компенсации провалов напряжения глубиной до 50% и длительностью 100мс. Это позволяет обеспечить бесперебойную работу электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания при указанных провалах напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Анализ работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания в режиме смены топлива выявил, что нарушение его бесперебойной работы вызывается равномерным распределением суммарной мощности электротехнического комплекса между всеми электроустановками, что приводит к существенному падению давления в системе (для представленного в работе объекта исследования скорость падения давления составила более 20кПа/с).

2. Разработан алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса комбинированной топологии, обеспечивающий его бесперебойную работу в условиях режима смены топлива. Суть его работы заключается в распределении суммарной электрической мощности комплекса в соответствии с полученными зависимостями с учетом установленных в ходе

исследования диапазонов работы по активной мощности турбинных генераторных электроустановок.

3. Определены передаточные функции изменения переменных состояния Z-инвертора в зависимости от изменения скажности состояния КЗ и входного напряжения.

4. Разработан алгоритм выбора параметров Z-инвертора в зависимости от режимов нагрузки, обеспечивающий работу преобразователя на линейном участке зависимости напряжения конденсатора от скажности состояния КЗ, разработана программа для ЭВМ и получено свидетельство о ее государственной регистрации № 20176175283 «Программа для вычисления параметров Z-инвертора с активно-индуктивной нагрузкой».

5. Выявлена аналитическая временная зависимость изменения напряжения конденсатора при возникновении симметричного провала напряжения. Установлено, что разработанная топология обеспечивает в 2,6 раза большую устойчивость к симметричным провалам напряжения.

6. Разработан способ управления Z-инвертором в составе электропривода газового компрессора, обеспечивающий его устойчивую работу при симметричных провалах напряжения длительностью до 100мс и глубиной до 50%, что является минимально допустимым значением напряжения звена постоянного тока.

7. Эффективность применения разработанных алгоритма управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса и способа управления Z-инвертором в составе электропривода доказываются разработанными моделями, адекватно отражающими выявленные аналитические зависимости и подтверждающими корректность полученных результатов.

8. Получен акт о внедрении результатов исследований в образовательный процесс Горного университета и справка о применении результатов исследований в производственной деятельности АО «Новая ЭРА».

НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Салов, Р. А. Динамические свойства Z-инвертора в составе частотно-регулируемого электропривода [Текст] / О. Б. Шонин,

Р. А. Салов // «Известия ТулГУ, Технические науки». – 2017. – №6. – С. 73-81.

2. Салов, Р. А. Повышение эффективности работы энергетических центров на попутном газе [Текст] / Я. Э. Шклярский, Р. А. Салов // «Известия ТулГУ, Технические науки». – 2017. – №12. – С.484-492.

3. Салов, Р. А. Компенсация провалов напряжения частотно-регулируемого привода на основе использования Z-инвертора [Текст] / Я. Э. Шклярский, Р. А. Салов, С. В. Соловьев // Известия ТулГУ, Технические науки. – 2019. – №9. – С. 560-569.

Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus:

4. Salov, R. A. Improvement in energy efficiency, reliability and environmental safety of power plants based on associated petroleum gas / O. B. Shonin, R. A. Salov. – DOI 10.12911/22998993/69357 // Journal of Ecological Engineering. – 2017. – V.18, n.3. – P. 91-96

5. Salov, R. A. Analysis of Z-source Inverter Control System For Asynchronous Drive for Gas Compressor / D. I. Ivanchenko, R. A. Salov, E. V. Yakovleva. – DOI 10.1109/EIConRus.2018.8317177 // IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2018. – P. 91-96.

6. Salov, R. A. Balanced Voltage Sag Compensation on Adjustable Speed Drive of a Gas Compressor / A. A. Belsky, R. A. Salov. – DOI 10.1109/EIConRus.2019.8656873 // IEEE Conference of Russian Young Researches in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – 2019. – P. 934-938.

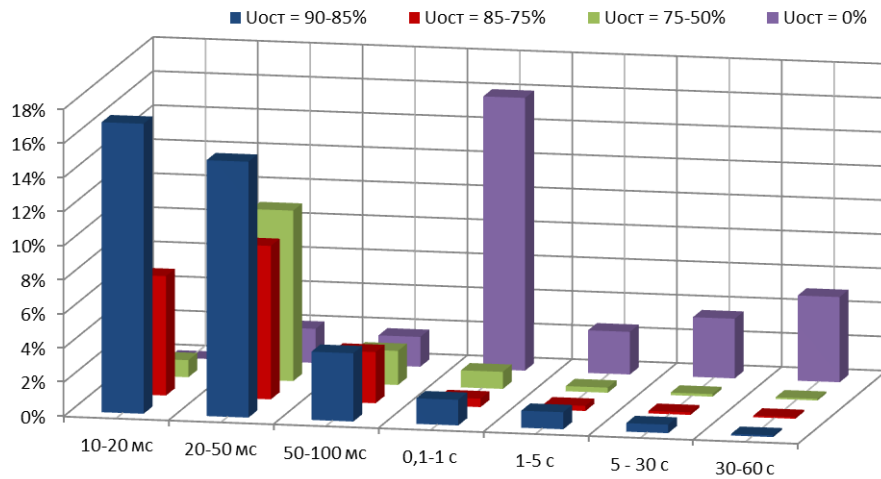


Рисунок 1 – Распределение провалов напряжения по длительности и остаточному напряжению

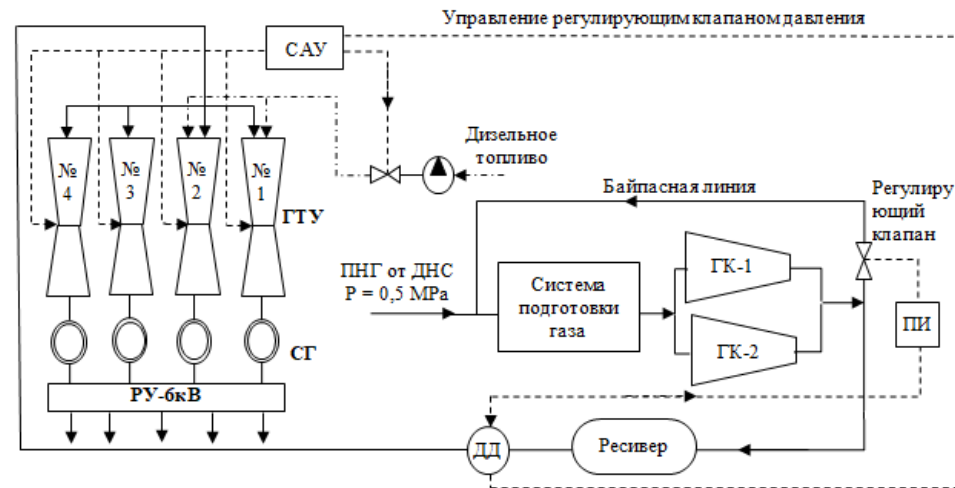


Рисунок 2 – Структурная схема объекта исследований

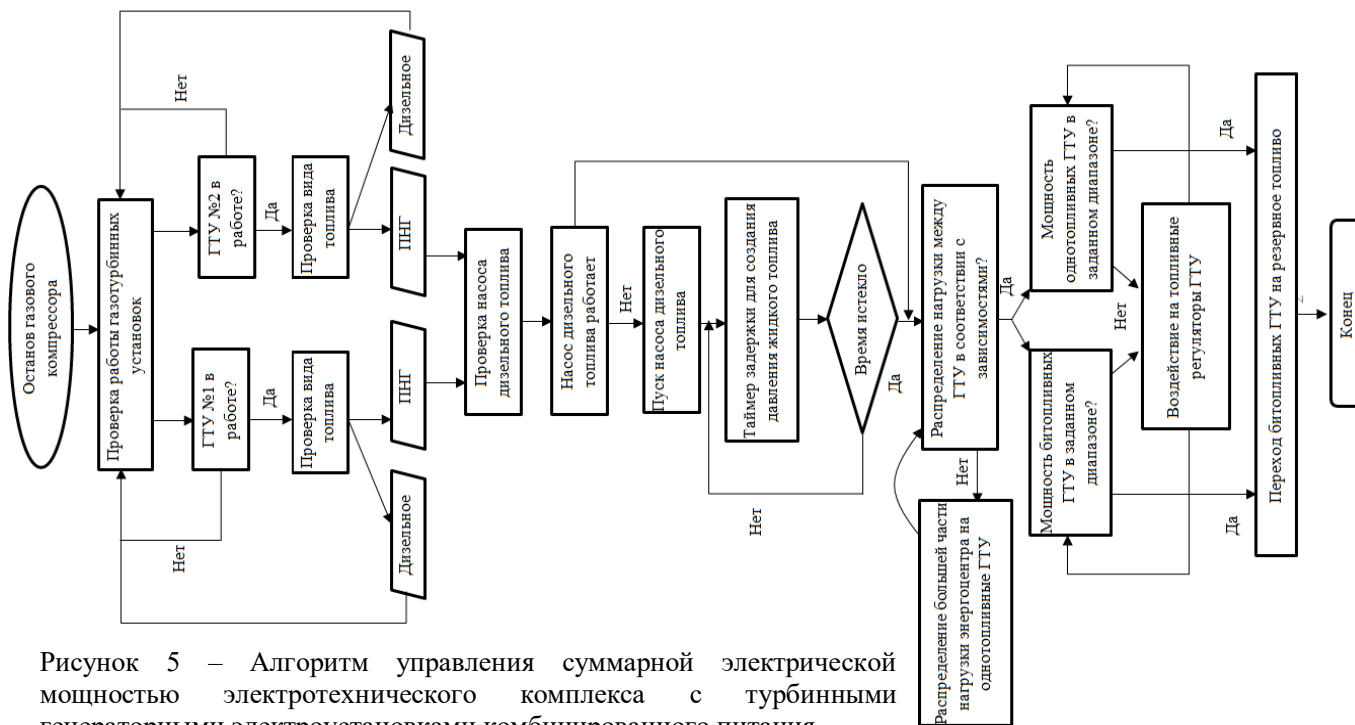


Рисунок 5 – Алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса с турбинными генераторными электроустановками комбинированного питания

Условные обозначения на схеме:
 ДНС – дожимная насосная станция;
 ГК – компрессор газовый;
 ПИ – ПИ-регулятор;
 ДД – датчик давления;
 САУ – система автоматического управления;
 СГ – синхронный генератор;
 РУ – распределительное устройство;
 ГТУ №1 и №2 – битопливные турбинные генераторные электроустановки Siemens SGT-100;
 ГТУ №3 и №4 – однопаливные турбинные генераторные электроустановки Siemens SGT-300.