

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»



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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

НАУЧНЫЕ РУКОВОДИТЕЛИ –

доктор технических наук,
профессор О. Б. Шонин

доктор технических наук,
доцент Я. Э. Шклярский

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ТУРБИНАМИ КОМБИНИРОВАННОГО ПИТАНИЯ.....	14
1.1 Вводные замечания	14
1.2 Способы утилизации попутного нефтяного газа	15
1.3 Технологический процесс	17
1.4 Научно-технические проблемы эксплуатации электротехнических комплексов на ПНГ	19
1.4.1 Останов вследствие неудачной смены топлива	21
1.4.2 Останов из-за отключения электропривода газового компрессора	23
1.5 Провалы напряжения	24
1.5.1 Определение и основные характеристики	24
1.5.2 Статистика возникновения провалов напряжения	26
1.5.3 Математическое описание провалов напряжения	28
1.5.4 Влияние провалов напряжения на работу ЧРП газового компрессора	29
1.6 Средства компенсации провалов напряжения	31
1.6.1 Средства системы электроснабжения (СЭС)	32
1.6.2 Средства <i>FACTS</i>	33
1.6.3 Источники бесперебойного питания	34
1.6.4 Дополнительное оборудование электропривода	36
1.6.5 Алгоритмические методы	37
1.6.6 Модификация топологий преобразователей	38
1.6.7 Z-инвертор напряжения	39
1.7 Постановка цели и задач исследования.....	42
1.8 Выводы по первой главе	44
ГЛАВА 2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КОМБИНИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ СМЕНЫ ТОПЛИВА	46
2.1 Вводные замечания	46
2.2 Структура объекта исследований	46
2.3 Режим смены топлива	48

2.4 Моделирование работы электротехнического комплекса комбинированной топологии.....	53
2.4.1 Построение компьютерной модели	53
2.4.2 Моделирование аварийных режимов электротехнического комплекса	55
2.4.3 Оценка результатов исследования	57
2.5 Алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания.....	59
2.6 Выводы по второй главе	61
ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ Z-ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ СИММЕТРИЧНЫХ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ.....	63
3.1 Вводные замечания	63
3.2 Анализ режимов работы Z-инвертора	63
3.2.1 Активное состояние	64
3.2.2 Нулевое состояние	65
3.2.3 Состояние короткого замыкания	65
3.3 Способы внедрения импульсов КЗ в цикл коммутации	67
3.4 Динамическое моделирование работы Z-инвертора	71
3.5 Выбор параметров Z-преобразователя	78
3.6 Особенности компенсации симметричных провалов напряжения при применении Z-инвертора в составе электропривода	80
3.6.1 Анализ устойчивости электропривода к провалам напряжения	83
3.7 Выводы по третьей главе	85
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ Z-ИНВЕРТОРОМ В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЙ	86
4.1 Вводные замечания	86
4.2 Верификация полученных передаточных функций Z-инвертора	86
4.3 Разработка компьютерной модели электропривода с Z-инвертором для оценки допустимого диапазона снижения напряжения ЗПТ при провалах напряжения ..	90
4.3.1 Блок системы управления двигателем.....	92
4.4 Способ управления Z-инвертором.....	96
4.4.1 Система управления Z-инвертором	97

4.4.2 Синтез регуляторов Z -инвертора	99
4.5 Исследование динамических процессов электропривода с разработанным способом управления Z -инвертором при симметричных провалах напряжения	102
4.6 Выводы по четвертой главе	108
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А	123
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	124
ПРИЛОЖЕНИЕ В	125

ВВЕДЕНИЕ

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. Vera* 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. V. 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 нагрузке 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.

ГЛАВА 1 ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ С ТУРБИНАМИ КОМБИНИРОВАННОГО ПИТАНИЯ

1.1 Вводные замечания

Первая глава посвящена выявлению существующих проблем эксплуатации электротехнических комплексов на попутном нефтяном газе (ПНГ), приводящих к их останову и нарушению непрерывности электроснабжения потребителей, а также постановке цели и задач дальнейшего исследования на основании проведенного анализа.

Для определения функционального назначения электротехнического комплекса и его связи с другими узлами нефтегазового предприятия дано описание технологического процесса поставки ПНГ. Представлена комбинированная технологическая схема комплекса и указаны промышленные объекты с подобной топологией. Для рассматриваемых промышленных электротехнических комплексов выделены две основные задачи, решение которых окажет существенное влияние на обеспечение их бесперебойной работы.

Далее первая глава может быть условно разделена на две части. В первой части рассматривается статистика неудачных смен топлива и делается вывод об актуальности первой рассматриваемой задачи. В ходе анализа существующих научных исследований выделяется ряд нерешенных вопросов.

Вторая часть главы посвящена анализу средств компенсации провалов напряжений. Актуальность рассмотрения второго вопроса определяется задачей обеспечения непрерывного электроснабжения газового компрессора, что обеспечивает непрерывную подачу основного топлива к электротехническому комплексу с турбинами комбинированного питания.

Рассматриваются основные характеристики провалов напряжения и их математическое описание, используемое в дальнейшем в третьей и четвертой

главах. Для схемы электроснабжения компрессорной станции указанных электротехнических комплексов сформирована статистика возникновения провалов напряжения, на основании которой выделены тип, глубина и длительность рассматриваемых в диссертационной работе провалов напряжения. На основании анализа их влияния на работу частотно-регулируемого привода (ЧРП) делается вывод о необходимости поддержания номинальной скорости вращения электродвигателя газового компрессора при полной нагрузке.

В ходе анализа существующих методов и способов компенсации провалов напряжения выделен подход, основанный на использовании Z-инвертора напряжения в составе ЧРП. Анализ существующих научных работ в этой области показал ряд оставшихся без внимания вопросов.

В конце главы представлены цель и задачи, а также основные выводы.

1.2 Способы утилизации попутного нефтяного газа

Добыча нефти неразрывно связана с попутным нефтяным газом, выделяющимся в процессе эксплуатации нефтяных залежей. ПНГ представляет собой смесь насыщенных углеводородов (метан, этан, пропан, бутан и изобутан). Его состав зависит от состава нефти, в которой он растворен и условий залегания и формирования нефтяных пластов.

В России ежегодно добывается в среднем около 85 млрд. м³ попутного нефтяного газа [11], при этом его большая часть сжигается на факельных установках сбора нефти и подготовки газа. Сжигание ПНГ не только приводит к потере ценного углеводородного сырья, но и является одним из основных источников загрязнения в районах нефтедобычи, приводящее к эмиссиям диоксида углерода, метана, оксидов азота и сажевых частиц в атмосферу [21]. На долю нефтегазового сектора России приходится около 30% вредных выбросов всего промышленного комплекса страны [20].

Такая картина наблюдалась до 2012 года, в течение которого наметилось

изменение тенденции. Принятие ряда государственных нормативов по сжиганию ПНГ [27] заставило нефтяные компании искать способы повышения уровня полезного использования ПНГ с целью предотвращения глобальных изменений климата и сокращения выбросов парниковых газов [30,39,54]. Принятие данных мер связано с требованиями экологической безопасности, принятыми международным сообществом и ратифицированными многими странами мира [18,39]. Значительным стимулом для рационального использования ПНГ также послужило повышение платы за загрязнение окружающей среды посредством сжигания попутного газа [29,39].

Стоит отметить, что ПНГ является дорогим по цене энергоресурсом, поэтому его сжигание на факельных установках непосредственно связано с упущенными выгодами государства, выражаемыми в денежном эквиваленте. Ввиду вышесказанного проблема рационального использования ПНГ на нефтяных месторождениях является одной из актуальных и важнейших экологических, экономических и энергетических проблем в нефтедобывающей отрасли.

Можно выделить следующие способы утилизации ПНГ (рисунок 1.1) [9]:

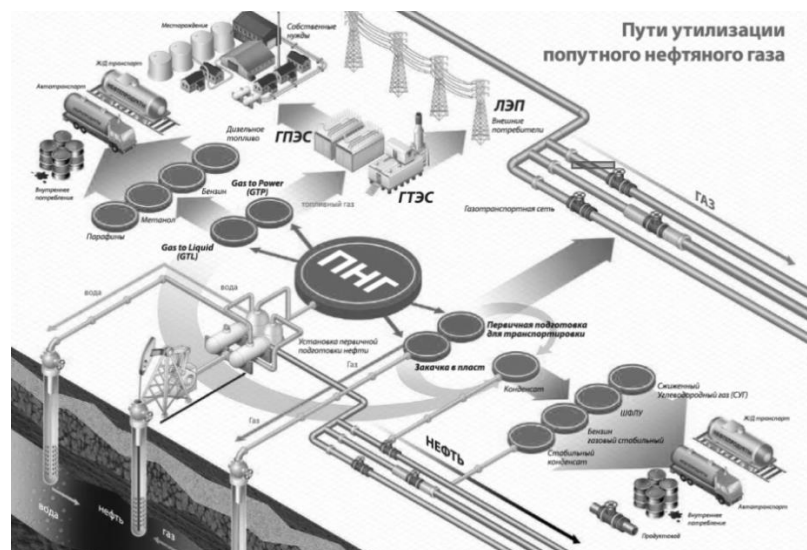


Рисунок 1.1 – Способы утилизации ПНГ

1. Использование ПНГ в качестве топлива для электротехнических комплексов.
2. Переработка в сырье для нефтехимической промышленности.

3. Обратная закачка в пласт и газлифт.
4. Переработка по *GTL*-технологии (метод Фишера-Тропша).

Из рассмотренных способов наиболее перспективным и энергоэффективным является использование ПНГ в качестве топлива в электротехнических комплексах. Это позволяет не только обеспечить потребителей разрабатываемого месторождения недорогой тепловой и электрической энергией, но и обеспечить высокотехнологичную утилизацию ПНГ в полном объеме. Такой подход актуален и выгоден для больших месторождений с огромной инфраструктурой, примером которого может служить Приобское нефтяное месторождение [35].

Подобный подход способствует формированию новой политики, направленной на рациональное и бережное использование энергоресурсов, запасы которых ежегодно сокращаются [39,105].

1.3 Технологический процесс

Упрощенное представление технологического процесса доставки ПНГ к электротехническому комплексу в виде структурной схемы представлено на рисунке 1.2.

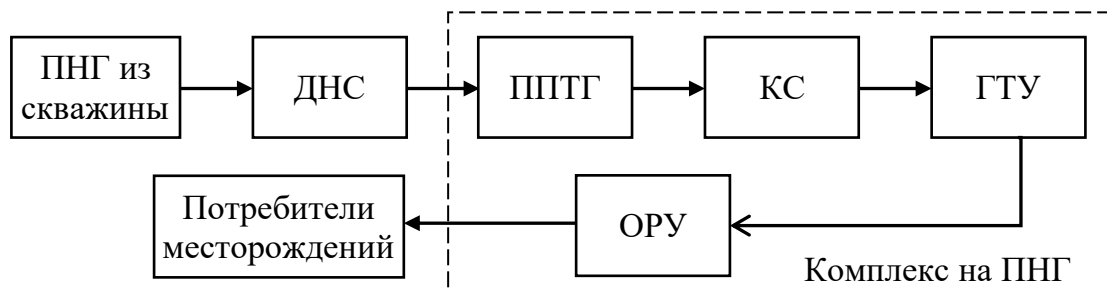


Рисунок 1.2 – Структурная схема технологического процесса

Технологический процесс начинается с добычи нефтесодержащей смеси из нефтяного пласта. Далее нефтесодержащая смесь по трубопроводам системы сбора и очистки поступает на дожимную насосную станцию (ДНС), где осуществляется сепарация нефти от газа, очистка от капельной жидкости и сообщение дополнительного напора для дальнейшей транспортировки к узлам отсечной

арматуры.

Типовая структура электротехнического комплекса на ПНГ включает основные блоки: пункт подготовки топливного газа (ППТГ), компрессорная станция (КС), газотурбинные установки (ГТУ), открытые и закрытые распределительные устройства (ЗРУ и ОРУ). Помимо этого в состав комплекса входят ресивер и резервуары для хранения резервного топлива, вспомогательная аппаратура и оборудование системы управления.

ППТГ осуществляет осушку, очистку и подогрев ПНГ в соответствии с техническими требованиями завода-изготовителя. ППТГ включает в себя следующие блоки [47]: блок подготовки теплоносителя, блок управления, блок учёта топливного газа на ГТЭС, блок подогрева газа, блок второй ступени очистки газа, блок очистки газа открытой установки. Для ППТГ предусмотрено отдельное электроснабжение по двум независимым линиям электропередач напряжением 6-35кВ.

После обработки подготовленный ПНГ с требуемым рабочим давлением подаётся на компрессорную станцию. КС обеспечивает подачу топлива к блокам ГТУ и поддержание входного давления на заданном уровне. Электроснабжение компрессорной станции осуществляется по двум независимым линиям электропередач напряжением 6 кВ [24].

ГТУ представляет собой сочетание газовой турбины и синхронной машины (турбогенератора), размещенных на одном валу [26,34]. Выделяют два основных типа ГТУ в зависимости от вида используемого топлива: однопаливные – обеспечивают работу только на основном виде топлива и двухтопливные – позволяют обеспечить работу дополнительно и на резервном топливе (битопливные). В качестве основного вида топлива часто используется ПНГ, в качестве резервного – природный газ или дизельное топливо. Стоит отметить, что развиваемая мощность однопаливных турбин в большинстве случаев выше, чем у двухтопливных [6].

Главная электрическая схема включает в себя ОРУ 35-110 кВ, ЗРУ-10 кВ, распределительные устройства 6кВ (РУ-6 кВ) собственных нужд. Связь электротехнического комплекса с энергосистемой и потребителями узла нагрузки осуществляется по линиям электропередач напряжением 35-110кВ [1].

Потребителями электроэнергии энергоцентра на ПНГ в основном являются объекты нефтедобывающих предприятий, относящиеся к потребителям I и II категории по надежности электроснабжения [1,24]. Примерами могут служить приводы насосов ДНС и блочных кустовых насосных станций (БКНС), представленных мощными синхронными и асинхронными двигателями, асинхронные двигатели погружных насосов отдельных скважин и системы поддержания пластового давления [24].

Электротехнические комплексы с подобной структурной компоновкой могут работать как в автономном режиме, так и в параллельном режиме с другими электростанциями. Их применение на нефтяных месторождениях позволяет повысить надежность и эффективность тепло- и электроснабжения нефтегазовых предприятий [31].

1.4 Научно-технические проблемы эксплуатации электротехнических комплексов на ПНГ

Наиболее распространённой технологической схемой работы электротехнических комплексов на ПНГ является комбинированная схема (рисунок 1.3), в состав которой входят часть однотопливных ГТУ и часть битопливных ГТУ.

Подобная технологическая схема характерна для многих промышленных объектов, среди которых можно выделить: Хасырейскую и Южно-Приобскую ГТЭС. Согласно [28] такие комплексы относятся к объектам чрезвычайно высокой опасности.

Существует ряд недостатков, которые снижают эффективность работы указанных предприятий. Одной из наиболее важных проблем является нарушение

бесперебойной работы электротехнического комплекса вследствие прекращения поступления основного вида топлива (ПНГ).

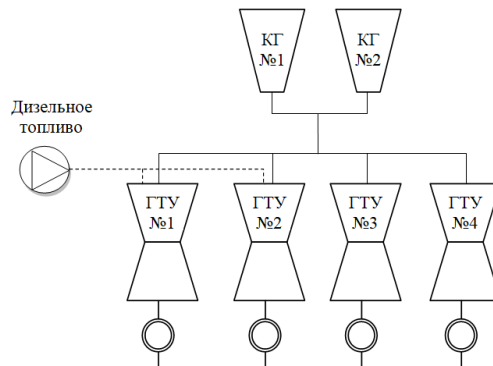


Рисунок 1.3 – Комбинированная топология электротехнического комплекса на ПНГ

Сбой в поставке ПНГ к ГТЭС может быть вызван внешними причинами: авариями в ППТГ или ДНС. В этом случае неудачное завершение процесса смены топлива для битопливных турбин может привести к останову всего электротехнического комплекса. Прекращение поступления ПНГ также может произойти вследствие внутренних причин: отключения электропривода газового компрессора на КС из-за нарушения показателей качества электроэнергии (ПКЭ).

Исходя из вышесказанного, следует выделить две основные задачи, решение которых позволит повысить обеспечить бесперебойную работу электротехнического комплекса на ПНГ:

- обеспечение успешной смены топлива для битопливных турбин при прекращении поступления ПНГ к электротехническому комплексу;
- обеспечение повышения работоспособности электропривода газового компрессора при отклонениях ПКЭ от заданных стандартом норм.

Таким образом для указанных промышленных объектов существует задачи, которые необходимо решить. Исходя из этого, объектом диссертационного исследования является электротехнический комплекс с турбинами комбинированного питания и электроприводом газового компрессора, питающий потребителей нефтяного месторождения

1.4.1 Останов вследствие неудачной смены топлива

Прекращение поступления основного топлива (ПНГ) к электротехническому комплексу вызывает необходимость совершения смены топлива для битопливных турбин, при этом однопаливные турбины будут остановлены в штатном режиме. В случае его успешного завершения турбины продолжают работу уже на резервном топливе до устранения возникшей неисправности. Результатом неудачного процесса является отключение всех турбин и останов всего электротехнического комплекса. При этом будут отключены потребители нефтегазового месторождения и возникнут финансовые затраты, связанные со стоимостью потерянной мощности при простое.

Успешный переход с основного на резервное топливо означает, что потребность в ПНГ снижается до нуля при остаточном давлении в системе выше критического значения, в то время как при неуспешном переходе давление падает до или ниже критической отметки, что вызывает подачу сигнала на аварийный останов всех действующих турбин [39,105]. Подробное описание данных графиков и процесса смены топлива представлено во второй главе.

Как было указано ранее, проблема обеспечения бесперебойной работы электротехнического комплекса в режиме смены топлива характерна для электротехнических комплексов комбинированной топологии, к которым относятся Хасырейская ГТЭС и Южно-Приобская ГТЭС. Для этих объектов была собрана статистика остановов, представленная в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Усредненная статистика отказов электротехнических комплексов вследствие неудачного завершения режима смены топлива

Год	Всего остановов	Общее время простоя
2014	32	352,4 ч
2015	18	82,1 ч
2016	12	31,2 ч

Отсюда следует вывод, что обеспечение успешного завершения режима смены топлива является важным фактором обеспечения бесперебойной работы электротехнического комплекса комбинированной топологии. Решение этой задачи требует разработки и совершенствования алгоритмов управления мощностью электротехнического комплекса в указанном режиме.

Исследованиями режимов работы электротехнических комплексов предприятий нефтегазовой промышленности и проблемами обеспечения электроснабжения потребителей нефтегазового месторождения на основе применения автономных источников на базе турбогенераторных установок занимались многие ученые, среди которых стоит отметить Б. Н. Абрамовича [1], М. С. Ершова, Б. Г. Меньшова, А. Д. Яризова [24] и *R. Vera* [114]. В их работах основное внимание уделено вопросам сопряжения ГТЭС с энергосетью и разработке алгоритмов управления мощностью в номинальном режиме и при авариях в энергосети.

Обеспечение регулирования работы ГТУ производится системой автоматического управления. Для осуществления синтеза такой системы требуется проведение моделирования реальной установки и учет ее поведения в динамических режимах [31]. Разработке точных математических и имитационных моделей ГТУ, способов и алгоритмов управления электротехническими комплексами с турбинами комбинированного питания, позволяющими повысить эффективность его работы, посвящены исследования Л. И. Бугрима [5], Б. В. Кавалерова [17], В. И. Першина [31], *H. Asgari* [56], *S. K. Kim* [76], *W. I. Rowen* [102], *M. R. B. Tavakoli* [112].

Одно из первых математических представлений энергетической ГТУ и особенностей ее работы на жидком и газообразном видах топлива приведено в [102]. Развитием этих идей в [112] привело к созданию алгоритмов управления мощностью ГТУ при пуске, останове и в номинальном режиме. В [16] представлена разработка системы управления ГТУ на основе адаптивных

алгоритмов управления, а также рассмотрены динамические режимы работы электротехнического комплекса. В [56] предложено использовать нейронные сети и алгоритмы на их основе.

Стоит отметить, что в представленных исследованиях вся мощность электротехнического комплекса равномерно распределялась между всеми турбинами и регулирование мощности в динамических режимах (включая аварийные) осуществлялось без ограничения диапазона регулирования мощности ГТУ.

На основании проведенного анализа, был сделан вывод, что в работах указанных авторов уделено недостаточно внимания следующим вопросам:

1. Вопросам обеспечения непрерывного электроснабжения потребителей нефтяного месторождения при наличии в составе электротехнического комплекса турбин комбинированного питания.

2. Разработке алгоритмов управления генерируемой мощностью электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания в режиме смены топлива как внешнего воздействия.

3. Исследованию режима смены топлива с целью выявления факторов, влияющих на бесперебойность работы электротехнического комплекса.

4. Отсутствию учета распределения нагрузки комплекса между ГТУ различного питания и индивидуальных диапазонов регулирования турбинных генераторных установок по активной мощности.

1.4.2 Останов из-за отключения электропривода газового компрессора

В современной нефтегазовой промышленности с ростом автоматизации технологического производства широкое распространение в качестве основного объекта технологических установок получил частотно-регулируемый электропривод [2,4,19,43]. Несмотря на ряд важных преимуществ, он оказался чувствителен к изменениям показателей качества электроэнергии (ПКЭ), в

особенности к появлению асимметрии трехфазной системы напряжений и отклонению напряжения от номинального значения [14].

Для обеспечения нормального режима работы технологической установки требуется бесперебойное обеспечение электроэнергией, качество которой должно соответствовать требованиям ГОСТ [7]. ПКЭ используются для отражения допустимых отклонений параметров электрических величин от их номинальных значений. В случае их отличия от определенных стандартом значений возникает аварийный режим работы сети. Работа в таком режиме в большинстве случаев приводит к отключению электропривода газового компрессора. При этом нарушается подача ПНГ к блоку ГТУ, что может привести к останову всего электротехнического комплекса и большому материальному ущербу. Поэтому ЧРП газового компрессора требует обеспечения непрерывного электроснабжения [24].

Действующий международный стандарт [109] выделяет продолжительные и кратковременные нарушения ПКЭ. Наибольшее влияние на нормальный режим работы ЧРП и технологический процесс оказывают кратковременные нарушения, вызываемые появлением в распределительных и передающих сетях электроснабжения промышленного предприятия провалов напряжения и кратковременных прерываний напряжения [10,13,55,75].

Отсюда следует вывод о необходимости обеспечения устойчивой работы электропривода газового компрессора при указанных нарушениях.

Необходимость решения данной и ранее приведенных задач для обеспечения бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания в режиме смены топлива и провалах напряжения предопределяет актуальность диссертационной работы.

1.5 Провалы напряжения

1.5.1 Определение и основные характеристики

Провалом напряжения называется внезапное понижение напряжения ниже

порогового значения с последующим его восстановлением до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от 10мс до 1 мин [55,75].

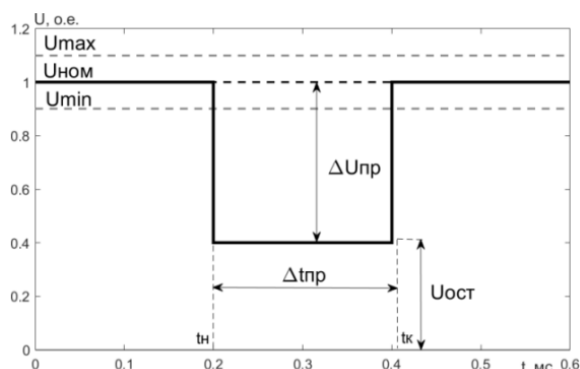


Рисунок 1.4 – Действующее значение напряжения одной из фаз при провале напряжения

На рисунке 1.4 представлены показатели, характеризующие провал напряжения: U_{max} , U_{min} – предельно-допустимые значения установившегося отклонения напряжения, которые составляют $\pm 10\%$ от $U_{ном}$ [7,109]; $\Delta t_{пр}$ – длительность провала напряжения, равная разности между моментом восстановления напряжения к номинальному значению t_k и временем фиксации начальной стадии отклонения напряжения ниже номинального значения t_n [7]; $U_{ост}$ – остаточное напряжение или минимальное среднеквадратическое значение напряжения, отмеченное в течение провала напряжения [7]; $\Delta U_{пр}$ – глубина провала, $\Delta U_{пр} = U_{ном} - U_{ост}$.

Глубина провала часто выражается в относительных единицах:

$$\delta U_{пр} = \frac{U_{ном} - U_{ост}}{U_{ном}} \quad (1.1)$$

При возникновении аварийного режима глубина провала может быть одинаковой для всех фаз или отличаться для каждой из них. В связи с этим различают симметричные и несимметричные провалы напряжения. При симметричном провале напряжения форма напряжения одинаково изменяется во всех трех фазах, причем угол сдвига фаз сохраняется равным 120° . При

несимметричном провале остаточные напряжения в фазах принимают разные значения и углы сдвига в фазах отличны от угла 120° .

Если напряжение в точке передачи электрической энергии становится меньше 5% опорного напряжения [7], то говорят о прерывании напряжения. Если такое прерывание длится от 1 до 3 секунд, то оно называется кратковременным.

В трехфазных системах электроснабжения к прерываниям напряжения относят ситуацию, при которой напряжение меньше 5% опорного напряжения во всех фазах. Если напряжение меньше 5% опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают как провал напряжения. Пороговое значение начала прерывания считают равным 5% опорного напряжения [7].

1.5.2 Статистика возникновения провалов напряжения

Провалы напряжения возникают из-за нарушения режимов работы со стороны питающей энергосистемы, возникновения коротких замыканий (КЗ) в передающих и распределительных сетях среднего и высокого напряжения и подключения электрооборудования электротехнических комплексов различного функционального назначения [51], вызывающего броски токов.

Провалы напряжения – это случайные события, характеризующие аномальные режимы работы системы электроснабжения (СЭС). Их появление неопределенно по месту и времени, поэтому любой анализ должен проводиться на основании статистических данных, учитывающих конкретную топологию СЭС.

Компрессорная станция относится к электроприемникам II категории надежности электроснабжения. Ее типовая упрощенная схема электроснабжения, характерная для Хасырейского и Южно-Приобского электротехнических комплексов, представлена на рисунке 1.5. СЭС выполнена по схеме радиального питания.

Связь с внешней энергосистемой напряжением 110кВ осуществляется посредством главной понизительной подстанции (ГПП), которая передает

электроэнергию на комплектные трансформаторные подстанции (КТП) с помощью распределительных сетей. КТП осуществляет понижение напряжения до 6кВ и обеспечивает питание газовых компрессоров.

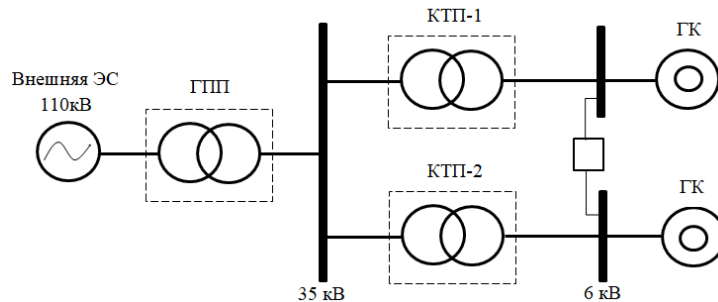


Рисунок 1.5 – Упрощенная схема электроснабжения компрессорной станции

В период с 2013 по 2016 гг. были зафиксированы случаи возникновения провалов напряжения, приведших к отключению ЧРП газового компрессора. В результате проведенного анализа была сформирована статистика провалов напряжения, показанная на рисунке 1.6. Она представлена в виде гистограмм, которые показывают возникновение провалов напряжения с заданными параметрами в процентном соотношении от всех возникших за рассматриваемый период провалов.

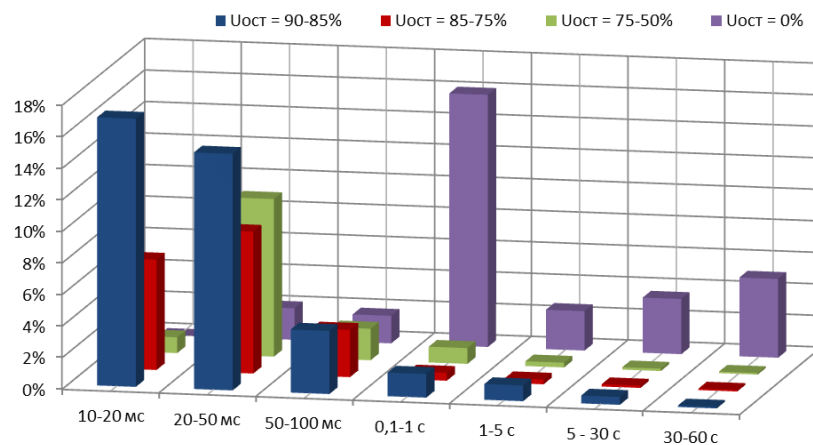


Рисунок 1.6 – Распределение провалов напряжения по длительности и остаточному напряжению

На основании собранной статистики был сделан вывод, что наиболее

характерными для компрессорных станций указанных электротехнических комплексов являются кратковременные провалы напряжения глубиной в диапазоне от 10% до 50% и длительностью от 20 до 50мс.

Наиболее неблагоприятные условия для работы электротехнического оборудования возникают при воздействии трехфазных КЗ и симметричных провалов напряжения, поэтому многие исследования были направлены на компенсацию их негативного воздействия. В [48] показана необходимость учета влияния несимметричных провалов напряжения, часто возникающими типами которых являются провалы напряжения типа *C* и *D* [59,60,77]. Однако рассмотрение данного вопроса является отдельным и обширным научным направлением, поэтому в диссертационной работе основное внимание уделяется изучению симметричных провалов напряжения.

1.5.3 Математическое описание провалов напряжения

Наиболее распространенным способом описания и классификации провалов напряжения является *ABC*-классификация, суть которой заключается в выделении семи типов провалов напряжений на основании соотношений между комплексными амплитудами фазных напряжений асимметричной трехфазной системы [55].

Математические соотношения для определения напряжения фаз при симметричном провале напряжения приведены в таблице 1.2. В таблице использованы обозначения: U_m – фазное напряжение сети при нормальном режиме работы, U_{res} – остаточное напряжение фазы при провале.

Таблица 1.2 – Провал напряжения по *ABC*-классификации.

Тип провала	Математические соотношения для векторов напряжения фаз
A	$\dot{U}_A = U_{res} \quad \dot{U}_B = -\frac{1}{2}U_{res} - j\frac{\sqrt{3}}{2}U_{res} \quad \dot{U}_C = -\frac{1}{2}U_{res} + j\frac{\sqrt{3}}{2}U_{res}$

Векторная диаграмма, соответствующая симметричному провалу

напряжения, представлена на рисунке 1.7. Пунктирной линией отмечены векторы, соответствующие нормальному режиму работы.

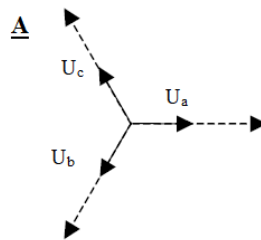


Рисунок 1.7 – Векторная диаграмма фазных напряжений по *ABC*-классификации

В соответствии с *ABC*-классификацией провал типа *A* относится к симметричному провалу напряжения в трёх фазах, вызываемому трехфазным КЗ или прямым пуском мощного оборудования. Представленное математическое описание в дальнейшем будет использовано в третьей и четвертой главах для анализа аварийных режимов работы электропривода.

1.5.4 Влияние провалов напряжения на работу ЧРП газового компрессора

Электропривод (ЭП) [8] переменного тока обычно содержит следующие основные элементы: трехфазный неуправляемый диодный выпрямитель, звено постоянного тока (ЗПТ) в виде конденсатора или катушки индуктивности, преобразователь частоты (ПЧ) и асинхронный двигатель [2,44] (рисунок 1.8). В качестве ПЧ широко применяется двухуровневый инвертор напряжения, управляемый схемой управления, генерирующей только два возможных состояния выходного напряжения [15].

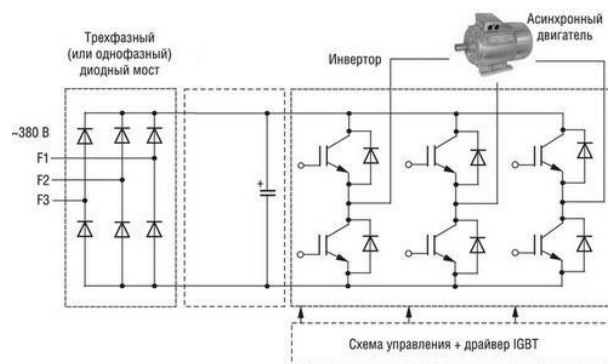


Рисунок 1.8 – ЧРП с двухуровневым инвертором напряжения

Возникновение провала напряжения приводит к уменьшению или практически полному прекращению поступления энергии от сети к нагрузке. При этом происходит срабатывание реле минимального напряжения (РМН), которое отключает привод от сети. Если срабатывания РМН не происходит, то после восстановления напряжения в сети и его последующей подаче на привод возникают сверхтоки [46] и броски токов, связанные с зарядом конденсатора в звене постоянного тока и протеканием пусковых токов двигателя [13,46].

В зависимости от типа и длительности провала напряжение после инвертора (*AC-side* ЧПП) может меняться. При возникновении провала *A*-типа снижение напряжения после выпрямителя (*DC-side* ЧПП) прямо пропорционально снижению напряжения после инвертора. При этом электродвигатель может быть отключен от сети максимально-токовой защитой или защитой минимального напряжения при снижении значения остаточного напряжения ниже значения уставки защиты [46].

При провале *C*-типа напряжение после выпрямителя не изменяется, и количество энергии, поставляемое в нагрузку, остается прежним. Однако трехфазный выпрямитель переходит в однофазный режим [33,55]. При этом токовый сигнал после инвертора будет образовываться при помощи только двух ключей, а не шести как в нормальном режиме работы [55]. Такая ситуация приводит к возникновению сверхтоков, чья опасность в основном определяется их тепловым действием, и небаланса токов. Также происходит изменение угла сдвига фаз, что может повлиять на форму напряжения звена постоянного тока.

При незначительных нарушениях режима работы электродвигатель еще способен сохранять устойчивое равновесное вращательное движение [19,43,45]. При этом точка пересечения механических характеристик двигателя и механизма сопротивления должна находиться на рабочем участке механической характеристики [2,4,45]. Возникновение провалов напряжения с большей глубиной приводит к уменьшению критического момента и скорости электродвигателя, что ведет к нарушению нормального режима работы приводного

механизма [2,4,19,43,45].

Возможность преодоления ЧРП провалов напряжения зависит от многих факторов, среди которых стоит выделить характер временной зависимости напряжения ЗПТ $U_{dc}(t)$, значения уставок срабатывания защиты минимального напряжения (ЗМН) [52,71,110], время работы электродвигателя до срабатывания защиты [79] и потребляемую нагрузкой мощность. При выборе уставки ЗМН должны приниматься во внимание значения максимально-допустимых токов, протекающих через диоды выпрямителя [15,33], а также минимально допустимое снижение напряжения при условии сохранения работоспособности системы управления [46].

Газовый компрессор является частью непрерывного технологического процесса в нефтегазовой промышленности. Снижение объема перекачиваемого ПНГ к блоку турбин приводит к снижению вырабатываемой электротехническим комплексом электроэнергии и ухудшению эффективности его работы. Останов ЧРП ГК вызывает аварийный режим и влечет за собой значительные финансовые потери. Исходя из всего вышесказанного, вытекает требование поддержания номинальной скорости вращения электродвигателя газового компрессора при полной нагрузке в условиях выявленных провалов напряжения.

1.6 Средства компенсации провалов напряжения

Основным назначением средств компенсации провалов напряжения для ЧРП является предотвращение снижения значения остаточного напряжения ниже уровня срабатывания ЗМН. В настоящее время существует большое количество технических решений, обеспечивающих снижение негативного эффекта от провалов напряжений. Анализ наиболее распространенных технических средств осуществлен на основании сравнения значений максимальной глубины и длительности компенсируемых провалов напряжения для электродвигателя газового компрессора мощностью 160кВт.

1.6.1 Средства системы электроснабжения (СЭС)

К средствам СЭС относятся средства релейной защиты и противоаварийной автоматики. Основная их задача заключается в восстановлении и обеспечении электроснабжения отключенных потребителей после устранения неисправности. Широко распространёнными средствами данной категории являются система автоматического повторного включения (АПВ) и система автоматического ввода резерва (АВР).

Система АВР предназначена для восстановления питания путем автоматического присоединения резервного источника при отключении рабочего источника питания для потребителей I и II категорий. Ее особенностью является однократное действие с запретом на повторное включение. Среднее время срабатывания составляет 0,3-0,8 с.

АПВ обеспечивает повторную подачу напряжения на линию с выдержкой времени, определяемой временем готовности привода выключателя, временем дионизации и временем самоликвидации КЗ. АПВ обычно выполняется с двумя ступенями срабатывания. Выдержка времени первой ступени составляет 2-4 с. При неуспешном восстановлении питания устройство АПВ производит повторное включение напряжения с выдержкой времени 15-20 с. Если после второй попытки не происходит восстановления нормального режима работы, то КЗ считается устойчивым и требует вмешательства эксплуатационного персонала. Повторное КЗ при неуспешном АПВ опасно для потребителя вследствие не завершения самозапуска двигателя в паузу АПВ и возникновения пусковых токов [10,12].

Как показано в [10], использование АВР и АПВ для компенсации кратковременных нарушений напряжения не может являться оптимальным решением, поэтому использование только данных средств не позволит обеспечить непрерывную работу электродвигателя ГК при рассматриваемых провалах напряжения.

1.6.2 Средства FACTS

Система *FACTS* (*Flexible Alternative Current Transmission System*) – это система, обеспечивающая контроль за одним или более параметрами системы передачи переменного тока для повышения управляемости и увеличения передаваемой мощности [61]. Использование средств *FACTS* позволяет оптимизировать режимы работы сети сразу по нескольким критериям: пропускная способность, уровень технологических потерь, перераспределение потоков мощности, качество электрической энергии [57,74,100].

Для компенсации провалов напряжений могут использоваться динамический компенсатор искажений напряжения (*DSTATCOM*) и динамический восстановитель напряжения (*DVR*) (рисунок 1.9).

DVR представляет собой сетевой преобразователь последовательного типа с управляемыми *IGBT*-модулями. Он подключается к сети через трансформатор последовательно с нагрузкой. При возникновении провала напряжения *DVR* добавляет недостающую часть напряжения для обеспечения требуемого режима нагрузки. Для этого в схеме на рисунке 1.9,а предусмотрен накопитель энергии [100].

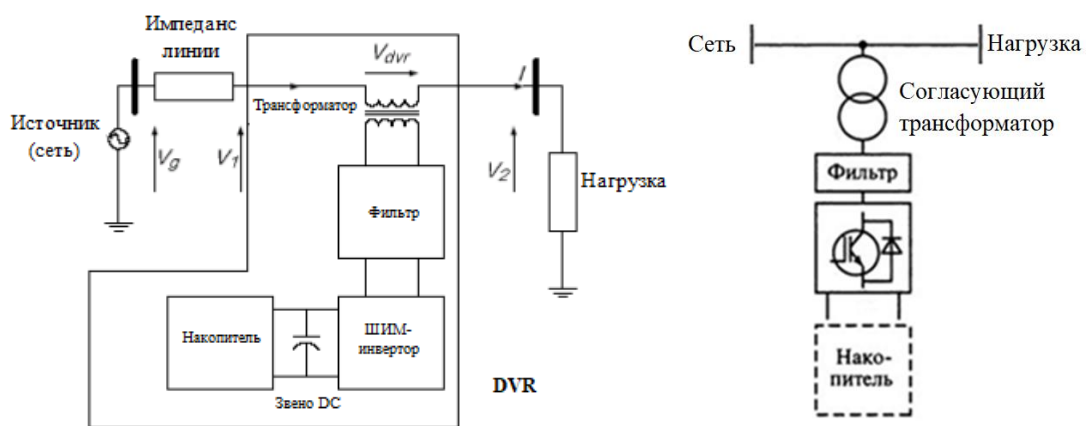


Рисунок 1.9 – Схемы динамического восстановителя напряжения (*DVR*) (а) и динамического компенсатора искажений напряжения (*DSTATCOM*) (б)

DSTATCOM (рисунок 1.9б) представляет собой сетевой преобразователь

параллельного типа с управляемыми *IGBT*-ключами. Он подключается параллельно нагрузке инвертора и состоит из последовательно соединенного коммутирующего переключателя и накопителя энергии. Принцип работы заключается в формировании синусоидального напряжения за счет использования широтно-импульсной модуляции (ШИМ), фильтра гармоник и энергии накопителя [101]. *DSTATCOM* способен генерировать ток любой фазы относительно напряжения сети за счет изменения реактивной мощности, потребленной или выданной в сеть [57,74].

Средства *FACTS* обеспечивают высокое быстродействие и возможность компенсации провалов напряжения глубиной до 50% от номинального значения. Однако ограниченное время их работы (до 20-30мс) не позволяет использовать их для компенсации представленных провалов напряжения длительностью до 50мс. Более того для обеспечения режима работы устройств *FACTS* требуется наличие запаса по току преобразователя. Помимо этого они имеют высокую стоимость сопоставимую со стоимостью всей системы управления электроприводом. Поэтому применение средств *FACTS* для компенсации рассматриваемых провалов и прерываний напряжения нецелесообразно как с экономической, так и технической точек зрения.

1.6.3 Источники бесперебойного питания

Одним из наиболее простых способов компенсации провалов напряжения является установка источников бесперебойного питания (ИБП) на базе различного рода накопителей энергии, позволяющих обеспечить приток энергии к ЗПТ во время провала напряжения.

В распределительных сетях в качестве накопителя кинетической энергии может использоваться маховик с двигателем-генератором на базе синхронной машины [101]. Он позволяет замедлить снижение напряжения на нагрузке при возникновении провала напряжения в сети. Недостатком такого подхода являются

значительные суммарные механические потери.

К другому типу накопителей относятся ионисторы (суперконденсаторы), аккумуляторы, водородные ячейки и др. Для согласования уровней напряжения на накопителе и в ЗПТ преобразователя частоты используются DC/DC или DC/AC преобразователи (рисунок 1.10).

Принцип работы накопителей основан на медленном заряде в нормальном режиме работы (рисунок 1.10а) и мгновенном высвобождении энергии во время провалов напряжения или пиковых нагрузок (рисунок 1.10б) [22].

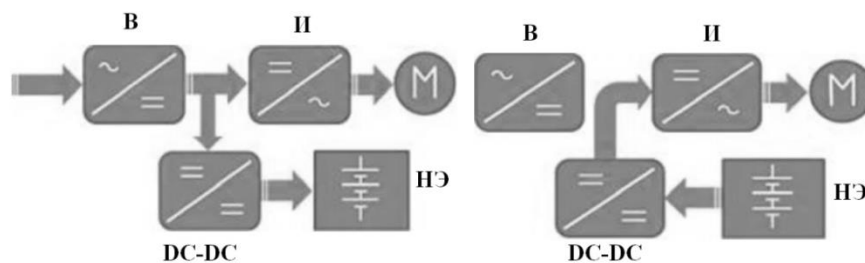


Рисунок 1.10 – Функциональная схема подключения накопителя энергии при заряде (а) и разряде при провале напряжения (б)

На рисунке 1.10 использованы следующие обозначения: В – выпрямитель, И – инвертор, $DC-DC$ – преобразователь, НЭ – накопитель энергии.

К недостаткам подобного подхода стоит отнести необходимость установки дополнительных устройств, большие габариты ИБП при питании мощной нагрузки, высокую стоимость затрат и возможность компенсации провалов на участках с небольшой мощностью. Стоит также отметить, что после компенсации провала НЭ потребуется время для повторного заряда. Помимо этого требуется внедрение дополнительных систем управления, так многие типы аккумуляторных батарей требуют постоянного контроля параметров их работы и периодической реализации сервисных циклов заряда/разряда [101].

Исходя из этого, применение такого рода накопителей на компрессорной станции не обеспечит в полной мере решения задачи компенсации провалов и прерываний напряжения, а только приведет к большим финансовым затратам.

1.6.4 Дополнительное оборудование электропривода

К дополнительному оборудованию привода можно отнести активный выпрямитель и повышающие *DC-DC* преобразователи.

Активный выпрямитель (АВ) – это преобразователь, способный работать как в инверторном, так и выпрямительном режимах с *IGBT*-транзисторами вместо диодов. Он используется в качестве входного преобразователя. Основной особенностью АВ является возможность двухстороннего обмена энергии между двигателем и сетью.

Потребление из сети тока с заданным фазовым углом обеспечивается изменением параметров основной гармоники переменного напряжения на входных зажимах АВ, что позволяет гарантировать работу ПЧ с заданным значением коэффициента мощности [101]. Это обеспечивает необходимый уровень постоянного напряжения на конденсаторе ЗПТ. При неполной загрузке привода по мощности АВ может работать в качестве компенсатора провалов напряжения аналогично *DSTATCOM* [108].

Недостатками АВ являются его высокая стоимость, небольшая мощность и глубина компенсируемых провалов напряжений (до 10-15%) и необходимость построения сложной системы управления.

Повышающий *DC-DC* преобразователь подключается в разрыв между выпрямителем и инвертором (рисунок 1.11). Поддержание его постоянного выходного напряжения обеспечивается системой автоматического управления. Сглаживание пульсаций напряжения обеспечивают дроссели.

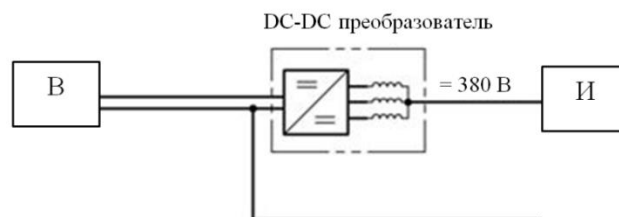


Рисунок 1.11 – Структурная схема преобразователя постоянного напряжения.

Недостатками такого преобразователя являются необходимость больших финансовых затрат, а также невозможность компенсации провалов напряжения глубиной до 50% и длительностью до 50мс. Кроме того постоянная работа *DC-DC* преобразователя сопряжена с дополнительными потерями энергии в дросселях и ключах преобразователя, что ведет к снижению коэффициента полезного действия.

1.6.5 Алгоритмические методы

Алгоритмические методы борьбы с провалами напряжения используют внутренние ресурсы электропривода. Преимущество данных методов заключается в отсутствии необходимости дополнительных затрат на установку дополнительного силового оборудования. Среди алгоритмических методов стоит выделить методы управления ЧРП в зоне ослабленного поля и алгоритмы управления процессом рекуперации кинетической энергии привода для поддержания напряжения ЗПТ [25].

Режимом ослабленного поля называется режим, при котором регулирование и поддержание требуемого электромагнитного момента осуществляется путем ослабления потокосцепления ротора и увеличения q -составляющей тока статора [71,72]. Если перевод двигателя в режим ослабленного поля невозможен, то в соответствии с методом осуществляется снижение частоты вращения двигателя. Это позволяет снизить потребляемую мощность электропривода и уменьшить скорость падения напряжения ЗПТ [53]. Благодаря таким мерам установка может успешно преодолеть провал напряжения.

Недостатком использования данных методов является малое допустимое значение снижения напряжения ЗПТ при полной нагрузке привода (до 15%), что не позволяет их использовать для компенсации рассматриваемых провалов и прерываний напряжений. Помимо этого требуется введение новых блоков в систему управления, что ведет к снижению надежности всей системы.

Даже небольшое снижение частоты вращения электродвигателя газового

компрессора ведет к значительному снижению объема поставляемого к электротехническому комплексу попутного газа. Частые режимы работы на пониженной скорости в соответствии с данным методом приведут не только к значительным финансовым потерям, но и снижению эффективности работы и нарушению бесперебойности работы всего электротехнического комплекса. Отсюда следует вывод о нецелесообразности использования данных методов для компенсации представленных провалов и прерываний напряжения

Проведенный анализ существующих средств компенсации провалов напряжения для ЧРП показал их неприменимость для компенсации возникающих на КС провалов и прерываний напряжения.

1.6.6 Модификация топологий преобразователей

Анализ современной зарубежной литературы показал существование принципиально нового и перспективного направления компенсации провалов напряжения – модификация топологий преобразователей и введение дополнительных алгоритмов и методик управления ими [66,82,115]. Применение подобного подхода позволит расширить границы допустимого диапазона снижения напряжения ЗПТ.

Среди данного направления стоит выделить Z-инвертор напряжения [89]. Он представляет собой преобразователь напряжения со звеном постоянного тока в виде соединенных крест-накрест двух конденсаторов и двух катушек индуктивности (рисунок 1.12).

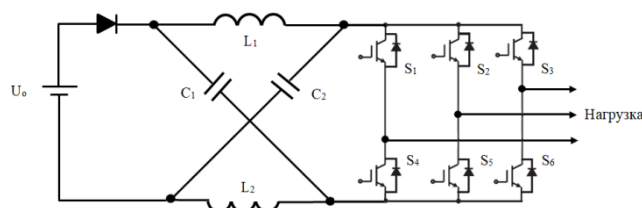


Рисунок 1.12 – Структурная схема Z-инвертора

Подобная конфигурация ЗПТ позволяет преобразователю работать в состоянии короткого замыкания (КЗ), которое образуется посредством

одновременного замыкания двух силовых полупроводниковых ключей в одном, двух или трех плечах фазы [94]. Работа в данном режиме обеспечивает уникальные свойства преобразователя, заключающиеся в повышении уровня выходного напряжения до некоторого максимального значения без установки дополнительных преобразователей [89,94]. Этот факт позволяет рассматривать Z-инвертор напряжения как повышающий преобразователь и средство компенсации провалов в составе ЧРП.

К преимуществам Z-инвертора относятся отсутствие задержки коммутации силовых ключей (мертвое время), улучшение гармонического состава выходного напряжения и повышенная надежность работы в сравнении с традиционными инверторами тока и напряжения. Однако стоит отметить, что при постоянной работе такого преобразователя могут возникнуть дополнительные потери энергии в элементах Z-контура. Помимо этого требуется введение дополнительных алгоритмов управления. Эти недостатки могут привести к снижению КПД.

Оценивая преимущества и недостатки Z-инвертор напряжения, можно прийти к выводу, что его достоинства имеют более весомый вес, нежели недостатки, которые являются устранимыми. Помимо этого использование и внедрение преобразователя не требуют огромных затрат на установку дополнительного оборудования в сравнении с другими методами.

Исходя из всего вышесказанного, задача компенсации возникающих в СЭС провалов и прерываний напряжения для ЧРП газового компрессора на основе использования Z-инвертора напряжения является наиболее перспективным и актуальным подходом.

1.6.7 Z-инвертор напряжения

После предложения концепции Z-инвертора [94], появилось множество научных работ, развивших эту идею. Все работы условно можно разделить на несколько категорий: способы модуляции, способы управления, топологии и

использование для конкретной отрасли промышленности.

Среди существующих способов модуляции и образования состояний КЗ Z-инвертора стоит выделить следующие способы [90]: простой способ (*Simple Boost*) [94], максимальный способ (*Maximum Boost*) [91], максимальный постоянный способ (*Maximum Constant Boost*) [92], модифицированная векторная широтно-импульсная модуляция (ШИМ) [78] и модифицированная пространственно-векторная ШИМ (*SVPWM*) [73]. Исследования в этой области нашли отражения в работах *F. Z. Peng, O. Ellabban* [65], *M. Shen, A. Joseph, P. C. Loh, Z. Qian*, и др.

Научные работы, посвященные исследованию способов управления Z-инвертора можно разделить на четыре группы: управление напряжением конденсатора [87], косвенное управление напряжением ЗПТ [84], прямое управление напряжением ЗПТ [85] и объединенное управление [93]. Исследованиями в данной области занимались *F.Z. Peng, X. Ding, Z. Qian, H. Latifi, O. Ellabban, J.V. Mierlo, P. Lataire* [63].

На настоящее время создано множество топологий преобразователей на базе Z-инвертора [66,89]. Однако в качестве инвертора для ЧРП могут быть использованы только пять из них: Z-инвертор (*ZSI*) [94], двунаправленный Z-инвертор (*BZSI*) [99], высокоэффективный Z-инвертор (*HP-ZSI*) [86], квази Z-инвертор (*qZSI*) [88], двунаправленный квази Z-инвертор (*BqZSI*) [70] (рисунок 1.13). Все указанные топологии обладают возможностью компенсировать провалы напряжения. Выбор топологии будем осуществлять по критерию минимального количества элементов и простоты построения алгоритмов управления.

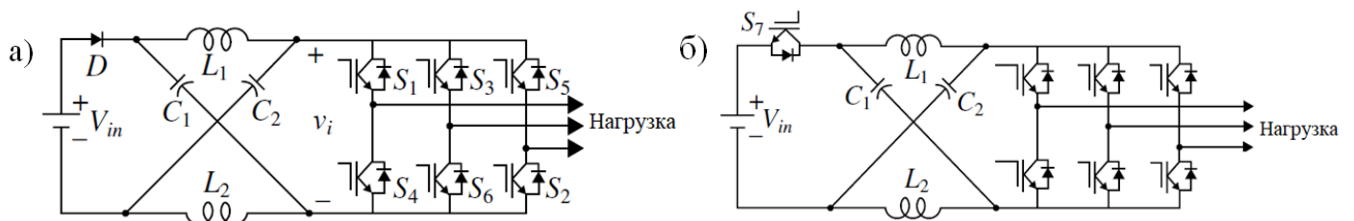


Рисунок 1.13 – Топологии Z-инвертора для ЧРП: *ZSI* (а), *BZSI* (б), *HPZSI* (в), *qZSI* (г), *BqZSI* (д)

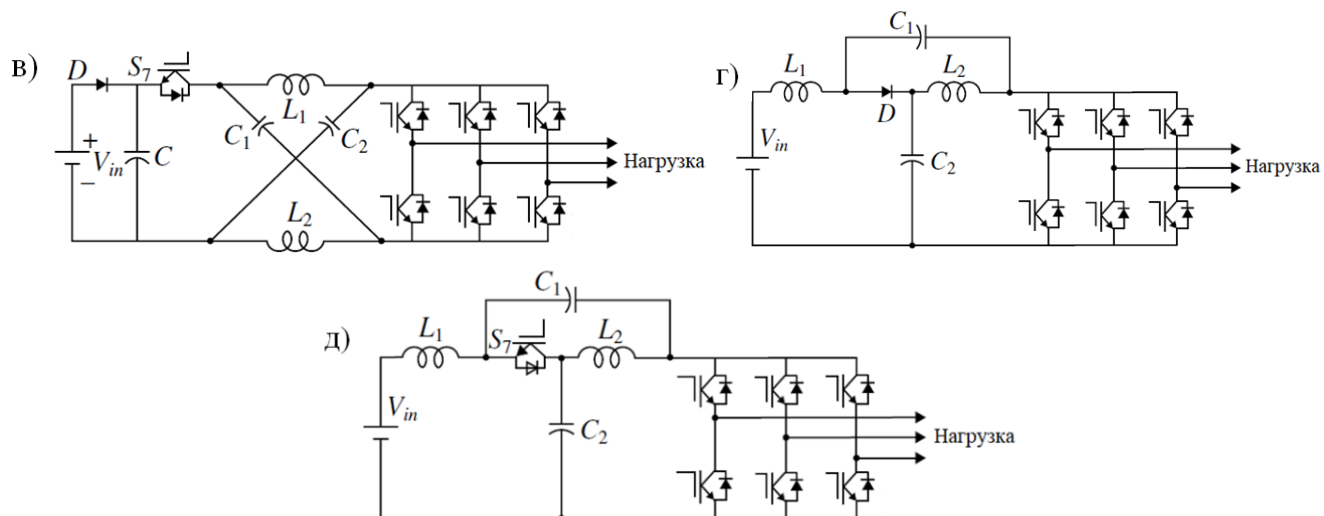


Рисунок 1.13 (продолжение) – Топологии Z-инвертора для ЧПП: *ZSI* (а), *BZSI* (б), *HPZSI* (в), *qZSI* (г), *BqZSI* (д)

Двухнаправленная топология позволяет обеспечить процесс рекуперации электрической энергии, при этом необходимы финансовые затраты и введение дополнительного алгоритма управления. Ввиду того, что работа электродвигателя газового компрессора осуществляется в продолжительном режиме *SI*, исключая случаи остановов на техническое обслуживание, использование режима рекуперации ставится под сомнение. Таким образом, применение *BZSI* и *BqZSI* топологий нецелесообразно. Помимо этого *BqZSI* структура является весьма чувствительной к изменениям входного напряжения по сравнению с *ZSI* [70].

Высокоэффективный Z-инвертор позволяет устранить возможные провалы напряжения звена постоянного тока, однако тоже требует внедрения дополнительных компонентов и усложнения алгоритмов управления [66,86]. Поэтому использование данной топологии для компенсации провалов напряжения приведет к излишнему усложнению системы без получения очевидных достоинств

Таким образом, наиболее подходящими топологиями Z-преобразователя на основании установленных критериев являются Z-инвертор (*ZSI*) и квази Z-инвертор (*qZSI*). Основное внимание в диссертационной работе будет уделено Z-инвертору (*ZSI*). Ввиду схожести процессов, полученные для *ZSI* результаты, могут быть

обобщены для $qZSI$.

В настоящее время в работах зарубежных ученых значительное внимание уделяется исследованию работы Z -инвертора и его модификаций в составе ЧРП [62,66]. Первым предложил использовать Z -инвертор в составе ЧРП *F. Z. Peng* [95,96]. *U. Flisar, D. Voncina и P. Zajec* [69] описали работу асинхронного двигателя малой мощности в номинальной режиме с системой векторного управления. *L. Ping, L. He-ping* [98] предложили использовать синхронный двигатель на основе ZSI для электрических машин. *G. Tajima* [111] показал, что потери энергии при работе синхронного двигателя с Z -инвертором не превышают потерь при работе двигателя со стандартным инвертором. Управление на основе предиктивного контроля и прямое управление моментом асинхронного двигателя нашли отражение в работах *O. Ellabban, H. Abu-Rub* [64,67]. В [58] рассмотрены особенности компенсации провалов напряжения для ЧРП малой мощности с Z -инвертором.

На основании проведенного анализа, был сделан вывод, что в работах авторов уделено недостаточно внимания следующим вопросам:

1. Определению границ допустимого диапазона снижения напряжения ЗПТ при возникновении симметричных провалов напряжения.
2. Особенности компенсации симметричных провалов напряжения ЧРП средней мощности.
3. Разработке способов управления ЧРП средней мощности на базе Z -инвертора.

1.7 Постановка цели и задач исследования

На основании проведенного анализа научной литературы по выделенным проблемам сформулирован предмет диссертационного исследования – алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса и способ управления электроприводом газового компрессора в условиях провалов

напряжения.

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.

Поставлена цель исследования: 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.

Для достижения цели необходимо решить ряд 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.

1.8 Выводы по первой главе

1. Показано, что использование ПНГ в качестве топлива для электротехнических комплексов нефтегазовой промышленности обеспечивает его высокотехнологичную утилизацию и потребность промышленного оборудования в электроэнергии.

2. Выявлено, что успешное завершение режима смены топлива является важным фактором обеспечения бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания.

3. Установлено, что существующие алгоритмы управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания не учитывают влияния режима смены топлива и распределения суммарной электрической мощности комплекса между турбинами различного типа питания.

4. Проведенный анализ статистики возникновения провалов напряжения показал, что останов электропривода газового компрессора и нарушение бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания вызываются симметричными провалами напряжения глубиной в диапазоне от 10% до 50% от номинального значения напряжения и длительностью 10-50мс.

5. Выделено новое перспективное направление среди средств компенсации провалов напряжения – модификация топологий преобразователей и использование специальных алгоритмов управления ими. В рамках данного направления сделан акцент на применении Z-инвертора в составе ЧРП.

6. Анализ работ, посвященных исследованию ЧРП с Z-инвертором, показал, что в современных публикациях не в полной мере рассмотрены вопросы разработки способов управления ЧРП на базе Z-инвертора в условиях возникновения выявленных провалов напряжения.

7. Определены объект и предмет диссертационного исследования и сформулированы цель и задачи исследования.

ГЛАВА 2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕСПЕРЕБОЙНОЙ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА КОМБИНИРОВАННОЙ ТОПОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ СМЕНЫ ТОПЛИВА

2.1 Вводные замечания

Во второй главе рассматривается комбинированная топология электротехнического комплекса на ПНГ. Первая часть главы посвящена описанию технологического процесса объекта исследований, назначения его основных элементов и режима смены топлива с целью выявления факторов, влияющих на бесперебойную работу электротехнического комплекса.

Исходя из известной проблемы и собранных статистических данных работы турбинных генераторных электроустановок различного типа питания, выдвигается гипотеза о причинах возникающих аварийных режимов и их связи с режимами работы электротехнического комплекса. Для опровержения выдвинутой гипотезы используется разработанная в соответствии с системным подходом имитационная модель объекта исследований.

Вторая часть главы посвящена анализу результатов исследования, корректировке гипотезы и разработке алгоритма управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса.

Содержание второй главы раскрывает первое защищаемое положение.

2.2 Структура объекта исследований

Структурная схема Хасырейского электротехнического комплекса, работающего в автономном режиме от единой энергосистемы, представлена на рисунке 2.1.

В схеме рисунке 2.1 использованы условные обозначения: 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 ГТУ,

в качестве которых используются турбины *Siemens SGT-100*; ГТУ №3 и №4 – однотопливные ГТУ, *Siemens SGT-300* [39,105,106]

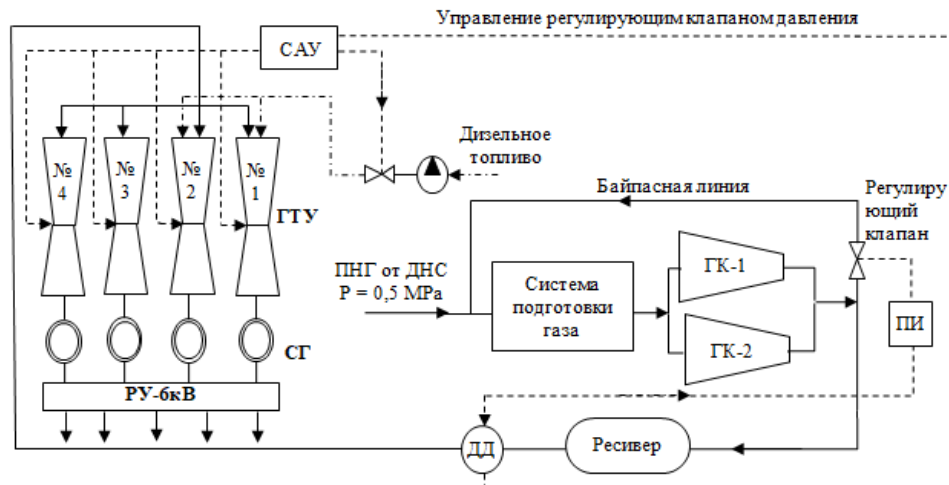


Рисунок 2.1 – Структурная схема электротехнического комплекса на ПНГ с турбинами комбинированного питания

ПНГ под давлением 0,5 МПа от ДНС поступает к узлам отсечной арматуры электротехнического комплекса на вход блока системы подготовки газа. В системе подготовки газа осуществляется осушка, очистка и подогрев газа для ГТУ в соответствии с техническими требованиями завода-изготовителя. С выхода блока подготовленный ПНГ подается к газовым компрессорам, один из которых находится в работе, а другой в холодном резерве. Компрессор обеспечивает создание давления 2,5 МПа на входе турбин. Производительность одного компрессора позволяет обеспечить топливом все четыре турбины. После сжатый ПНГ поступает в резервуар, служащий в качестве накопителя газа, и затем подается на вход газовых турбин. В условиях отсутствия управляемого привода компрессора, требуемый уровень давления в системе определяется регулирующим клапаном, установленным в байпасной линии [105, 106].

Контроль процессов выработки электроэнергии обеспечивает система автоматического управления (САУ), осуществляющая управление работой синхронных генераторов с регулированием по активной и реактивной мощности и управление работой регулирующего клапана в байпасной линии.

САУ включает в себя подсистему, ответственную за обеспечение смены топлива. В случае отказа в системе подготовки и подачи ПНГ эта подсистема вырабатывает сигнал, который инициирует переход битопливных турбин с основного на резервное топливо. Если подсистема не обеспечивает нормальных условий выработки электроэнергии, то начинается сжигание ПНГ [39].

Выработанная генераторами электроэнергия поступает на распределительное устройство (РУ) напряжением 6кВ и затем по воздушным линиям (ВЛ) передается потребителям. Мощность энергоцентра составляет порядка 30 МВт.

2.3 Режим смены топлива

Сменой топлива называется переходной процесс в топливном тракте ГТУ, при котором происходит постепенное снижение потребления турбиной одного топлива и дальнейшая его полная замена на другой вид топлива.

Управление данным процессом осуществляется подсистемой САУ посредством воздействия на регуляторы турбин. При этом она инициирует сигнал на смену топлива битопливных ГТУ и отключение однотопливных ГТУ.

Сигнал перехода на дизельное топливо формируется при достижении давлением ПНГ значения 1800 кПа и скорости падения давления 20 кПа/с [39]. При успешном переходе потребность в ПНГ в конечной фазе процесса снижается до нуля при остаточном давлении в системе выше критического значения. Если давление в процессе смены топлива падает ниже 1600кПа, происходит аварийный останов всех ГТУ. Условия смены топлив заложены в алгоритме работы блока контроля перехода.

Рассмотрим осциллограммы неудачного перехода битопливной ГТУ на резервное топливо, которые представлены на рисунке 2.2.

На рисунках 2.2 и 2.3 под номерами указаны следующие осциллограммы: 1 – кривая изменения частоты вращения турбины, об/мин; 2 – давление дизельного топлива в топливной системе ГТУ, кПа; 3 – давление ПНГ в топливной системе

ГТУ, кПа; 4 – тепловая потребность ГТУ в дизельном топливе, кДж/с; 5 – тепловая потребность ГТУ в ПНГ, кДж/с.

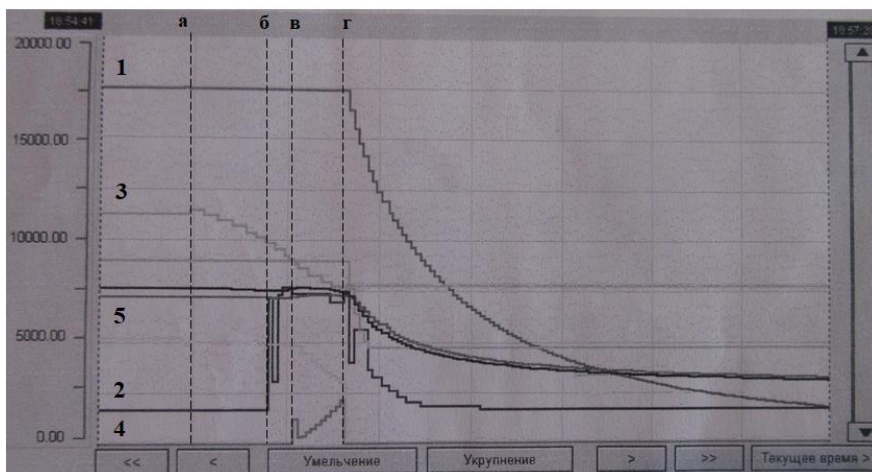


Рисунок 2.2 – Осциллограммы неудачной смены топлива

В момент времени «а» происходит прекращение поступления ПНГ к ГТУ. Начинается снижение давления в газовой магистрали. Скорость падения давления ПНГ в точке «б» начинает превышать значение уставки и САУ инициализирует начало процесса перехода ГТУ на резервное топливо. Осуществляется запуск насосов для создания необходимого давления в линии подачи жидкого топлива и проверка исполнительных механизмов. В момент времени «в» начинается переходной процесс – потребность в дизельном топливе повышается, в то время как давление и потребность в газе постепенно снижаются. В момент времени «г» до окончания перехода давление ПНГ падает ниже аварийной уставки в 1600кПа и происходит аварийный останов всех ГТУ.

Показания датчиков ГТУ №1 при неудачном переходе с газового топлива на дизельное топливо представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Показания датчиков при неудачной смене топлива

T	$\omega_{\text{тур}}$, об/мин	$P_{\text{ДТ}}$, бар	$P_{\text{ПНГ}}$, бар	$Q_{\text{ПНГ}}$, кВт	$Q_{\text{ДТ}}$, кВт
18:56:08.5	17449,0	0,1278	23,135	12473	0
18:56:09.4	17449,0	0,1278	23,1375	12617	0
18:56:10.3	17449,0	0,1278	22,5875	12591	0

Продолжение таблицы 2.1

18:56:11.2	17449,0	0,1278	22,5875	12515	0
18:56:12.1	17449,0	0,1278	22,5875	12515	0
18:56:13.0	17449,0	0,1278	22,5875	12589	0
18:56:13.9	17449,0	0,1278	22,0425	12513	0
18:56:14.8	17449,0	0,1278	22,0425	12477	0
18:56:15.7	17449,0	0,1278	22,0425	12547	0
18:56:16.6	17449,0	0,1278	21,455	12468	0
18:56:17.5	17449,0	0,1278	21,455	12468	0
18:56:18.4	17449,0	0,1278	21,455	12468	0
18:56:19.3	17449,0	0,1278	21,0475	12468	0
18:56:20.2	17449,0	0,1278	21,0475	12468	0
18:56:21.1	17449,0	0,1278	20,5575	12439	0
18:56:22.0	17449,0	0,1278	20,5575	12413	0
18:56:22.9	17449,0	0,1278	19,9725	12413	0
18:56:23.8	17449,0	2,1187	19,9725	12413	0
18:56:24.7	17449,0	3,6337	19,9725	12413	0
18:56:25.6	17449,0	3,6337	19,3475	12347	0
18:56:26.5	17449,0	3,6337	19,3475	12347	0
18:56:27.4	17449,0	3,6337	18,635	12347	0
18:56:28.3	17449,0	2,1097	18,2325	12285	3000
18:56:29.2	17449,0	2,1097	18,2325	12285	3000
18:56:30.1	17449,0	2,1097	17,815	12231	800
18:56:31.0	17449,0	2,1097	17,815	11319	800
18:56:31.9	17449,0	2,0276	17,13	11319	1273
18:56:32.8	17449,0	2,0276	17,13	10323	1722
18:56:33.7	17449,0	2,0276	16,65	9839	2218
18:56:34.6	17449,0	2,0276	16,65	9399	2755
18:56:35.5	17449,0	2,0276	16,65	9399	3234
18:56:36.4	17449,0	1,9293	16,13	8938	3798
18:56:37.3	17449,0	1,9293	16,13	8548	3798
18:56:38.3	17449,0	1,9293	15,6075	8176	4355
18:56:38.3	17449,0	1,9293	15,6075	8176	4355
18:56:39.2	17410,0	1,9293	15,6075	7725	4987

Продолжение таблицы 2.1

18:56:40.1	17410,0	1,9293	15,1725	6705	5326
18:56:41.0	17094,0	1,8442	15,1725	0	0
18:56:41.9	16258,0	1,1133	15,1725	0	0

В таблице 2.1 приняты следующие обозначения: T – время, $\omega_{\text{тур}}$ – частота вращения турбины; $P_{\text{ДТ}}$ – давление дизельного топлива; $P_{\text{ПНГ}}$ – давление ПНГ; $Q_{\text{ПНГ}}$ – тепловая потребность турбины в ПНГ; $Q_{\text{ДТ}}$ – тепловая потребность турбины в дизельном топливе.

Жирным цветом в таблице 2.1 выделены значения показаний датчиков, соответствующих участку снижения давления ниже уставки, после чего происходит выдача сигнала на аварийный останов всех турбин.

До решения обозначенной проблемы обеспечение успешного перехода с ПНГ на дизельное топливо осуществлялось в ручном режиме оператором (рисунок 2.3). Рассмотрим хронологию такого процесса.

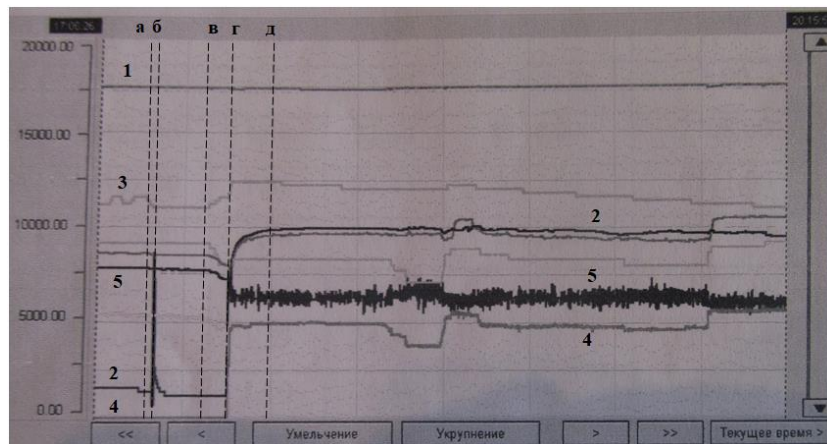


Рисунок 2.3 – Осциллограммы удачной смены топлива при ручном управлении

В момент времени «а» происходит прекращение поступления ПНГ, и давление в газовой магистрали начинает снижаться. После достижения скорости падения давления необходимого значения уставки, САУ в точке «б» выдает команду на осуществление процесса перехода битопливной ГТУ №1 на резервное топливо. В это же время оператор выдает команду на нормальный останов

битопливной ГТУ №2. Вследствие выполнения команды происходит резкий наброс нагрузки на турбину, давление ПНГ перестает падать и стабилизируется на время на рабочем уровне. В точке «в» срабатывает система автоматической частотной разгрузки, в результате чего снижаются нагрузка и потребность турбины в ПНГ и незначительно расчет давление в газовой магистрали. В момент времени «г» начинается переходной процесс, давление и потребность в дизельном топливе повышаются. В точке «д» переход успешно завершается: потребность в ПНГ падает до нуля, при этом его давление выше аварийной уставки. Потребность в дизельном топливе корректируется в соответствии с нагрузкой.

Показания датчиков ГТУ №1 при успешном переходе с ПНГ на дизельное топливо представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Показания датчиков при удачной смене топлива

T	$\omega_{тур}$, об/мин	$P_{дт}$, бар	$P_{пнг}$, бар	$Q_{пнг}$, кВт	$Q_{дт}$, кВт
17:41:07	17431,0	-0,31	23,19	11779	0
17:41:18	17431,0	-0,31	23,19	11740	0
17:41:29	17431,0	-0,31	23,19	11768	0
17:41:41	17431,0	-0,31	23,19	11757	0
17:41:52	17431,0	-0,31	23,60	11678	0
17:42:03	17431,0	1,9	23,60	11678	0
17:42:15	17422,0	1,9	23,60	8744	2708
17:42:26	17387,0	1,85	24,45	5617	6511
17:42:38	17426,0	1,74	24,45	2118	9387
17:42:49	17400,0	1,59	24,86	0	11777
17:43:00	17400,0	1,59	24,86	0	11544
17:43:12	17400,0	1,6	24,86	0	11671
17:43:23	17400,0	1,62	24,86	0	11883
17:43:34	17400,0	1,62	24,86	0	11988
17:43:46	17400,0	1,61	24,86	0	11991

Стоит отметить, что ручное осуществление процесса смены топлива занимает

больше времени, при этом возрастает влияние человеческого фактора.

Анализ представленных трендов и показаний датчиков выявил, что основной причиной неуспешной смены топлива является нехватка остаточного давления ПНГ вследствие быстрого падения его давления (более 20кПа/с) в топливной системе турбин. После остановки газового компрессора ГТУ продолжают расходовать газ, который остался в газовой магистрали, и до момента, когда давление газа достигает одной из уставок, происходит несколько секунд, которых может не хватить для завершения процесса смены топлива.

2.4 Моделирование работы электротехнического комплекса комбинированной топологии

На основании данных о работе электротехнического комплекса в соответствии с методами математической логики была выдвинута гипотеза о существовании связи режима смены топлива с распределением суммарной электрической мощности электротехнического комплекса.

2.4.1 Построение компьютерной модели

Для опровержения выдвинутой гипотезы были построена математическая и компьютерная модели электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания. Моделирование осуществлялось согласно методам системного анализа, компьютерного и имитационного моделирования и математической аппроксимации.

Электротехнический комплекс представлен в виде совокупности блоков, связанных между собой выполняемыми функциями. Модель разработана в среде *Simulink MatLab* и показана на рисунке 2.4. Построение каждого блока модели осуществлялось на основании фундаментальных принципов термодинамики и газовой динамики.

Для газового компрессора связь между подачей Q и давлением P учитывается формулой [49,107]:

$$Q = \left(1 - 0,025 \left(\frac{P_o}{P_i} \right)^{1/m} - 1 \right) \lambda_p \lambda_L n, \quad (2.1)$$

где p_o – выходное давление, Па; p_i – входное давление, Па; m – коэффициент политропы; λ_p – коэффициент давления; $\lambda_p = 0.95 \div 0.98$; λ_L – коэффициент герметичности; $\lambda_L = 0.95 \div 0.98$; n – число двойных ходов поршня в минуту.

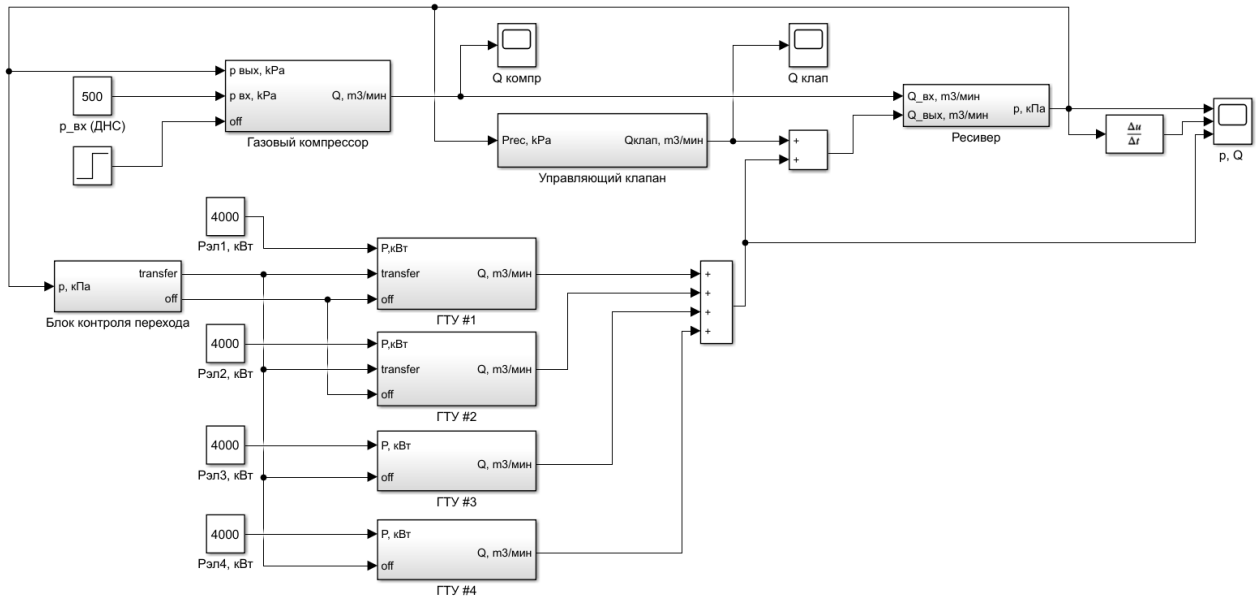


Рисунок 2.4 – Компьютерная модель электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания

Задачей ресивера в системе является сглаживание пульсаций давления. Основным уравнением, определяющим его динамические реакции, является закон сохранения массы [50]:

$$\frac{dm(t)}{dt} = m_i - m_o, \quad (2.2)$$

где $m(t)$ – общая масса газа за единицу времени t , кг/с; m_i – массовая подача на входе, кг/с; m_o – массовая подача на выходе, кг/с.

Используя уравнение идеального газа при небольших отклонениях температуры и уравнение (2.1), можно получить зависимость давления от объемной подачи [80]:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{(Q_i - Q_o) \cdot P(t)}{V_r}, \quad (2.3)$$

где $P(t)$ – давление в ресивере в момент времени t , Па; V_r – объем ресивера, м³; Q_i – подача на входе ресивера м³/с; Q_o – подача на выходе ресивера, м³/с.

В соответствии с [83], характеристика регулирующего клапана при малых изменениях давления системы может быть представлена линейной зависимостью:

$$Q = Q_0 \cdot h, \quad (2.4)$$

где Q – массовый расход через клапан, м³/с; $h = 0-1$ – положение клапана.

Связь потребность в топливе на входе турбинных генераторных электроустановок с выходной электрической мощностью комплекса получена на основании аппроксимации собранных экспериментальных данных. В пределах рабочей зоны эту зависимость можно представить в линейном виде [81]:

$$Q = Q_0 + k \cdot P. \quad (2.5)$$

Для однотопливных ГТУ зависимость имеет вид: $Q = 1,98 \cdot 10^{-3} P + 12,143$.

Для битопливной ГТУ №1: $Q_1 = 2,48 \cdot 10^{-3} P + 8,497$.

Для битопливной ГТУ №2: $Q_2 = 2,42 \cdot 10^{-3} P + 10,713$.

2.4.2 Моделирование аварийных режимов электротехнического комплекса

В процессе моделирования производилось исследование динамических процессов перехода битопливных ГТУ на жидкое топливо. Аварийное состояние моделировалось отключением газового компрессора.

В качестве реакций системы рассматривались временная зависимость остаточного давления $P_{ост}(t)$, скорость падения давления газа $\frac{dP}{dt}$ и потребность ГТУ в газовом потоке $Q_{гр}(t)$. Критерием успешного перехода системы на резервное топливо служила нулевая потребность в ПНГ и остаточное давление выше критического значения. В качестве уставок приняты приведенные ранее промышленные значения параметров.

Рассмотрим случаи успешного и неудачного завершения режима смены топлива в соответствии с графиками, полученными по результатам моделирования при различных начальных условиях, определяемых загруженностью турбинных генераторных электроустановок различного типа питания по активной мощности (рисунок 2.5).

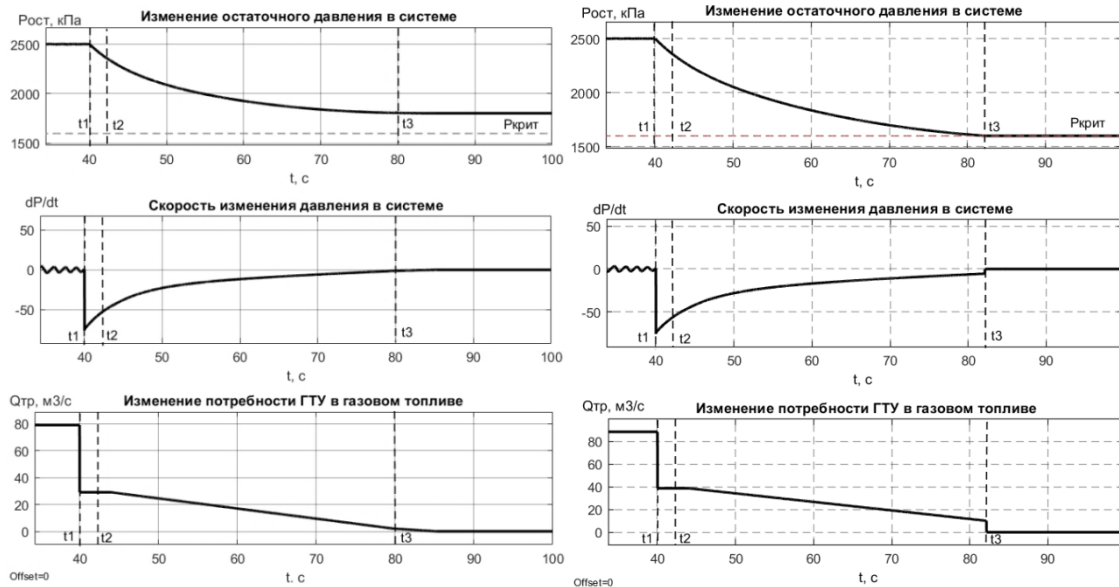


Рисунок 2.5 – Графики успешной (слева) и неудачной (справа) смены топлива

До возникновения аварийного режима система находилась в стационарном состоянии. В момент времени t_1 происходит отключение газового компрессора, что приводит к снижению давления в ресивере. При достижении значением скорости падения давления ПНГ значения уставки dP/dt САУ формирует сигнал запуска для системы управления процессом перехода. Происходит подготовка и тестирование систем подачи резервного топлива. В момент времени t_2 завершается подготовка и инициируется смена топлива. В момент времени t_3 в случае успешного перехода потребность в газовом топливе снижается до нуля при давлении $P_{ост}(t_3) > P_{кр}$, а в случае неуспешного – давление падает до критической отметки и система управления подает сигнал на аварийную остановку всех турбин.

После успешной смены топлива система находится в новом стационарном состоянии, для которого характерны: остаточное давление в системе и отсутствие

потребления газового топлива.

Стоит отметить, что вид представленных графиков и характер их изменения аналогичен экспериментальным трендам (рисунки 2.2 и 2.3), что говорит об адекватности построенной модели электротехнического комплекса.

2.4.3 Оценка результатов исследования

При суммарной электрической мощности электротехнического комплекса равной 35 МВт мощность битопливных турбин варьировалась от 0,5 до 4,5 МВт, мощность однопаливных турбин – от 1,0 до 7,5 МВт. Для этих условий было получено семейство графиков, подобных изображенным на рисунке 2.5. При этом фиксировались значения остаточных давлений в системе после окончания процесса. В результате аппроксимации экспериментальных данных получены зависимости, отражающие влияние активной мощности турбинных генераторных электроустановок на остаточное давление в системе в режиме смены топлива как внешнего воздействия (рисунок 2.6).

Это подтверждает существование прямой связи между распределением суммарной электрической мощности электротехнического комплекса и режимом смены топлива. Выдвинутая гипотеза не опровергается, что подтверждается ее достоверность.

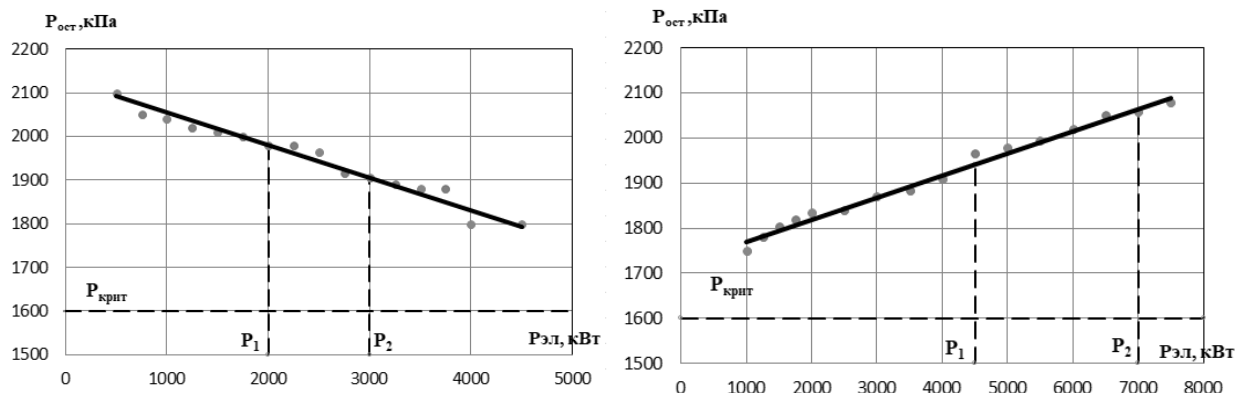


Рисунок 2.6 – Зависимости остаточного давления в системе от активной мощности, генерируемой битопливными (слева) и однопаливными (справа) электроустановками

На рисунке 2.6 использованы следующие обозначения: $P_{\text{крит}}$ – критическое значение давления в системе; P_1 – крайнее левое значение диапазона регулирования по активной мощности; P_2 – крайнее правое значение диапазона регулирования по активной мощности.

В результате анализа полученных результатов определены диапазоны регулирования турбинных генераторных электроустановок по активной мощности $\Delta P = P_2 - P_1$, границы которых отмечены на рисунке 2.6 пунктирными линиями.

Как видно из рисунка 2.6, увеличение доли суммарной электрической мощности комплекса на турбины комбинированного питания приводит к значительному снижению остаточного давления в системе, которое находится вблизи от критического значения. Подобное поведение при преобладающей нагрузке битопливных турбин может привести к увеличению длительности режима и последующему неудачному завершению смены топлива.

В свою очередь, увеличение доли суммарной электрической мощности комплекса на однотопливные турбинные электроустановки приводит к повышению остаточного давления в системе и улучшению условий для режима смены топлива. Это связано с тем, что после активации смены топлива и быстрого отключения однотопливных турбин, вся емкость ресивера будет использоваться для поддержания переходного процесса в битопливных турбинах в соответствии с заданной процедурой.

Полученные зависимости определяют диапазоны регулирования турбинных генераторных электроустановок по активной мощности. Исходя из этого, управление суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса комбинированной топологии необходимо осуществлять с учетом установленных диапазонов работы так, чтобы на турбинные генераторные электроустановки комбинированного питания приходилась наименьшая доля суммарной электрической мощностью, а на однотопливные – ее большая часть.

2.5 Алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания

На основании проведенных исследований и представленных рекомендаций был разработан алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса (рисунок 2.7).

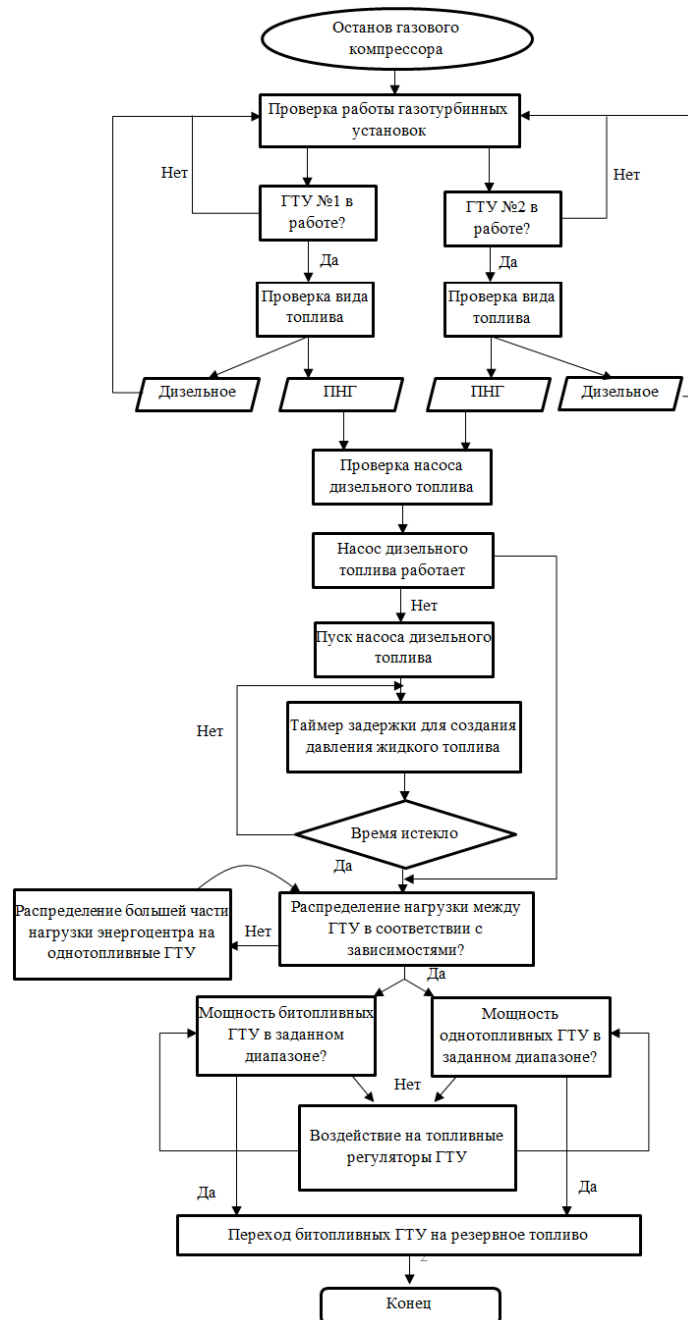


Рисунок 2.7 – Алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса

Работа алгоритма инициируется по сигналу останова газового компрессора. Данный сигнал с дискретного выхода программируемого логического контроллера (ПЛК) газового компрессора посредством оптоволоконной сети поступает на дискретный вход подсистемы САУ, ответственной за обеспечение смены топлива.

Указанная подсистема производит опрос битопливных ГТУ для выявления работающих установок. Далее осуществляется проверка топлива, которое в настоящий момент используется турбиной. В случае дизельного топлива, алгоритм завершает работу, что свидетельствует о завершившемся переходе. В дальнейшем проводится периодический опрос всех ГТУ.

В случае работы ГТУ на ПНГ, подсистема подает сигнал для проверки работы насоса дизельного топлива, предназначенного для создания необходимого давления резервного топлива на входе системы непосредственно перед началом перехода.

В случае неработающего насоса производится его запуск. Для исключения провалов давления в системе жидкого топлива необходимо после пуска дать поработать насосу некоторое время, что обеспечивается путем введения таймера в алгоритм управления.

Далее производится оценка распределения суммарной электрической электротехнического комплекса между турбинными генераторными электроустановками различного типа питания в соответствии с полученными зависимостями. Если нагрузка на битопливные турбины превышает нагрузку на однопаливные ГТУ, то САУ вырабатывает необходимое воздействие на топливные регуляторы. После выставления необходимого соотношения осуществляется проверка работы электроустановок в диапазонах регулирования по активной мощности. Если диапазоны работы не соответствуют диапазонам, определенным в ходе исследования, то подается сигнал на топливные регуляторы, которые осуществляют необходимую коррекцию.

После успешного прохождения всех этапов алгоритма инициализируется

переход битопливных ГТУ на дизельное топливо, а однотопливные ГТУ выводятся из работы в штатном, а не аварийном режиме.

Данный алгоритм также может быть применен для других электротехнических комплексов, имеющих комбинированную технологическую схему. Для этого необходимо выполнить ряд шагов:

1. Выявить зависимости между потреблением топлива для каждой из турбин и выходной электрической мощностью электротехнического комплекса.
2. Определить уставки и критерии режима смены топлива
3. Исходя из установленной суммарной электрической мощности электротехнического комплекса, получить зависимости остаточного давления в системе от активной мощности турбинных генераторных электроустановок в соответствии с представленным во второй главе исследованием.
4. На основе анализа зависимостей определить диапазоны регулирования электроустановок по активной мощности.

Разработанный алгоритм обеспечивает бесперебойную работу электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания в режиме смены топлива как внешнего воздействия. Таким образом, решение представленной задачи осуществляется электротехническими средствами.

Представленные во второй главе результаты исследований обеспечили выполнение первых двух задач, поставленных в диссертационной работе.

2.6 Выводы по второй главе

1. Представлено описание работы основных блоков объекта исследований.
2. Проанализированы случаи успешной и неуспешной смены топлива промышленных турбинных генераторных электроустановок и приведены показания датчиков для отдельных фаз процесса. 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.

3. Для опровержения выдвинутой гипотезы о связи между распределением нагрузки на турбины различного типа питания и сменой видов топлива проведен системный анализ работы электротехнического комплекса комбинированной топологии. По его результатам разработаны математическая и компьютерная модели энергоцентра в среде *Matlab-Simulink*..

4. Адекватность построенной модели и валидность проведенного моделирования подтверждаются схожестью вида и характера изменения полученных имитационных графиков смены топлива с представленными промышленными трендами режима смены топлива.

5. В ходе анализа полученных зависимостей, отражающих влияние активной мощности турбинных генераторных электроустановок на остаточное давление в системе в режиме смены топлива как внешнего воздействия, выдвинутая гипотеза не была опровергнута, что подтверждает ее верность.

6. Установлено, что суммарную электрическую мощность электротехнического комплекса комбинированной топологии необходимо распределять так, чтобы на турбинные генераторные электроустановки комбинированного питания приходилась ее наименьшая доля.

7. Разработан алгоритм управления суммарной электрической мощностью электротехнического комплекса комбинированной топологии, 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

ГЛАВА 3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ Z-ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ СИММЕТРИЧНЫХ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЯ

3.1 Вводные замечания

Третья глава посвящена теоретическим исследованиям работы Z-инвертора при возникающих симметричных провалах напряжения. Как было показано в первой главе, использование Z-преобразователя является наиболее актуальным способом их компенсации.

В начале главы проводится анализ установившихся режимов работы Z-преобразователя и осуществляется выбор способа внедрения импульсов короткого замыкания в цикл коммутации. Для осуществления дальнейшего синтеза системы управления и построения алгоритма управления проведено динамическое моделирование. В результате исследований получены передаточные функции Z-инвертора, дающие представление о динамике изменения переменных состояния.

Разработан алгоритм выбора параметров Z-инвертора, обеспечивающий работу преобразователя на линейном участке характеристики. Рассмотрены особенности компенсации симметричных провалов напряжения при использовании Z-инвертора. По результатам математического анализа построены кривые разряда конденсатора ЗПТ при различных значениях параметров Z-инвертора, позволяющие судить об устойчивости ЧРП по выделенным критериям.

3.2 Анализ режимов работы Z-инвертора

Z-инвертор – это преобразователь напряжения, ЗПТ которого представляет собой соединенные крест-накрест два конденсатора и две катушки индуктивности [94] (рисунок 3.1).

Указанная топология обеспечивает работу преобразователя в дополнительном состоянии, образуемом посредством одновременного замыкания двух транзисторных ключей в одном, двух или сразу трех плечах фазы. Такое

состояние получило название режима короткого замыкания (*shoot-through state*) [66,94,89]. Реализация такого режима в традиционных инверторах с одним накопителем в ЗПТ приведет к короткому замыканию и повреждению преобразователя.

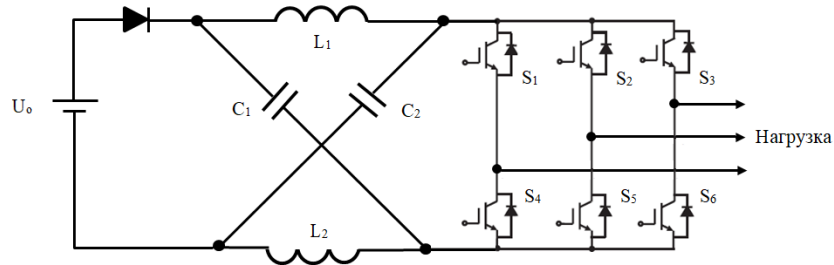


Рисунок 3.1 – Функциональная схема замещения Z-инвертора

Суть работы Z-инвертора заключается в накоплении энергии в течение режима КЗ, когда нагрузка не подключена к источнику, и последующей ее передачи в нагрузку вместе с энергией от источника в течение активного режима [40]. Для предотвращения разряда конденсатора через источник в схеме использован диод.

Рассмотрим работу преобразователя в основных его режимах.

3.2.1 Активное состояние

Схема замещения Z-инвертора в данном состоянии представлена на рисунке 3.2. Инверторный мост и нагрузка представлены ключом S и источником тока I_0 , значение которого зависит от нагрузки.

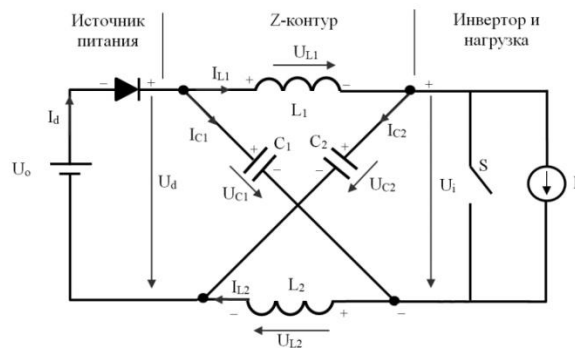


Рисунок 3.2 – Схема замещения Z-инвертора в активном состоянии

На рисунке 3.2 использованы следующие обозначения: U_0 – напряжение

источника, B ; U_L, I_L – напряжение и ток катушки индуктивности, B, A ; U_C, I_C – напряжение и ток конденсатора, B, A ; U_d, I_d – напряжение и ток на входных зажимах Z -контра, соединенного с источником посредством диода, B, A ; U_i, I_i – напряжение и ток на входных зажимах транзисторного моста, B, A . Напряжение U_i эквивалентно напряжению ЗПТ.

Активный режим характеризуется передачей энергии от источника в нагрузку. Во время работы инвертора в нем обеспечивается передача запасенной ранее энергии в элементах Z -контра. Тем самым обеспечивается повышение напряжения звена постоянного тока, а также выходного напряжения преобразователя.

Уравнения, описывающие данный режим, имеют вид:

$$\begin{aligned} U_L(t) = U_0 - U_C(t) \quad U_i(t) = 2U_C(t) - U_0 \quad U_d(t) = U_0 \\ I_i(t) = I_0(t) \quad I_d(t) = I_C(t) + I_L(t) \quad I_C(t) = I_L(t) - I_0(t) = \frac{I_d(t) - I_0(t)}{2} \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.2.2 Нулевое состояние

В течение нулевого состояния передачи энергии в нагрузку не происходит, и конденсаторы Z -контра заряжаются до напряжения источника. Уравнения имеют вид:

$$\begin{aligned} U_L(t) = U_C(t) \quad U_i(t) = 0 \quad U_d(t) = U_0 \\ I_i(t) = 0 \quad I_d(t) = 0 \quad I_C(t) = -I_L(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2.3 Состояние короткого замыкания

В течение периода КЗ входной источник отсоединен от Z -контра и от нагрузки (рисунок 3.3). Образуются два отдельных контра, в пределах которых происходит перераспределение энергии между катушкой и конденсатором. Накопленная катушками Z -контра энергия передается в нагрузку в течение следующего активного периода.

В отличие от нулевого состояния состояние КЗ обеспечивает запасание дополнительной энергии в элементах Z -контра, что позволяет повысить выходное

напряжения преобразователя без установки дополнительных устройств.

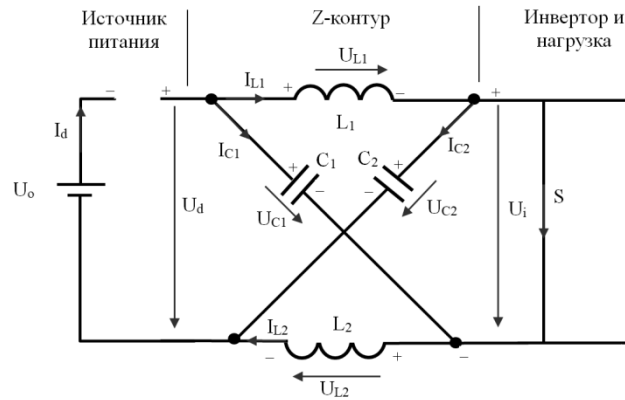


Рисунок 3.3 – Схема замещения Z-инвертора в состоянии КЗ

Уравнения режима имеют вид:

$$\begin{aligned} U_L(t) = U_C(t) = \frac{U_d(t)}{2} \quad U_i(t) = 0 \quad U_d(t) = U_0 \\ I_C(t) = -I_L(t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Исходя из анализа режимов работы, получены уравнения установившегося состояния Z-инвертора [94]:

$$U_C = U_0 \frac{1-D_0}{1-2D_0} \quad I_L = I_0 \frac{1-D_0}{1-2D_0}, \quad (3.4)$$

где $D_0 = \frac{T_0}{T_s}$ – скважность состояния КЗ, равная отношению длительности

данного состояния T_0 ко времени всего цикла коммутации T_s .

При этом максимальное значение напряжения ЗПТ будет определяться как:

$$\bar{U}_i = \frac{U_0}{1-2D_0} = BU_0, \quad (3.5)$$

где B – повышающий коэффициент.

Тогда выходное максимальное фазное напряжение инвертора будет равно:

$$U_m = M \frac{\bar{U}_i}{2} = M \frac{BU_0}{2}. \quad (3.6)$$

Таким образом, повышение значения напряжения ЗПТ достигается путем регулирования длительности нахождения Z-инвертора в состоянии КЗ.

3.3 Способы внедрения импульсов КЗ в цикл коммутации

Согласно [78] регулирование Z-инвертора осуществляется аналогично управлению ШИМ инвертором напряжения. В зависимости от выбранной техники модуляции импульсы состояния КЗ Z-инвертора могут быть получены различными способами [90]. Рассмотрим основные способы образования импульсов данного состояния для Z-инвертора: простой (*Simple Boost*) [94], максимальный (*Maximum Boost*) [91], максимальный постоянный способы (*Maximum Constant Boost*) [92].

Простой способ является наиболее простым для применения способом образования состояния КЗ. Он образуется путем модификации синусоидальной ШИМ [94] (рисунок 3.10а). Для этого пилообразный опорный сигнал дополнительно сравнивается с положительным и отрицательным значениями, определяемыми требуемым коэффициентом состояния КЗ D_0 (рисунок 3.4).

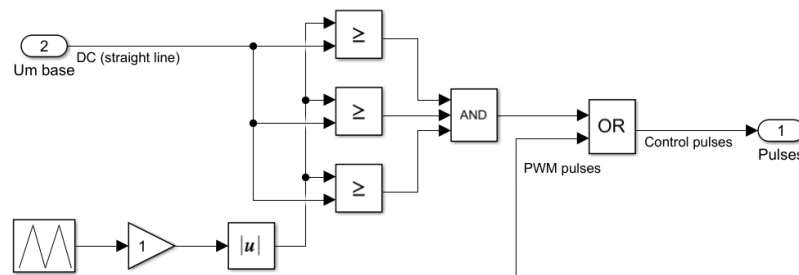


Рисунок 3.4 – Реализация простого способа образования состояний КЗ в *Matlab*

Недостатком данного подхода является снижение индекса модуляции при возрастании скважности состояния КЗ, что приводит к ограничению максимального значения выходного напряжения. Данный недостаток может быть устранен путем модификации способа и отдельного управления индексом модуляции и скважностью режима КЗ.

Максимальный способ обеспечивает полную замену всех стандартных нулевых состояний инвертора состояниями КЗ, сохраняя при этом неизменность длительности активных состояний (рисунок 3.5)

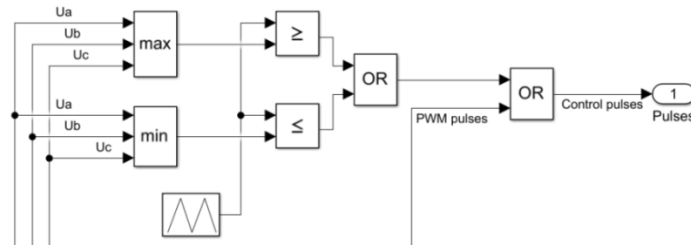


Рисунок 3.5 – Реализация максимального способа образования состояний КЗ в *Matlab*

Он позволяет обеспечить более высокие значения повышающего коэффициента B , однако коэффициент D_0 изменяется с частотой в 6 раз превышающей выходную частоту, что приводит к возникновению больших пульсаций тока индуктивности и напряжения конденсатора, а также увеличению размеров и стоимости Z -элементов [90] (рисунок 3.10б).

Максимальный постоянный способ позволяет устранить недостатки максимального способа и обеспечить постоянство коэффициента D_0 при достижении максимального повышающего коэффициента B (рис.30в). Однако при этом существенно усложняется построение системы образования импульсов КЗ (рисунок 3.6)

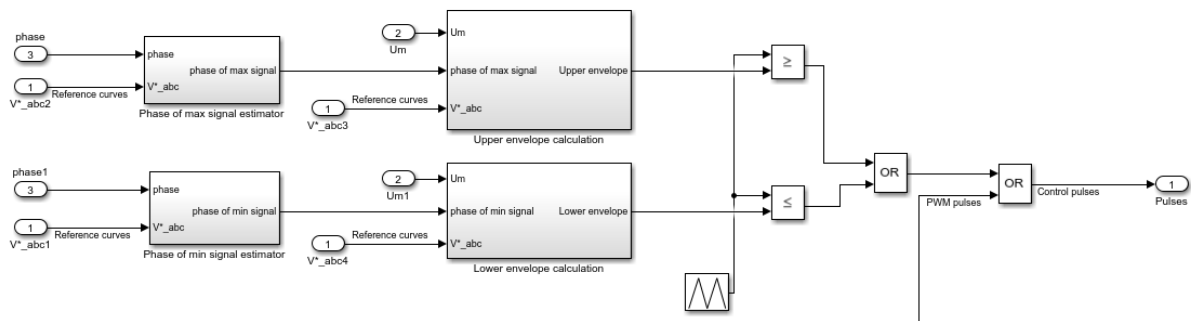


Рисунок 3.6 – Реализация максимального постоянного способа образования состояний КЗ в *Matlab*

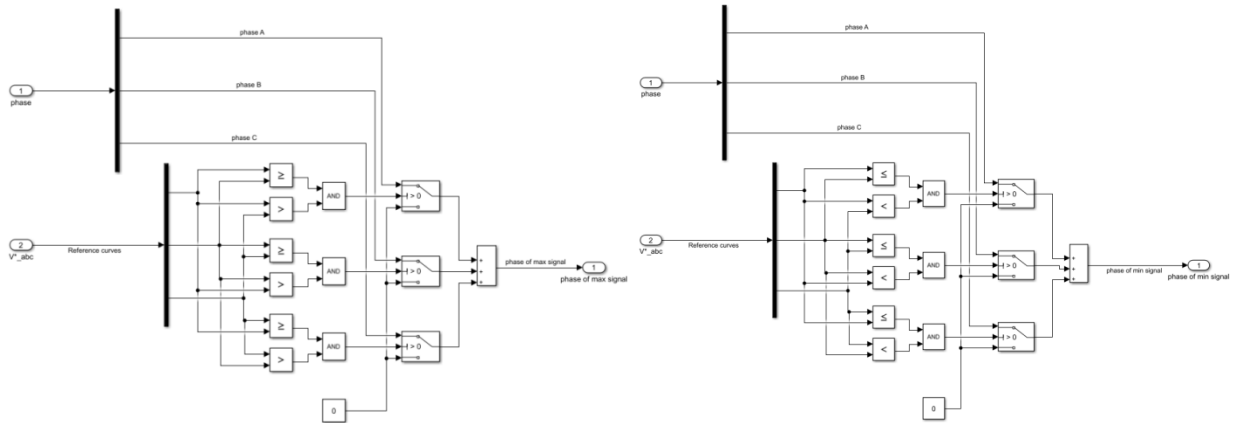


Рисунок 3.7 – Блоки определения фазы максимального (а) и минимального (б) сигналов

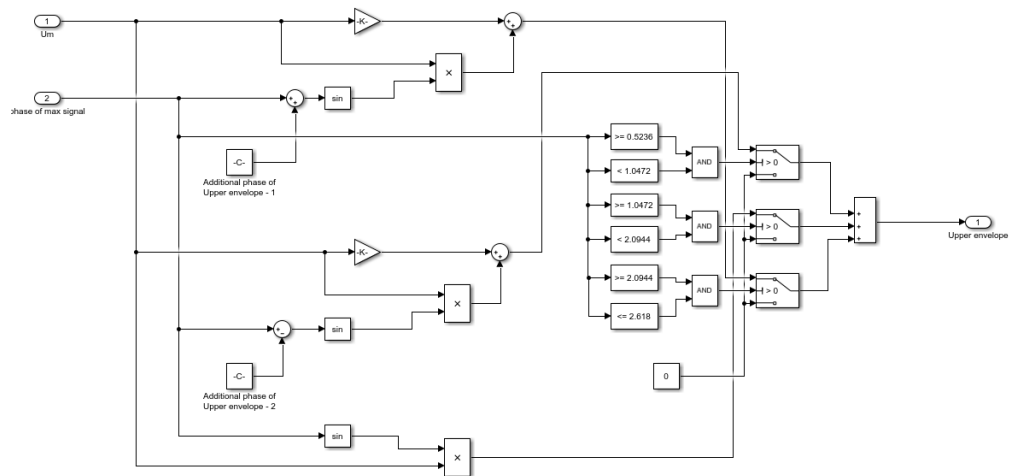


Рисунок 3.8 – Блок вычисления верхней огибающей модуляционного сигнала

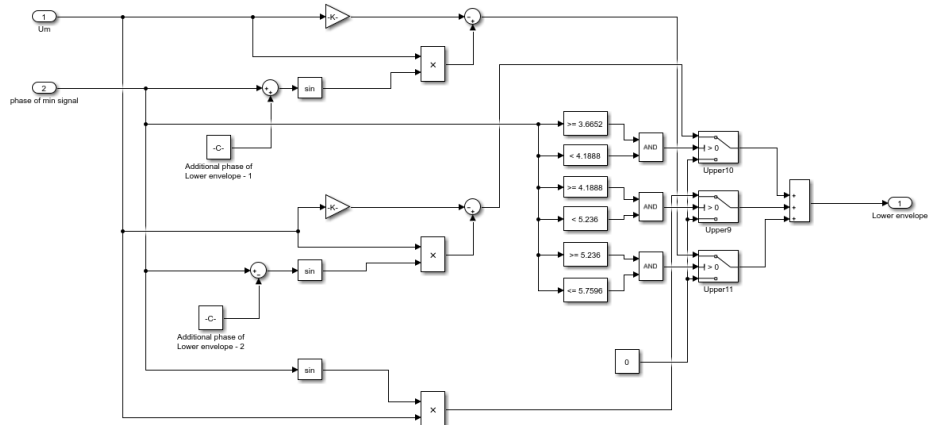


Рисунок 3.9 – Блок вычисления нижней огибающей модуляционного сигнала

Схемы образования импульсов состояния КЗ, а также опорные и модулирующие сигналы для каждого представленного способа модуляции

Z-инвертора показаны на рисунке 3.10 [90].

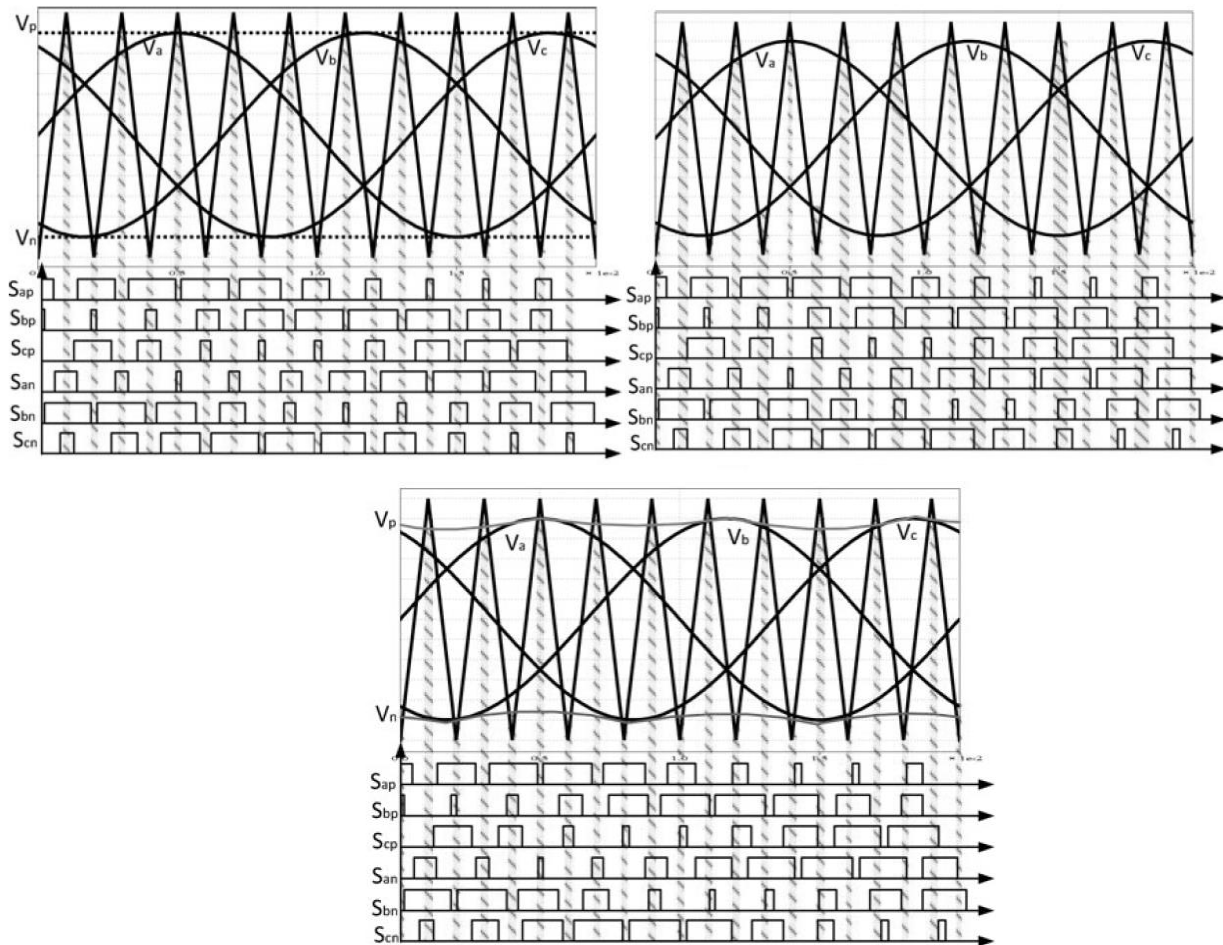



Рисунок 3.10 – Способы образования импульсов состояния КЗ: простой (а), максимальный (б), максимальный постоянный (в);  - состояния КЗ.

В соответствии с [65,90], в качестве критериев выбора способа внедрения состояний КЗ в цикл коммутации примем следующие критерии с учетом сложности построения системы управления: уровень гармонических искажений в выходном линейном напряжении и выходном фазном токе и уровень пульсаций напряжения ЗПТ и тока индуктивности.

В соответствии с математическими формулами, представленными в [91,92,94], были построены имитационные модели для каждого способа модуляции Z-инвертора в среде *Matlab-Simulink*. Имитационные результаты для каждого способа представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сравнение способов образования состояний КЗ Z-инвертора

Критерии способа	Простой	Максимальный	Максимальный постоянный
<i>THD</i> выходного линейного напряжения (форма – меандр)	91,97%	91,93%	92,19%
<i>THD</i> выходного линейного напряжения (после фильтра – синусоида)	10,1%	18%	8,6%
<i>THD</i> выходного фазного тока	1,1%	1,64%	0,84%
Пульсации напряжения ЗПТ	0,8%	1,2%	0,7%
Пульсации тока индуктивности	15%	28%	12%
Сложность построения системы управления	Низкая	Средняя	Высокая

Исходя из сравнения видно, что результаты для простого и максимального постоянного способов отличаются незначительно. Учитывая сложность построения системы управления для максимального постоянного способа, в диссертационной работе основной акцент сделан на использовании простого способа модуляции Z-инвертора.

Полученные результаты аналогичны результатам, представленным в [97,113], что подтверждает их валидность.

3.4 Динамическое моделирование работы Z-инвертора

Эффективность работы Z-преобразователя в составе ЧРП зависит от типа и свойств системы автоматического управления. Выбор схемы и обоснование параметров инвертора требует знания динамических свойств системы, которые полностью определяет передаточная функция. Отсюда вытекает необходимость

проведения динамического моделирования, что является необходимым условием для проектирования регулятора системы управления ЧРП.

Асинхронный электродвигатель может быть представлен в упрощенном виде схемой замещения, состоящей из R и L -элементов [19,43,45]. В таком случае для трехфазного Z -инвертора с симметричной RL -нагрузкой выходная мощность всегда постоянна, что дает возможность рассматривать динамические характеристики относительно одной фазы без потери общности.

Как показано в [94], нулевые состояния преобразователя полностью заменяются состояниями КЗ, что позволяет анализировать работу Z -инвертора только в двух динамических состояниях. Такому представлению соответствует эквивалентная схема замещения на рисунке 3.11:

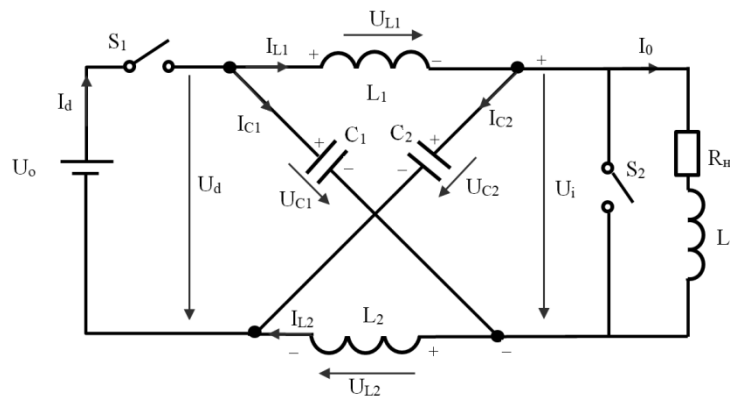


Рисунок 3.11 – Эквивалентная схема замещения Z -инвертора

В схеме рисунка 3.11 R_n , L_n – сопротивление и индуктивность нагрузки, Ом, Гн.

Эквивалентная схема содержит два ключа. Диод заменен на ключ S_1 , ключ S_2 моделирует работу инверторного моста. Его скважность определяется коэффициентом заполнения состояния КЗ преобразователя.

Активный режим возникает при замыкании ключа S_1 и размыкании ключа S_2 . При этом происходит передача энергии в нагрузку. Состояние КЗ Z -инвертора возникает при разомкнутом ключе S_1 и замкнутом ключе S_2 . Происходит запасание энергии в элементах Z -контура.

Z-инвертор представляет собой нелинейную систему [90]. Сигналы входного напряжения и скважности состояния КЗ состоят из переменной и постоянной составляющих (рисунок 3.12), причем изменение переменной составляющей значительно меньше значения постоянной составляющей. Это дает возможность рассматривать переменную составляющую как малый сигнал, т.е. небольшое возмущение в окрестности рабочей точки.

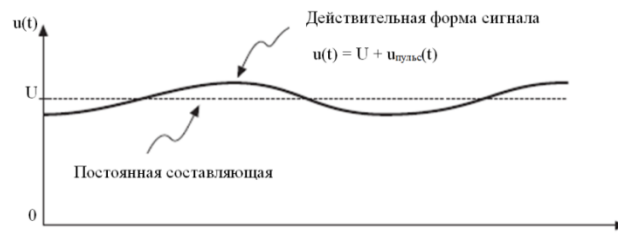


Рисунок 3.12 – Сигнал напряжения на входе Z-инвертора

Малый сигнал подразумевает, что управление Z-инвертором осуществляется в ограниченном диапазоне на линейном участке характеристики нелинейной системы, что должно обеспечиваться за счет надлежащего выбора параметров Z-элементов.

Рассмотрение малых сигналов позволяет использовать моделирование малыми сигналами, являющееся наиболее распространенным среди существующих способов анализа работы устройств силовой электроники [68].

Целью проведения динамического моделирования является получение модели малых сигналов Z-инвертора, обеспечивающей представление о динамике системы [38].

При выполнении моделирования сделаны следующие допущения:

- источник входного напряжения является независимым источником;
- элементы L и C – идеальные;
- падения напряжения на ключе S_1 не происходит;
- пренебрегаем сопротивлением ключа S_2 , ввиду того, что оно значительно меньше сопротивления нагрузки.

Определим переменные состояния и представим их в виде векторов:

$$x(t) = [i_{L1}(t) \quad i_{L2}(t) \quad U_{C1}(t) \quad U_{C2}(t) \quad i_0(t)]^T \quad (3.7)$$

Математическое описание каждого режима осуществляется в матричной форме и представляется в пространстве состояний как:

$$K \dot{x} = Ax + Bu, \quad (3.8)$$

где u – вектор напряжения входного источника.

Тогда матричное представление уравнений (3.3) примет вид:

$$K = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_n \end{bmatrix}, \quad A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -R_n \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Матричное представление уравнений (3.1):

$$K = \begin{bmatrix} L_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_n \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -R_n \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (3.10)$$

Для получения передаточной функции Z-инвертора в диссертационной работе использован метод малых сигналов, представляющий собой математический метод исследования реакций динамических систем на малое возмущение. Суть метода заключается в линеаризации характеристики преобразователя в окрестности рабочей точки и внесении малых возмущений в переменные состояния [68]. Предположим, что во входном напряжении и скважности состояния КЗ присутствуют малые пульсации:

$$\begin{cases} u_0(t) = U_0 + \hat{u}_0(t); \\ d(t) = D_0 + \hat{d}(t), \end{cases} \quad (3.11)$$

где $\hat{u}_0(t)$, $\hat{d}(t)$ – малые пульсации входного напряжения и скважности состояния КЗ.

Тогда эти возмущения будут вызывать изменения переменных состояния, которые будут равны сумме постоянной составляющей и малой переменной. Объединяя (3.9) и (3.10) с помощью метода суперпозиции [3] и внося малые переменные, получим уравнение возмущений в общем виде:

$$\begin{aligned} K \dot{\hat{X}} = & (D_0 A_1 + D' A_2) X + (D_0 B_1 + D' B_2) U + \\ & + (D_0 A_1 + D' A_2) \hat{X} + (D_0 B_1 + D' B_2) \hat{U} + \hat{d}(t) [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) U] +, \\ & + \hat{d}(t) [(A_1 - A_2) \hat{X} + (B_1 - B_2) \hat{U}] \end{aligned} \quad (3.12)$$

где D' – скважность ключа S_L , определяющего коэффициент заполнения активного состояния. $D' + D_0 = 1$.

Полученное уравнение содержит три составляющие: постоянные, переменные первого порядка и переменные второго порядка. Постоянные составляющие (3.12), а также уравнения (3.9) и (3.10) использованы для получения уравнений установившегося режима, в котором малые возмущения отсутствуют. В этом случае уравнения в матричной форме примут вид:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & D_0 & -D' & 0 \\ 0 & 0 & -D' & D_0 & 0 \\ -D_0 & D' & 0 & 0 & -D' \\ D' & -D_0 & 0 & 0 & -D' \\ 0 & 0 & D' & D' & -R_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ U_{C1} \\ U_{C2} \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D' \\ D' \\ 0 \\ 0 \\ -D' \end{bmatrix} U_0. \quad (3.13)$$

Тогда установившиеся значения переменных состояния будут равны:

$$U_c = \frac{1-D_0}{1-2D_0} U_0 \quad I_L = \frac{1-D_0}{1-2D_0} I_0 \quad I_0 = \frac{U_c}{R_n}. \quad (3.14)$$

Данные уравнения совпадают с полученными ранее уравнениями (3.4).

Пренебрегая переменными второго порядка малости [68] и группируя переменные первого порядка (3.12), получаем уравнение малых переменных в

общем виде:

$$K \dot{\hat{X}} = (D_0 A_1 + D' A_2) \hat{X} + (D_0 B_1 + D' B_2) \hat{U} + \hat{d}(t) [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) U] \quad (3.15)$$

Для симметричного Z-инвертора, параметры которого $L_1 = L_2$, $C_1 = C_2$, применяя преобразование Лапласа к (3.15), получим уравнения, описывающие изменения малых переменных состояния:

$$\begin{cases} sL \hat{i}_L(s) = (D_0 - D') \hat{u}_C(s) + D' \hat{u}_0(s) + (2U_C - U_0) \hat{d}(s); \\ sC \hat{u}_C(s) = (D' - D_0) \hat{i}_L(s) + (-2I_L + I_H) \hat{d}(s) - D' \hat{i}_0(s); \\ sL_H \hat{i}_0(s) = 2D' \hat{u}_C(s) - D' \hat{u}_0(s) + (U_0 - 2U_C) \hat{d}(s) - R_H \hat{i}_0(s). \end{cases} \quad (3.16)$$

При анализе и моделировании процессов использовался принцип суперпозиции, в соответствии с которым отклик одной из переменной состояния на множество малых возмущений описывается линейной комбинацией откликов на каждое индивидуальное возмущение:

$$\begin{cases} \hat{u}_C(s) = G_{uu}(s) \hat{u}_0(s) + G_{ud}(s) \hat{d}(s); \\ \hat{i}_L(s) = G_{iu}(s) \hat{u}_0(s) + G_{id}(s) \hat{d}(s), \end{cases} \quad (3.17)$$

где $G_{uu}(s)$ – передаточная функция изменения напряжения конденсатора на изменение входного напряжения; $G_{iu}(s)$ – передаточная функция изменения тока индуктивности на изменение входного напряжения; $G_{ud}(s)$ – передаточная функция изменения напряжения конденсатора на изменение скважности состояния КЗ; $G_{id}(s)$ – передаточная функция изменения тока индуктивности на изменение скважности состояния КЗ.

Путем дальнейших преобразований уравнений (3.16) и (3.17), получены необходимые передаточные функции для напряжения конденсатора [36]:

$$G_{uu}(s) = \frac{\hat{u}_C(s)}{\hat{u}_0(s) \hat{d}(s)=0} = \frac{a_1 s + a_2}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}. \quad (3.18)$$

$$G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_c(s)}{\hat{d}(s)_{\hat{u}_0(s)=0}} = \frac{a_3 s^2 + a_4 s + a_5}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}, \quad (3.19)$$

где a_n – коэффициент числителя передаточной функции, $n = 1, 2, \dots, 10$; b_3, b_2, b_1, b_0 – коэффициенты знаменателя.

Коэффициенты имеют вид:

$$b = \left[LL_{\text{H}} C \quad LCR_{\text{H}} \quad 2(1 - D_0)^2 L + L_{\text{H}}(2D_0 - 1)^2 \quad R_{\text{H}}(2D_0 - 1)^2 \right]$$

$$a_1 = L_{\text{H}}(1 - D_0)(1 - 2D_0) + (1 - D_0)^2 L;$$

$$a_2 = R_{\text{H}}(1 - D_0)(1 - 2D_0);$$

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

$$a_4 = (1 - 2D_0)(2U_c - U_0)L_{\text{H}} + R_{\text{H}}L(-2I_L + I_0) + L(1 - D_0)(2U_c - U_0);$$

$$a_5 = R_{\text{H}}(1 - 2D_0)(2U_c - U_0).$$

Путем выполнения аналогичных преобразований, получены передаточные функции для тока индуктивности [36]:

$$G_{iu}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{u}_0(s)_{\hat{d}(s)=0}} = \frac{a_6 s^2 + a_7 s}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}. \quad (3.20)$$

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)_{\hat{u}_0(s)=0}} = \frac{a_8 s^2 + a_9 s + a_{10}}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}. \quad (3.21)$$

Коэффициенты передаточных функций имеют вид:

$$a_6 = L_{\text{H}} C(1 - D_0);$$

$$a_7 = CR_{\text{H}}(1 - D_0) + (1 - D_0)^2;$$

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

$$a_9 = CR_{\text{H}}(2U_c - U_0) + (-2I_L + I_0)(2D_0 - 1)L_{\text{H}};$$

$$a_{10} = R_{\text{H}}(-2I_L + I_0)(2D_0 - 1) + (1 - D_0)(2U_c - U_0).$$

Полученные передаточные функции показывают, что процессы в Z-инверторе в значительной мере определяются скважностью состояния КЗ.

3.5 Выбор параметров Z-преобразователя

Получение численных значений передаточных функций требует обоснования выбора параметров Z-инвертора, обуславливающих работу преобразователя на линейном участке характеристики. Это подчеркивает важность и необходимость получения аналитических формул для параметров C и L элементов Z-сети при заданных условиях работы.

Пренебрегая потерями мощности в силовых ключах инвертора и влиянием гармоник на стороне переменного тока, получим, что средняя мощность, передаваемая от звена постоянного тока к нагрузке, определяется как мощность за один период коммутации [101]:

$$\bar{U}_i I_0 (1 - D_0) = \frac{3}{2} U_m I_m \cos \varphi, \quad (3.22)$$

где I_m – максимальный фазный ток на стороне AC, A ; φ – угол между током и напряжением; \bar{U}_i – эквивалентное напряжение звена постоянного тока, B ; U_m – максимальное значение выходного фазного напряжения инвертора, B ;

Учитывая (3.6), получим выражение для тока нагрузки:

$$I_0 = \frac{3U_m I_m \cos \varphi}{2\bar{U}_i (1 - D_0)} = \frac{3M \cdot \bar{U}_i I_m \cos \varphi}{4\bar{U}_i (1 - D_0)} = \frac{3}{4} \frac{M \cdot I_m \cos \varphi}{(1 - D_0)}. \quad (3.23)$$

Для оценки пульсаций переменных состояния введем понятие коэффициента пульсаций:

$$k_u = \frac{\Delta U_c}{\bar{U}_c} \quad k_i = \frac{\Delta I_L}{\bar{I}_L} \quad (3.24)$$

Полагаем, что в установившемся режиме изменения переменных состояния Z-инвертора происходит по линейному закону (рисунок 3.13).

Тогда получим:

$$\Delta U_c = \frac{\bar{I}_c \Delta t}{C} \quad \Delta I_L = \frac{\bar{U}_L \Delta t}{L} \quad (3.25)$$

С учетом изменения в состоянии КЗ:

$$2\Delta U_c = \frac{\bar{I}_L D_0 \cdot T_s}{C} \quad 2\Delta I_L = \frac{\bar{U}_c D_0 \cdot T_s}{L}, \quad (3.26)$$

где T_s – длительность цикла коммутации, мс.

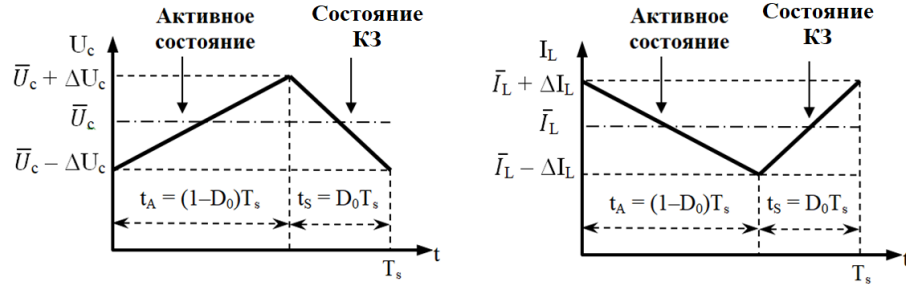


Рисунок 3.13 – Изменение напряжение конденсатора (а) и тока индуктивности (б) в установившемся режиме

Учитывая (3.4), получаем:

$$C = \frac{I_0 D_0 T_s}{2k_u U_0} \quad L = \frac{U_0 D_0 \cdot T_s}{2k_i I_0}. \quad (3.27)$$

Подставляя полученные выражения в (3.23), получим уравнения для определения параметров Z-инвертора при заданных уровнях пульсаций переменных состояния:

$$C = \frac{3D_0 T_s M \cdot I_m \cos \varphi}{8k_u U_0 (1 - D_0)} \quad L = \frac{2U_0 D_0 T_s (1 - D_0)}{3k_i M \cdot I_m \cos \varphi} \quad (3.28)$$

Для рассматриваемого в диссертационной работе простого способа модуляции соотношение между индексом модуляции и коэффициентом заполнения состояния КЗ имеет вид [94]:

$$M = 1 - D_0. \quad (3.29)$$

Тогда формула (3.23) примет вид:

$$I_0 = \frac{3}{4} I_m \cos \varphi. \quad (3.30)$$

Исходя из (3.6), имеем:

$$\bar{U}_i = \frac{U_0}{1 - 2D_0} = \frac{2U_m}{M} = \frac{2U_m}{1 - D_0}. \quad (3.31)$$

Выражаем скважность состояния КЗ:

$$\frac{U_0}{1-2D_0} = \frac{2U_m}{1-D_0} \Rightarrow U_0(1-D_0) = 2U_m(1-2D_0). \quad (3.32)$$

Отсюда она равна:

$$D_0 = \frac{2U_m - U_0}{4U_m - U_0}. \quad (3.33)$$

Учитывая полученные выражения, формула (3.28) для расчёта параметров Z-инвертора с простым способом модуляции будут иметь вид [42]:

$$C = \frac{3T_s I_m \cos \varphi \cdot (2U_m - U_0)}{8k_u U_0 (4U_m - U_0)} \quad L = \frac{2U_0 T_s (2U_m - U_0)}{3k_i I_m \cos \varphi (4U_m - U_0)} \quad (3.34)$$

По результатам разработки способа выбора параметров Z-инвертора написана «Программа для вычисления параметров Z-инвертора с активно-индуктивной нагрузкой» и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017617528 [42].

3.6 Особенности компенсации симметричных провалов напряжения при применении Z-инвертора в составе электропривода

Как было указано в первой главе, если во время провала напряжения изменение формы напряжения во всех фазах происходит одинаковым образом и при этом угол сдвига фаз не изменяется, то провал напряжения называют симметричным. Это позволяет рассматривать только одну фазу без потери общности.

При возникновении симметричного провала напряжения напряжение питающей сети падает ниже значения напряжения ЗПТ. Диодный выпрямитель переходит в закрытое состояние, и Z-элементы перестают получать энергию из сети. При этом конденсаторы и катушки Z-сети начинают разряжаться до тех пор, пока напряжение ЗПТ не станет равным остаточному напряжению провала. После этого система перейдет в новое установившееся состояние. Если напряжение ЗПТ становится меньше значения уставки срабатывания защиты, то ЧРП отключится.

Стоит отметить, что разряд Z -элементов будет определяться лишь параметрами нагрузки, подключённой к ЗПТ, а не переменным напряжением на входе сети.

Для определения изменения напряжения конденсатора Z -инвертора в течение провала проведем математический анализ энергетических соотношений. Перед выполнением анализа сделаны следующие допущения:

1. Пренебрегаем потерями мощности в силовых ключах инвертора.
2. Пренебрегаем влиянием гармоник на стороне переменного тока.
3. Напряжение конденсатора и ток индуктивности изменяются по линейному закону.
4. Колебания переменных состояния малы по сравнению с их средними значениями.

Важность третьего и четвертого допущений заключается в предположении о работе Z -инвертора на линейном участке характеристики, что достигается выбором параметров преобразователя по полученным формулам (3.34).

Энергия, запасенная в элементах симметричного Z -инвертора, равна энергии в первый момент после возникновения провала напряжения за вычетом энергии, потребленной двигателем:

$$E = E_{sag,0} - Pt, \quad (3.35)$$

где P – номинальная мощность двигателя, кВт.

$$2 \left(\frac{C \cdot U_c^2(t)}{2} + \frac{L \cdot I_L^2(t)}{2} \right) = 2 \left(\frac{C \cdot U_{c0}^2}{2} + \frac{L \cdot I_{L0}^2}{2} \right) - Pt, \quad (3.36)$$

где U_{c0}, I_{L0} – напряжение конденсатора и ток индуктивности в начальный момент возникновения провала напряжения, B, A ;

Исходя из сделанных допущений, средняя мощность, передаваемая от ЗПТ в нагрузку, будет определяться [101]:

$$P_{cp} = U_i I_i (1 - D_0), \quad (3.37)$$

где I_i – максимальный фазный ток на стороне AC , A ; U_i – эквивалентное напряжение звена постоянного тока, B ; D_0 – скважность состояния КЗ Z -инвертора.

Принимая во внимания уравнения установившегося состояния Z -инвертора [94]:

$$\begin{aligned} I_L &= I_0 \frac{1-D_0}{1-2D_0} & U_c &= U_0 \frac{1-D_0}{1-2D_0} \\ U_0 &= (1-2D_0) \cdot U_i & I_0 &= (1-2D_0) \cdot I_i \end{aligned} \quad (3.38)$$

перепишем указанную формулу для средней мощности в следующем виде:

$$P_{cp} = U_{c0} I_{L0} \frac{1}{(1-D_0)}. \quad (3.39)$$

Тогда на основании энергетического баланса инвертора выразим ток индуктивности:

$$I_{L0} = \frac{P_{cp}(1-D_0)}{U_{c0}}. \quad (3.40)$$

Учитывая сделанные допущения и характер изменения тока индуктивности в установившемся режиме (3.25), (3.26), изменение тока индуктивности в течение провала будет определяться следующим выражением

$$I_L(t) = I_{L0} - \frac{D_0 U_c(t) \cdot t}{(1-D_0)L}. \quad (3.41)$$

Собрав воедино все формулы (3.36), (3.40), (3.41), получим выражение для изменения напряжения конденсатора [37]:

$$CU_c^2(t) + L \left(I_{L0} - \frac{D_0 U_c(t) \cdot t}{(1-D_0)L} \right)^2 = CU_{c0}^2 + \frac{P_{cp}^2 (1-D_0)^2 L}{U_{c0}^2} - Pt. \quad (3.42)$$

Согласно проведенному анализу, существует два способа компенсации симметричных провалов напряжений для предлагаемой топологии. Первый способ заключается в управлении режимом работы привода путем регулирования потребления им энергии. Второй способ заключается в регулировании дополнительной запасенной энергии в Z -элементах.

В диссертационной работе основное внимание уделено второму способу, который достигается путем регулирования длительности состояния КЗ Z-инвертора.

Проведенный математический анализ показал возможность обеспечения устойчивой работы ЧРП к провалам только за счет использования свойств Z-инвертора без добавления дополнительных контуров управления.

3.6.1 Анализ устойчивости электропривода к провалам напряжения

Устойчивость привода принято оценивать при помощи «кривой устойчивости», которая строится в прямоугольной системе координат, где по оси абсцисс откладывают время, а по оси ординат – напряжение конденсатора в относительных единицах. За начало отсчета берется момент возникновения в сети провала напряжения [71].

Кривая устойчивости отражает динамику поведения привода в случае возникновения провала напряжения. Одним из ее важных параметров является время, за которое напряжение конденсатора снизится до значения, соответствующего напряжению срабатывания защиты минимального напряжения. Кривая устойчивости также учитывает скорость изменения напряжения конденсатора, и показывает, какое время привод еще способен работать после отключения питания или при провале напряжения.

На основании проведенного математического анализа энергетических соотношений, были построены кривые конденсатора звена постоянного тока для различных значений параметров Z-инвертора, позволяющие судить об устойчивости ЧРП (рисунок 3.14).

На рисунке 3.14 кривая 1 построена для параметров: $L=0$ $C=100\text{мкФ}$, кривая 2 построена для значений, рассчитанных по разработанному алгоритму (3.34): $L=250\text{мкГн}$ $C=100\text{мкФ}$ и кривая 3 – для параметров: $L=250\text{мкГн}$ $C=1000\text{мкФ}$.

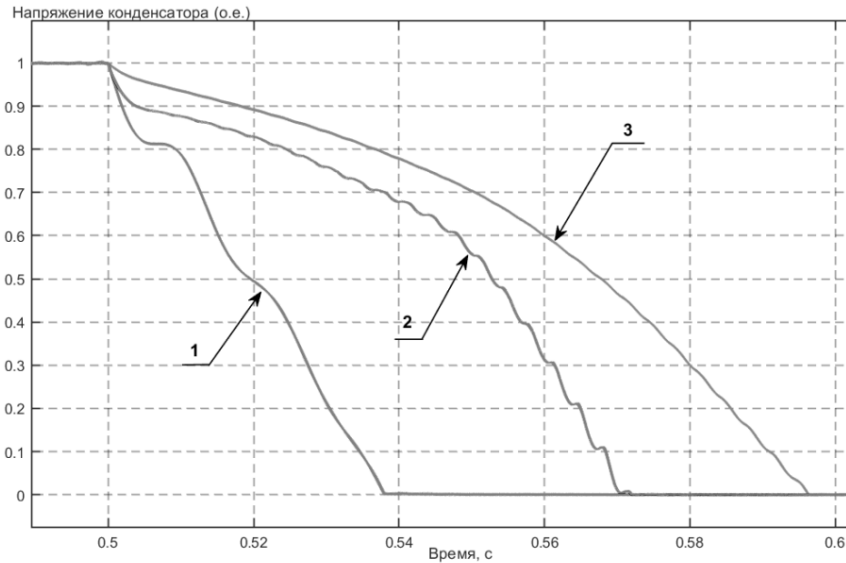


Рисунок 3.14 – Кривые разряда конденсатора звена постоянного тока

Выделим критерии сравнения полученных зависимостей: критерий скорости изменения напряжения конденсатора и временной критерий достижения значения уставки срабатывания ЗМН.

В результате анализа установлено, что средняя скорость падения напряжения конденсатора для первой кривой составляет $28 \text{ }^{\circ}\text{e}/\text{с}$, для 2 кривой – $13 \text{ }^{\circ}\text{e}/\text{с}$ и для третьей кривой – $9 \text{ }^{\circ}\text{e}/\text{с}$. Время достижения уровня срабатывания ЗМН для первой кривой составляет 20мс, для второй – 52мс и для третьей – 65мс.

Стоит отметить, что кривая 1 была построена без учета индуктивности. Подобный случай характерен для кривой устойчивости электропривода стандартной топологии только с одним накопителем энергии в звене постоянного тока. Такие кривые устойчивости характерны для исследований О. Б. Шонина, Н. Г. Новожилова [52,53] и *Stockman* [110].

Исходя из сравнительного анализа кривых, сделан вывод, что явным преимуществом разрабатываемой топологии на базе Z-инвертора является обеспечение повышения устойчивости работы привода к симметричным провалам напряжения в 2,6 раза на основании выделенных критериев.

3.7 Выводы по третьей главе

1. В результате проведенного анализа режимов работы Z -инвертора получены уравнения для установившегося режима и максимального значения напряжения ЗПТ.

2. Проведен сравнительный анализ основных способов образования состояний КЗ Z -инвертора на основании выбранных критериев, по результатам которого выбран простой способ модуляции.

3. Проведен анализ динамических режимов работы Z -инвертора, в результате которого определены передаточные функции изменения напряжения конденсатора и тока индуктивности на изменение скважности состояния КЗ и входного напряжения. Установлено, что процессы в Z -инверторе в значительной мере определяются скважностью состояния КЗ.

4. Разработан алгоритм выбора параметров Z -инвертора в зависимости от выбранного способа модуляции и режимов работы нагрузки, обеспечивающий работу преобразователя на линейном участке характеристики.

5. Проведен анализ особенностей компенсации симметричных провалов напряжения при использовании Z -инвертора, по результатам которого получено аналитическое выражение изменения напряжения конденсатора при возникновении провала напряжения. Показана возможность обеспечения устойчивой работы ЧРП к провалам напряжения только за счет регулирования длительности состояния КЗ Z -инвертора без добавления дополнительных контуров управления.

6. По результатам теоретического анализа построены кривые разряда конденсатора ЗПТ, позволяющие судить об устойчивости ЧРП. На основании выделенных критериев установлено, что разработанная топология обеспечивает повышение устойчивости к симметричным провалам напряжения в 2,6 раза по сравнению с классическими топологиями, что подтверждается выявленными аналитическими зависимостями.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ Z-ИНВЕРТОРОМ В СОСТАВЕ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ПРИВОДА ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ПРОВАЛОВ НАПРЯЖЕНИЙ

4.1 Вводные замечания

В четвертой главе представлена разработка способа управления Z-инвертором, на основании полученных в третьей главе аналитических зависимостей, и результаты экспериментальной проверки.

В первой части главы разработана модель для исследования переходных процессов в Z-инверторе. Представлены численные значения полученных аналитическим способом передаточных функций и проведено их сравнение с экспериментальными кривыми.

Во второй части главы представлена разработанная компьютерная модель электропривода газового компрессора на основе Z-инвертора, позволяющая определить границы допустимого диапазона снижения напряжения ЗПТ ЧРП при симметричных провалах напряжения. Показана структура системы управления двигателем, описание ее работы, а также порядок синтеза регуляторов для разработанного способа управления Z-инвертором.

В третьей части главы представлены результаты имитационного моделирования работы ЧРП на базе Z-инвертора, которые были сравнены с результатами других методов компенсации провалов напряжений.

Содержание третьей и четвертой глав раскрывают второе защищаемое положение.

4.2 Верификация полученных передаточных функций Z-инвертора

Для проверки адекватности полученных решений в виде передаточных функций была построена компьютерная модель Z-инвертора в среде *MatLab-Simulink* в соответствии с эквивалентной схемой замещения (рисунок 4.1).

На рисунке 4.1 использованы следующие блоки: *Control System* – система управления *Z*-инвертором, C_z , L_z – параметры *Z*-контура, *Load* – *RL*-нагрузка, U_{dc} – источник постоянного напряжения, ключ S_1 , моделирующий работу диода, ключ S_2 , моделирующий работу инверторного моста.

Для фиксации переходных процессов переменных состояния в модели предусмотрены осциллографы *Scope* и *Scope-1*. Осциллограф *Scope-2* показывает изменение тока нагрузки, *Scope-4* – изменение входного тока, *Scope-5* фиксирует изменение напряжения звена постоянного тока.

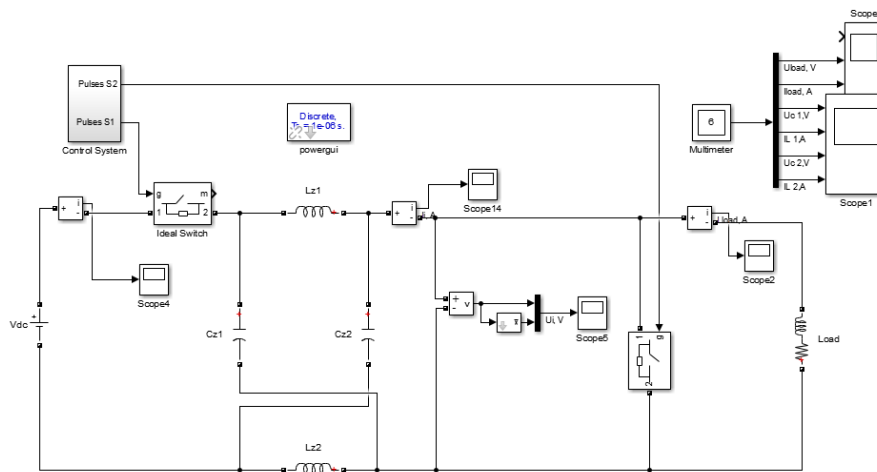


Рисунок 4.1 – Модель для исследования переходных процессов в *Z*-инверторе

В качестве исходных данных приняты: напряжение источника $U_0 = 537\text{В}$; частота коммутации ключей инвертора $f = 10\text{кГц}$; параметры нагрузки были определены исходя из значения мощности двигателя 160кВт и номинального тока 400А : $R_n = 1\text{Ом}$, $L_n = 1,5\text{мГн}$. Для коэффициентов пульсаций тока и напряжения $k_u = k_i = 5\%$ и значения максимального фазного напряжения на выходе инвертора $U_m = 350\text{В}$ в соответствии с (3.34) определены параметры *Z*-инвертора: $C_1 = C_2 = 100\text{мкФ}$, $L_1 = L_2 = 250\text{мкГн}$, $D_0 = 0,1$.

Блок *Control System* вырабатывает импульсы управления комплементарными ключами S_1 и S_2 . Ключ S_2 управляется импульсами состояния КЗ.

Структура блока управления показана на рисунке 4.2а. В данной модели для

получения импульсов состояния КЗ использован модифицированный простой метод. Данный метод позволяет упростить построение системы управления и сократить число управляющих сигналов, что не оказывает влияния на количество и длительность выходных импульсов [87] (рисунок 4.2б). Согласно данному методу импульсы КЗ образуются в моменты, когда значение пилообразного сигнала меньше либо равно постоянному значению, определяемому коэффициентом состояния КЗ D_0 .

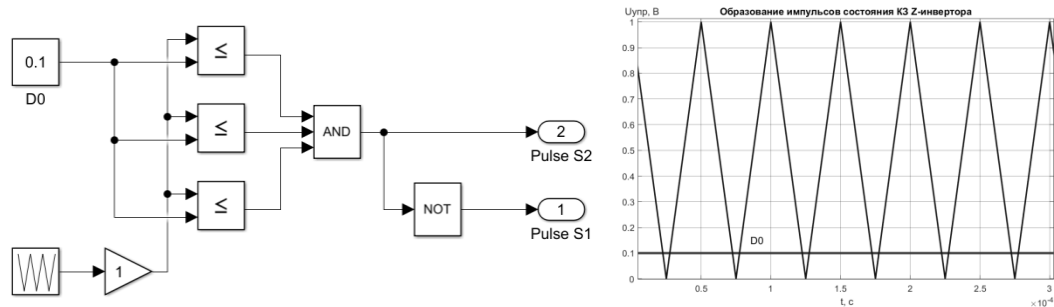


Рисунок 4.2 – Блок системы управления (а) и образование импульсов состояния КЗ Z-инвертора (б)

Было проведено сравнение двух видов переходных процессов. Первый переходной процесс получен через передаточную функцию (рисунок 4.3). Второй – путем представления Z-инвертора функциональной схемой замещения (рисунок 4.1).

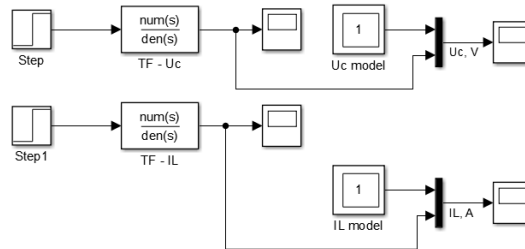


Рисунок 4.3 – Представление Z-инвертора в виде блоков передаточных функций

Согласно (3.19), (3.21) передаточные функции будут иметь вид:

$$G_{ud}(s) = \frac{\hat{u}_c(s)}{\hat{d}(s)_{\hat{u}_0(s)=0}} = \frac{-3,8 \cdot 10^{-6} s^2 + 0,69s + 386,6}{3,75 \cdot 10^{-11} s^3 + 2,5 \cdot 10^{-8} s^2 + 1,365 \cdot 10^{-3} s + 0,64} \quad (4.1)$$

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)_{u_0(s)=0}} = \frac{7,2 \cdot 10^{-5} s^2 + 0,055s + 435}{3,75 \cdot 10^{-11} s^3 + 2,5 \cdot 10^{-8} s^2 + 1,365 \cdot 10^{-3} s + 0,64} . \quad (4.2)$$

Полученные кривые переходных процессов для обоих случаев отражены на рисунках 4.4 и 4.5.

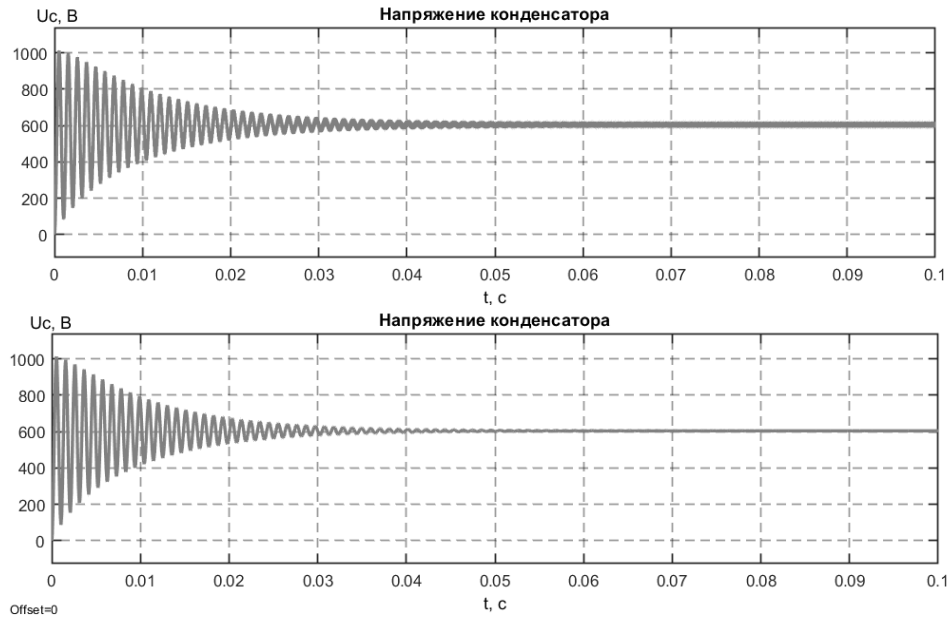


Рисунок 4.4 – Графики экспериментальной (верх) и теоретической (низ)

передаточной функции напряжения конденсатора Z-инвертора

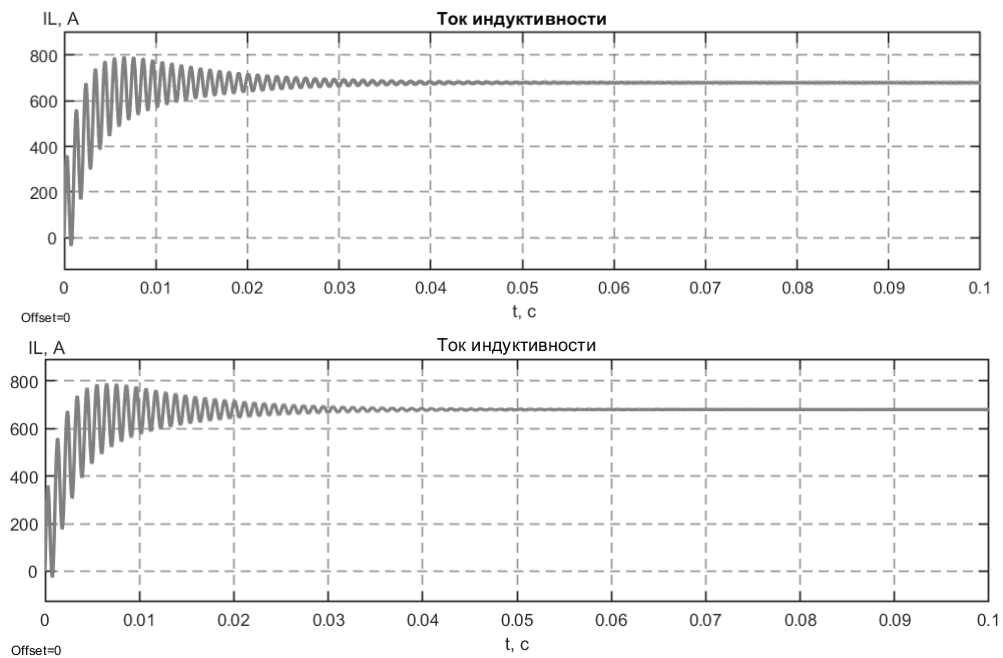


Рисунок 4.5 – Графики экспериментальной (верх) и теоретической (низ)

передаточной функции тока индуктивности Z-инвертора

Идентичность вида кривых переходных процессов подтверждает адекватность полученных решений системы переменных состояния передаточных функций.

Таким образом, в результате аналитических исследований получены передаточные функции Z -инвертора, описывающие динамические свойства преобразователя. Это является основой для решения задачи синтеза регулятора и дальнейшего его использования в системе управления ЧРП.

4.3 Разработка компьютерной модели электропривода с Z -инвертором для оценки допустимого диапазона снижения напряжения ЗПТ при провалах напряжения

Оценка результатов теоретических исследований производилась при помощи компьютерного моделирования в *MatLab/Simulink*. Для этих целей разработана компьютерная модель электропривода на основе Z -инвертора для определения минимально допустимого значения напряжения ЗПТ при симметричных провалах напряжения (рисунок 4.6), при которых обеспечивается неизменность режима работы газового компрессора при полной нагрузке.

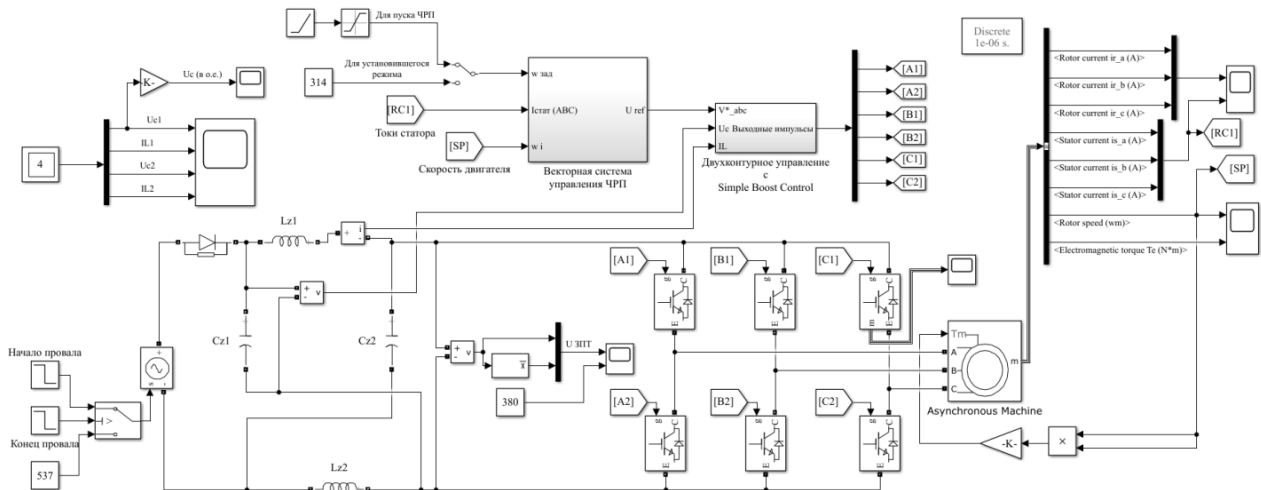


Рисунок 4.6 – Компьютерная модель привода

Модель рисунка 4.6 содержит следующие блоки:

– асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Рассмотрен

электродвигатель газового компрессора марки 4A315S4, параметры которого представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 – Параметры моделируемого асинхронного двигателя

Номинальная выходная мощность двигателя ($P_{\text{ном}}$), кВт	160
Линейное действующее значение напряжения ($U_{\text{ном}}$), В	380
Число пар полюсов (z_p)	2
Индуктивность рассеяния статора (L_s), мГн	0,152
Приведенная индуктивность рассеяния ротора (L_r), мГн	0,152
Активное сопротивление статора, (R_s), мОм	13,79
Приведенное активное сопротивление ротора (R_r), мОм	7,728
Взаимная индуктивность статора и ротора (L_m), мГн	7,69
Момент инерции двигателя (J), кг \times м ²	10

– Преобразователь частоты собран по трехфазной мостовой схеме на основе стандартных блоков *Universal Bridge*, представляющих собой *IGBT*-модули инвертора.

– Управляемый источник постоянного напряжения, позволяющий имитировать случаи возникновения провалов напряжения.

До возникновения провала напряжения источник вырабатывает постоянное напряжение на уровне 537В. Момент возникновения провала и его глубина определяются временем срабатывания блока «Начало провала», в то время как время окончания и длительность – срабатыванием блока «Конец провала».

– Блок «Векторная система управления ЧРП», осуществляющий управление асинхронным двигателем и выработку управляющего сигнала для системы управления ключами инвертора;

– датчик интенсивности, обеспечивающий плавный пуск двигателя до заданной скорости вращения ротора;

– Блок «Двухконтурное управление с *Simple Boost Control*», осуществляющий

управление Z-преобразователем в соответствии с разработанным способом управления, являющийся особенностью и основным отличием разработанной модели от других существующих моделей.

В качестве звена постоянного тока используются соединенные крест-накрест индуктивности и конденсаторы, образующие Z-инвертор, что является отличительной особенностью разработанной модели.

В качестве расчетных параметров Z-инвертора приняты определенные по представленному в третьей главе методу параметры: $C_1 = C_2 = 100 \text{ мкФ}$, $L_1 = L_2 = 250 \text{ мкГн}$. Частота коммутации силовых ключей принята равной $f = 10 \text{ кГц}$.

Для контроля переходных процессов в Z-элементах и получения сигнала напряжения ЗПТ использованы датчики тока и напряжения, а также цифровые осциллографы.

Электродвигатель имеет нагрузку вентиляторного типа, механическая характеристика которой определяется как:

$$M_C = \frac{P_{\text{ном}}}{\omega_{\text{ном}}^3} \omega^2, \quad (4.3)$$

где $P_{\text{ном}}$ – номинальная мощность электродвигателя, кВт, $\omega_{\text{ном}}$ – номинальная частота вращения двигателя, рад/с; ω – текущая частота вращения вала электродвигателя, рад/с.

4.3.1 Блок системы управления двигателем

Для обеспечения непрерывной подачи топлива к электротехническому комплексу необходимо поддерживать постоянную скорость вращения двигателя, обеспечить отсутствие колебаний и отклонений электромагнитного момента от номинального значения и, в случае необходимости изменения режима работы газового компрессора, быстрый отклик электродвигателя на изменение нагрузки.

Исходя из данных требований, управление асинхронным двигателем газового компрессора осуществляется в соответствии с принципом векторного управления,

что обеспечивает одновременное управление моментом и скоростью с высокой точностью. Главная идея векторного управления заключается в управлении величиной и углом пространственного вектора.

Внешний вид блока управления представлен на рисунке 4.7.

Система управления электропривода реализована как многоконтурная система регулирования и включает в себя следующие контуры:

- Контур регулирования d -составляющей тока статора с ПИ-регулятором.
- Контур регулирования q -составляющей тока статора с ПИ-регулятором.
- Контур регулирования потокосцепления ротора с ПИ-регулятором.
- Контур регулирования скорости двигателя с ПИ-регулятором.

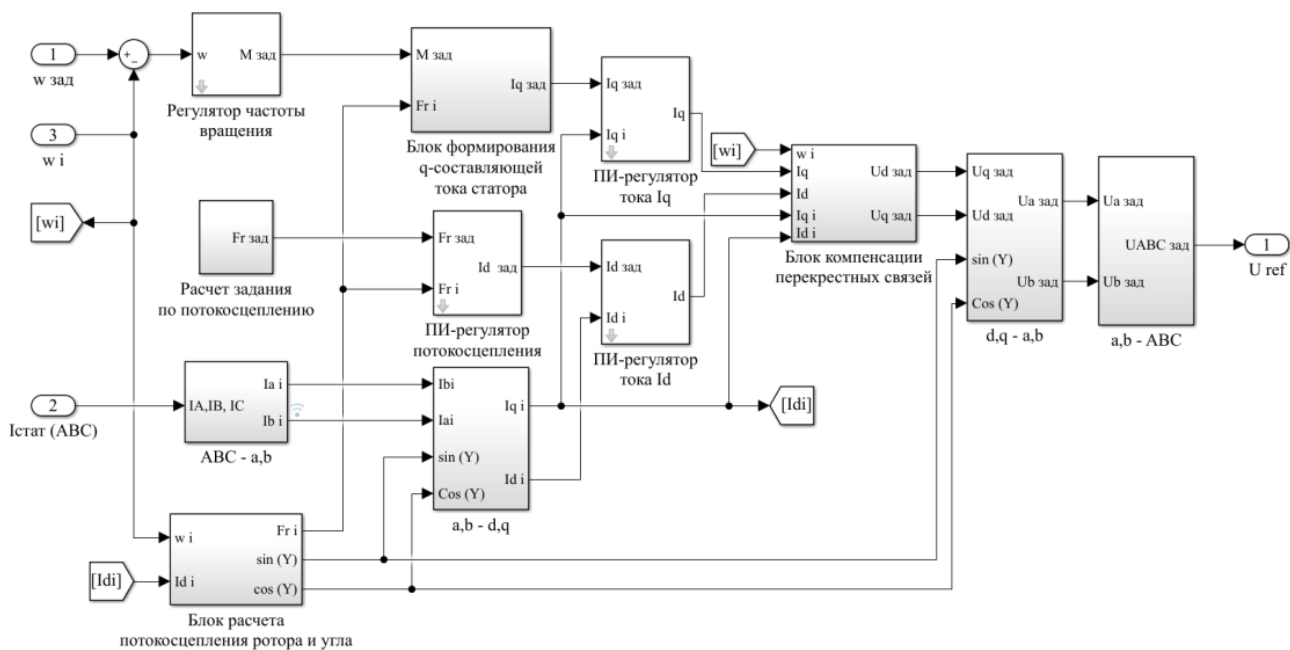


Рисунок 4.7 – Блок векторного управления двигателем

Регулирование скорости вращения электродвигателя в широком диапазоне достигается за счет использования обратных связей по току и скорости вращения. Формирование сигнала от датчика скорости производится блоком измерения параметров электродвигателя. Токосигналы поступают от датчиков тока.

Представленная система управления работает следующим образом: задание по частоте вращения $\omega_{зад} = 156 \frac{рад}{с}$ от задатчика интенсивности разгона

сравнивается с измеренным значением текущей частоты вращения ротора ω_r . Разность сигналов подается на вход ПИ-регулятора скорости, который формирует задающее воздействие по электромагнитному моменту двигателя $M_{зад}$. Значение $I_{q \text{ зад}}$ вычисляется в блоке формирования q -составляющей тока статора с учетом текущего значения потокосцепления ротора Ψ_i :

$$i_{q \text{ зад}} = \frac{3}{2} \frac{1}{z_p} \frac{M_{зад}}{\Psi_i} \left(1 + \frac{L_r}{L_m} \right). \quad (4.4)$$

Величина потокосцепления определяется исходя из значения d -составляющей тока статора в блоке расчета потокосцепления ротора и угла, входными сигналами которого являются сигнал текущей частоты вращения и текущее значение проекции тока статора I_{di} :

$$\Psi_i = i_{di} L_m. \quad (4.5)$$

Для получения d -составляющей необходимо знать значение угла положения вектора потокосцепления ротора, который определяется по текущей частоте тока статора:

$$\theta_r = \int \omega_r dt. \quad (4.6)$$

Проекция тока статора определяются в блоке $ABC-\alpha\beta$, на вход которого подаются сигналы с датчиков тока $I_{стат}(ABC)$. В блоке осуществляется преобразование в двухфазную неподвижную систему координат $\alpha\beta$ по формулам:

$$\begin{aligned} I_\alpha &= \frac{2}{3} I_A - \left(\frac{1}{3} I_B - \frac{1}{3} I_C \right) \\ I_\beta &= \frac{1}{\sqrt{3}} I_B - \frac{1}{\sqrt{3}} I_C \end{aligned}. \quad (4.7)$$

Полученный выходной сигнал поступает на вход блока $\alpha\beta-dq$, осуществляющего преобразование сигналов тока в двухфазную вращающуюся систему координат dq , связанную с ротором.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

где φ – угол вектора потокосцепления ротора.

Задача системы управления двигателем заключается в поддержании постоянного значения потокосцепления ротора. Задание по потокосцеплению формирует задание для d -составляющей тока статора (4.5) на основании критерия минимума тока статора при работе двигателя в номинальном режиме:

$$\Psi_{i \text{ зад}} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{M(L_r + L_m)}{z_p}. \quad (4.9)$$

Данный сигнал задания рассчитывается в блоке «Расчет задания по потокосцеплению». Далее он сравнивается с текущим значением потокосцепления, и результат сравнения поступает на пропорционально интегральный регулятор потока. Регулятор потока формирует на выходе сигнал задания по d -составляющей тока статора.

Контуры токов I_d и I_q реализованы по одной схеме и настроены одинаковым образом. Разность между измеренными и формируемыми сигналами тока подается на ПИ-регуляторы осей d, q . Составляющая по оси q определяет текущий момент двигателя. Составляющая тока по оси d регулируется так, чтобы обеспечить необходимое значение потокосцепления при работе двигателя в номинальном режиме. Расчетные параметры регуляторов представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры регуляторов системы управления

Коэффициенты регуляторов	Значение
Пропорциональный коэффициент регулятора скорости	$6 \cdot 10^3$
Интегральный коэффициент регулятора скорости	40
Пропорциональный коэффициент регулятора тока	13,2
Интегральный коэффициент регулятора тока	0,08

На основе результатов сравнения формируется задание по фазному

напряжению статора в dq -системе координат. Для компенсации влияния контуров регулирования друг на друга полученные сигналы поступают на вход блока компенсации перекрёстных связей. После этого итоговые сигналы преобразуются в систему фазных напряжений:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

Сформированный сигнал опорного напряжения поступает на вход блока управления Z -преобразователем для формирования импульсов управления полупроводниковыми силовыми ключами.

4.4 Способ управления Z -инвертором

Способ управления Z -инвертором в составе электропривода газового компрессора для обеспечения устойчивой работы привода при полной загрузке в условиях симметричных провалов напряжения включает следующие шаги:

1. Определение исходных данных системы и привода.
2. Определение параметров Z -инвертора согласно разработанному алгоритму по формуле (3.34).
3. Определение передаточных функций по формулам (3.18)-(3.21) согласно методу малых сигналов, преобразованию Лапласа и принципу суперпозиции.
4. Выбор и определение способа внедрения импульсов состояния КЗ.
5. Построение структурной схемы двухконтурного управления Z -инвертором с указанием связей в системе.
6. Осуществление синтеза регуляторов с учетом полученной аналитической зависимости (3.42).

7. Построение системы управления на основе выявленных математических соотношений (3.14) и (3.42).

Управление Z -инвертором осуществляется с помощью модифицированной ШИМ-модуляции, в цикл коммутации которой добавляются импульсы состояний КЗ согласно выбранному способу их внедрения. Способ управления заключается в выработке значения скважности состояния КЗ согласно полученной аналитической зависимости (3.42).

Для предотвращения влияния состояний КЗ на активные состояния инвертора и появления нежелательных режимов работы Z -инвертора предусмотрено ограничение коэффициента состояния КЗ на уровне 0,45. Это значение является граничным значением, при котором обеспечиваются повышающие свойства Z -преобразователя [66].

Представленный способ обеспечивает компенсацию симметричных провалов напряжения за счет выработки значения скважности состояния КЗ Z -инвертора, определяемого по аналитическим зависимостям, представленным в третьей главе, что позволяет передать накопленную в Z -элементах энергию в нагрузку и повысить выходное напряжение преобразователя.

Это обеспечивает бесперебойную работу электротехнического комплекса в условиях возникновения провалов напряжения.

4.4.1 Система управления Z -инвертором

Особенностью разработанной системы управления и основным ее отличием от существующих моделей является блок управления Z -преобразователем, структура которого представлена на рисунке 4.8.

Рассматриваемый блок является программной реализацией полученных в третьей главе математических соотношений (3.14) и (3.42). Он осуществляет формирование импульсов управления полупроводниковыми ключами. Входными сигналами блока являются сигнал опорного напряжения, формируемый системой

управления двигателем, напряжение конденсатора и ток индуктивности Z-элементов.

В нижней части блока реализован алгоритм синусоидальной ШИМ с несущей частотой 10кГц. Верхняя часть блока представляет собой систему формирования импульсов состояния КЗ для Z-инвертора, представленной в виде двухконтурной системы [41].

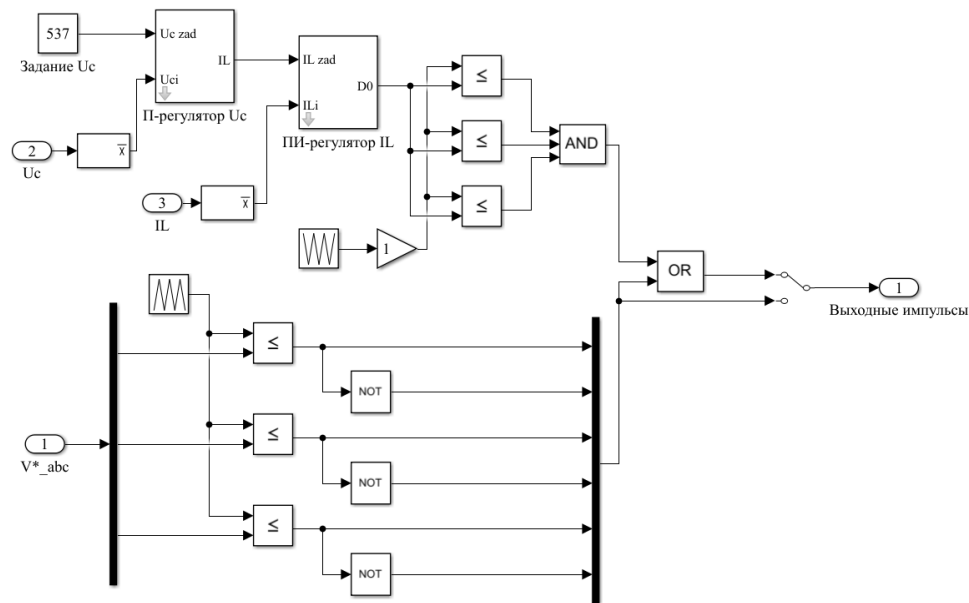


Рисунок 4.8 – Блок управления Z-преобразователем

Разность сравнения измеренного и заданного значений сигнала напряжения конденсатора Z-инвертора подается на вход регулятора напряжения. В номинальном режиме работы двигателя, при отсутствии провала напряжения, выходной сигнал регулятора равен нулю. При этом Z-инвертор регулируется как обычный ШИМ-инвертор напряжения без добавления состояний КЗ.

В случае провала напряжения регулятор напряжения конденсатора вырабатывает необходимое воздействие для компенсации ошибки, которое является задающим воздействием для внутреннего токового регулятора. Разность данного сигнала и сигнала текущего значения тока индуктивности подается на вход регулятора тока индуктивности, которые вырабатывает необходимое значение D_0 (рисунок 4.9). Установившееся значение коэффициента D_0 в установившемся

режиме соответствует расчетному значению, определяемому по формуле (3.14).



Рисунок 4.9 – Образование импульсов состояния КЗ

Данное значение сравнивается с опорным пилообразным сигналом частотой 10кГц. Импульсы состояния КЗ образуются в моменты времени, когда значение пилообразного сигнала меньше либо равно значению коэффициента состояния КЗ. Образованные импульсы добавляются к импульсам ШИМ посредством логических элементов.

4.4.2 Синтез регуляторов Z-инвертора

Структурная схема управления Z-инвертором представлена на рисунке 4.10 [103]. Со звездочкой указаны управляющие сигналы в системе.

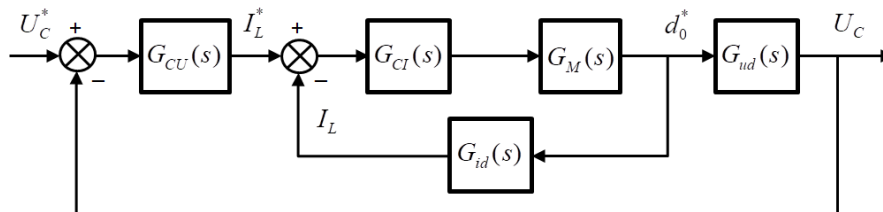


Рисунок 4.10 – Структурная схема управления Z-преобразователем

На рисунке 4.10 использованы обозначения: $G_{CU}(s)$ – передаточная функция внешнего регулятора напряжения конденсатора, $G_{CI}(s)$ – передаточная функция внутреннего регулятора тока индуктивности, $G_{ud}(s)$ и $G_{id}(s)$ – полученные передаточные функции Z-инвертора и $G_M(s)$ – модифицированная передаточная функция образования импульсов пробивного состояния.

$$G_M(s) = \frac{2}{U_{tri}}, \quad (4.11)$$

где U_{tri} – амплитуда треугольного сигнала, B .

Расчет параметров регуляторов осуществлялся с использованием полученных передаточных функций Z -преобразователя (3.18-3.21) и учетом установленного аналитического выражения (3.42). Задание номинального значения тока индуктивности определяется передаточной функцией (3.21).

Определим следующие передаточные функции в общем виде:

$$\text{Передаточная функция объекта управления: } W_{OY}(s) = \frac{A(s)}{B(s)}.$$

$$\text{Передаточная функция регулятора: } W_{PEГ}(s) = \frac{M(s)}{N(s)}.$$

Тогда желаемая передаточная функция замкнутой системы будет иметь вид:

$$W'_{\text{жел}}(s) = \frac{W_{OY}(s)W_{PEГ}(s)}{1 + W_{OY}(s)W_{PEГ}(s)} = \frac{A(s) \cdot M(s)}{B(s) \cdot N(s) + A(s) \cdot M(s)} = \frac{G(s)}{D(s)}. \quad (4.12)$$

Основное назначение регуляторов заключается в компенсации своими нулями нежелательных полюсов передаточной функции объекта [23]. Таким образом, задача синтеза регуляторов сводится к определению неизвестных параметров полиномов $M(s)$ и $N(s)$ для выбранного полинома $D(s)$ при известных полиномах $A(s)$ и $B(s)$.

Эти полиномы определяются из системы уравнений, получающихся приравниванием коэффициентов при одинаковых степенях обеих частей уравнения:

$$B(s) \cdot N(s) + A(s) \cdot M(s) = D(s). \quad (4.13)$$

Для того чтобы системы имела решение число уравнений n_d не должно превышать числа неизвестных:

$$n_d \leq n_p + m_p + 1, \quad (4.14)$$

n_p, m_p – число корней регулятора.

С другой стороны, порядок системы должен быть равен сумме порядков его частей – объекта и регулятора:

$$n_d + 1 = n_0 + n_p. \quad (4.15)$$

Тогда если принять порядок числителя регулятора равным порядку его знаменателя, то можно определить порядки регулятора и желаемого полинома:

$$n_d = n_p + m_p + 1 = 2n_p + 1 = n_0 + n_p \Rightarrow n_p = n_0 - 1. \quad (4.16)$$

Порядок рассматриваемой системе равен 3, следовательно, регулятор может иметь 2 порядок. Тогда, исходя из вида полученных передаточных функций, запишем:

$$(B_3 s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0) \cdot (n_2 s^2 + n_1 s + n_0) + (A_2 s^2 + A_1 s + A_0) \cdot (m_2 s^2 + m_1 s + m_0) = D(s). \quad (4.17)$$

Настройка регуляторов осуществлена по критерию модульного оптимума, который обеспечивает приближение настраиваемой системы по частотным свойствам к идеальному фильтру низкой частоты. Подобная настройка обеспечивает малое перерегулирование и быстрое протекание переходного процесса [23].

В качестве желаемой передаточной функции принята передаточная функция фильтра Баттерворта 5 порядка с измененной частотой среза [23]. Тогда, решая уравнение (4.17) при известных параметрах полиномов, получим:

$$n_2 = \frac{D_5}{B_3}. \quad (4.18)$$

Для остальных неизвестных составляем систему уравнений по методу неопределенных коэффициентов:

$$\begin{cases} B_3 n_1 + A_2 m_2 = D_4 - B_2 n_2 \\ B_2 n_1 + B_3 n_0 + A_1 m_2 + A_2 m_1 = D_3 - B_1 n_2 \\ B_1 n_1 + B_2 n_0 + A_0 m_2 + A_1 m_1 + A_2 m_0 = D_2 - B_0 n_2 \\ B_0 n_1 + B_1 n_0 + A_0 m_1 + A_1 m_0 = D_1 \\ B_0 n_0 + A_0 m_0 = D_0 \end{cases} \quad (4.19)$$

Общий вид передаточной функции для регуляторов тока индуктивности и напряжения конденсатора имеет вид:

$$G_{PEГ}(s) = \frac{m_2 s^2 + m_1 s + m_0}{n_2 s^2 + n_1 s + n_0}. \quad (4.20)$$

Рассчитанные коэффициенты регуляторов представлены в таблицах 4.3 и 4.4.

Таблица 4.3 – Коэффициенты регуляторов тока индуктивности Z-инвертора

Параметр	Значение	Параметр	Значение
m_2	$2 \cdot 10^6$	n_2	$3,75 \cdot 10^8$
m_1	737,5	n_1	$7,4 \cdot 10^3$
m_0	60,8	n_0	203

Таблица 4.4 – Коэффициенты регуляторов напряжения конденсатора Z-инвертора

Параметр	Значение	Параметр	Значение
m_2	$3,1 \cdot 10^8$	n_2	$3,75 \cdot 10^{11}$
m_1	$1,4 \cdot 10^3$	n_1	$4,9 \cdot 10^7$
m_0	470	n_0	$1,6 \cdot 10^3$

4.5 Исследование динамических процессов электропривода с разработанным способом управления Z-инвертором при симметричных провалах напряжения

Результаты имитационного моделирования работы электропривода с разработанным способом управления Z-инвертором представлены временными зависимостями напряжения конденсатора, тока индуктивности, электромагнитного момента и скорости исследуемого двигателя. Для оценки влияния регулирования длительности состояния КЗ представлены кривые изменения напряжения конденсатора при симметричных провалах различной глубины [104].

На рисунке 4.11 представлены зависимости изменения напряжения конденсатора от изменения параметров Z-инвертора в начальный период возникновения симметричного провала напряжения.

Кривые 1-4 на рисунке 4.11 получены для следующих значений параметров Z-инвертора: 1 – $C = 100 \text{ мкФ}$, $L = 250 \text{ мкГн}$, 2 – $C = 100 \text{ мкФ}$, $L = 50 \text{ мкГн}$, 3 –

$C = 25\text{мкФ}$, $L = 250\text{мкГн}$, 4 – $C = 500\text{мкФ}$, $L = 50\text{мкГн}$.

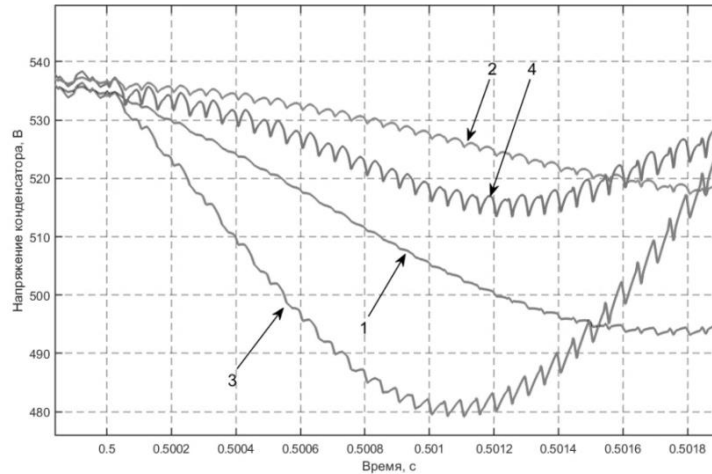


Рисунок 4.11 – Изменение напряжения конденсатора в начальный момент возникновения провала напряжения

Кривые показывают, что увеличение емкости конденсаторов ведет к значительному снижению пульсаций напряжения конденсатора в установившемся режиме и уменьшению начального спада напряжения. В то время как увеличение индуктивности катушек повышает длительность переходного процесса, слегка уменьшая пульсации, но увеличивая начальный спад напряжения.

Стоит заметить, что изменение напряжения конденсатора в начальный момент возникновения провала напряжения соответствует полученному аналитическому выражению (3.42).

Рассмотрим работу модели при 10% симметричном провале напряжения длительностью 0,1с (рисунок 4.12).

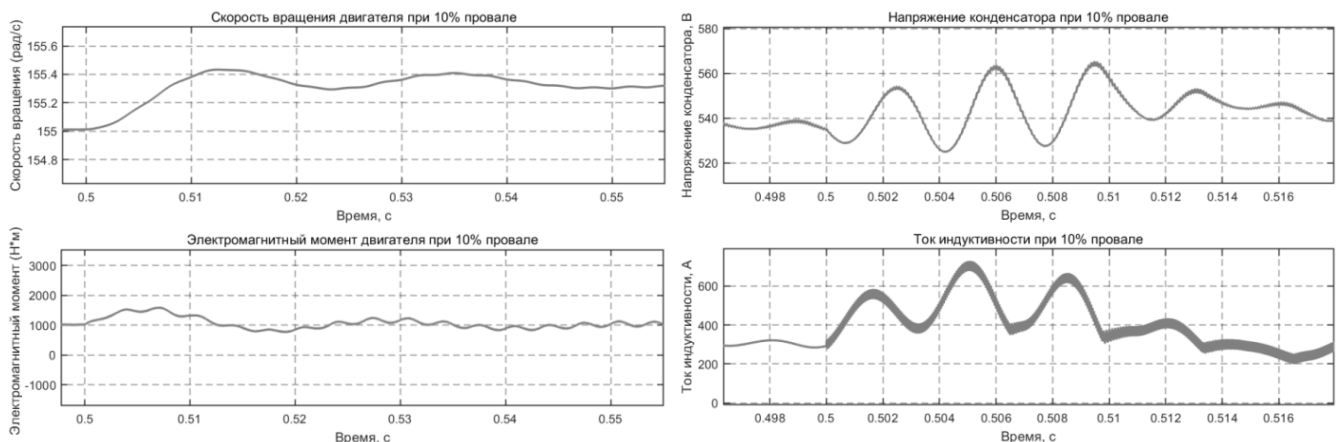


Рисунок 4.12 – Имитационные кривые при провале глубины 10%

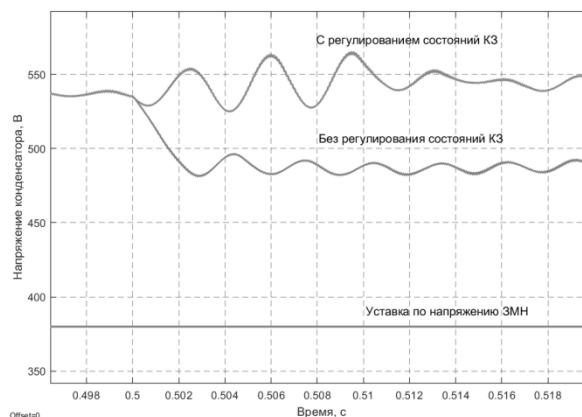


Рисунок 4.12 (продолжение) – Имитационные кривые при провале глубины 10%

Провал возникает в момент времени 0,5с. Система управления вырабатывает необходимое значение скважности состояния КЗ для обеспечения установленных значений параметров ZSI и номинальных значений электромагнитного момента и скорости вращения ЧРП.

При стандартном типе инвертора напряжение конденсатора падает до остаточного напряжения провала. Хотя ЧРП не будет отключен ЗМН, это приведет к уменьшению скорости вращения двигателя, что вызывает уменьшение объема перекачиваемого газовым компрессором ПНГ. Данный режим вызывает дополнительные материальные затраты и приводит к нарушению бесперебойной работы электротехнического комплекса.

Результаты моделирования при симметричном провале глубины 30% длительностью 0,1с. представлены на рисунке 4.13.

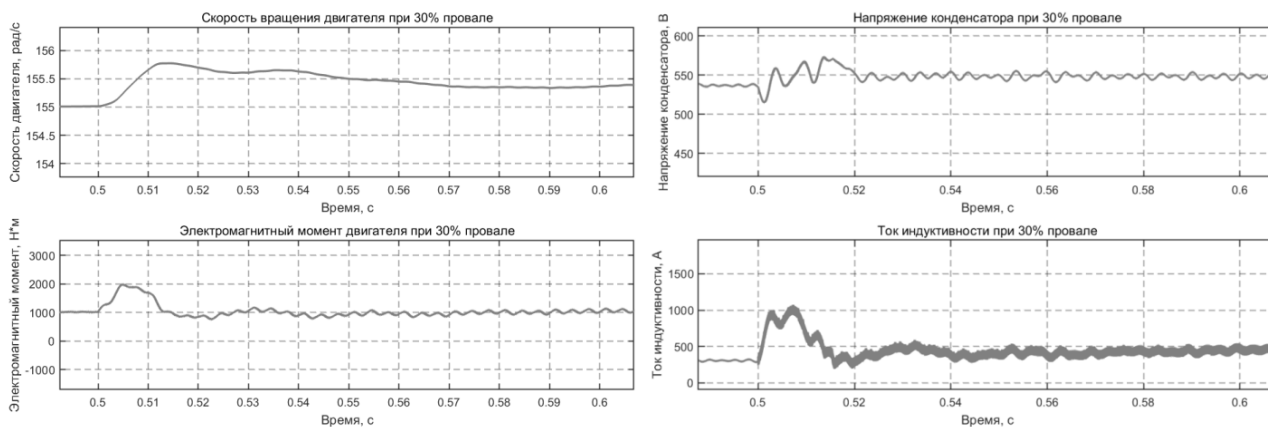


Рисунок 4.13 – Имитационные кривые при провале глубины 30%

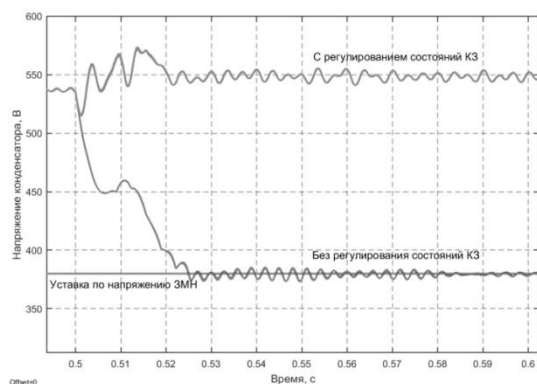


Рисунок 4.13 (продолжение) – Имитационные кривые при провале глубины 30%

При возникновении 30% симметричного провала напряжения ЧРП со стандартным инвертором напряжения будет отключен ЗМН в момент пересечения напряжения конденсатора граничного значения спустя 25мс от начала провала. В то время как Z-инвертор обеспечивает поддержание номинальных параметров двигателя.

Результаты моделирования при симметричном провале глубины 50% длительностью 0,1с. представлены на рисунке 4.14.

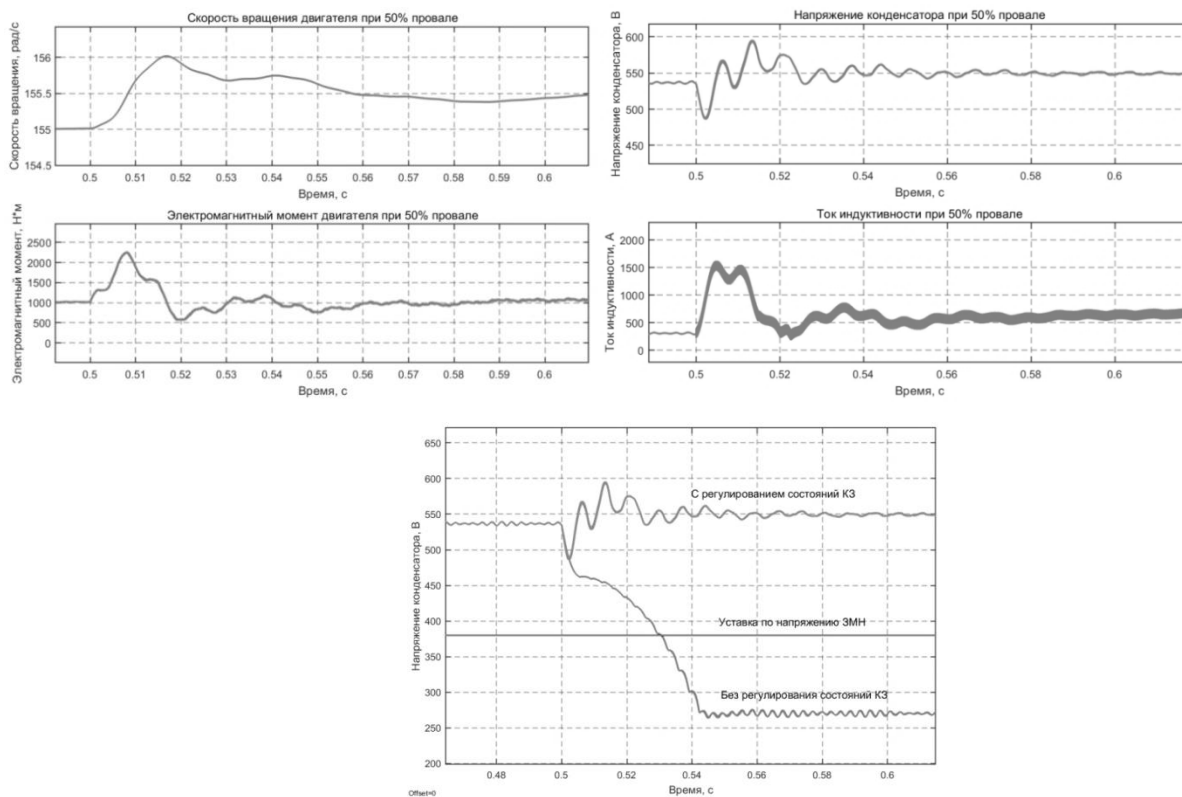


Рисунок 4.14 – Имитационные кривые при провале глубины 50%

Результаты моделирования при симметричном провале глубиной 60% длительностью 0,1с. представлены на рисунке 4.15.

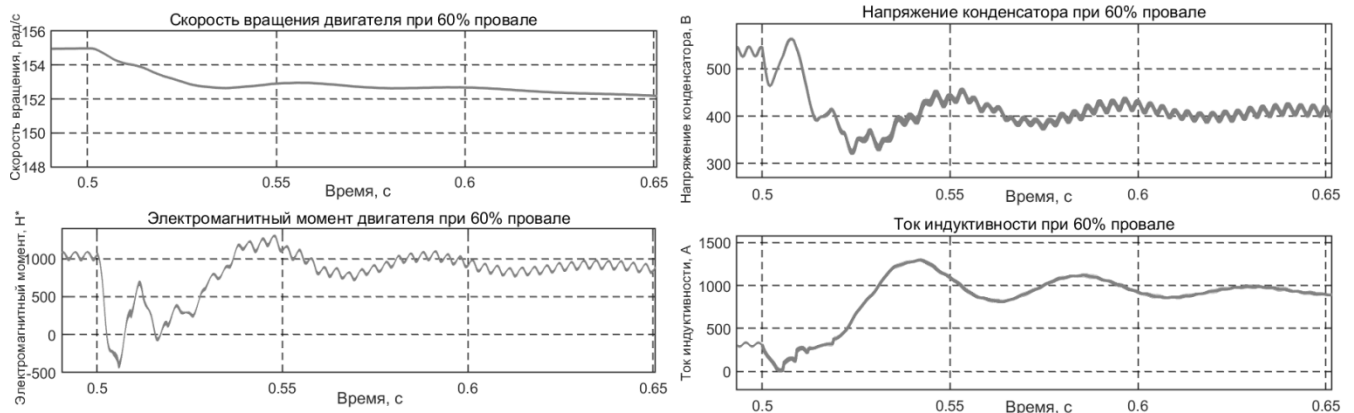


Рисунок 4.15 – Имитационные кривые при провале глубиной 60%

При возникновении симметричного провала напряжения глубиной 60% скорость вращения двигателя перестает соответствовать номинальному значению и снижается до 152 рад/с, а значение электромагнитного момента снижается до 850 Н·м. Происходит быстрый разряд конденсаторов на нагрузку вследствие недостатка энергии на входе. В состоянии КЗ индуктивность обеспечивает передачу энергии конденсатору, в результате чего растет ток катушки. Однако этой энергии оказывается недостаточно для обеспечения заряда конденсатора на номинальном уровне. Наблюдается падение напряжения конденсатора до 400В с резким увеличением тока индуктивности практически в 2 раза.

Регуляторы системы управления вырабатывают значение скважности состояния КЗ, которое оказывается недостаточным для обеспечения параметров работы двигателя близким к номинальным параметрам в режиме провала напряжения глубиной 60%. Стоит отметить, что это значение находится на границе допустимого диапазона регулирования скважности состояния КЗ, при котором еще обеспечиваются повышающие свойства Z-инвертора и не возникают нежелательные («статичные») режимы работы преобразователя [66].

Анализ имитационных кривых позволил экспериментально установить, что минимально допустимым снижением напряжения звена постоянного тока при

симметричных провалах напряжения является снижение напряжения до 50% от номинального значения.

Таким образом, управление Z-инвертором согласно разработанному способу обеспечивает повышение работоспособности электропривода газового компрессора в условиях симметричных провалов напряжения глубиной до 50% и длительностью до 100мс. Это позволяет обеспечить бесперебойную работу электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания.

Полученные имитационные результаты сведены в таблицу 4.5 для сравнения с другими способами и методами компенсации провалов.

Таблица 4.5 – Сравнение способов и методов компенсации провалов напряжений

Критерии Способ/метод	Глубина провала	Длительность провала	Стоимость внедрения	Дополнительно
<i>DSTATCOM</i> и <i>DVR</i>	До 50%	До 20мс	Высокая, сопоставимо с СУ ЭП	Необходим запас по току преобразователя
Источники бесперебойного питания	До 40%	До 10-20мс	Высокая, необходимы доп. устройства	Большие габариты и вес, дополнительная СУ
Активный выпрямитель	До 10-15%	До 50мс	Высокая	Сложная СУ
Алгоритмические методы	10-15%	До 40-50мс	Низкая	Введение блоков снижает надёжность СУ
Z-инвертор	До 50%	100мс	Средняя, затраты на L- элементы	Повышенная надёжность. Простота внедрения алгоритмов управления

Сравнительный анализ показал, что применение способа управления Z-инвертором в составе электропривода обеспечивает его большую устойчивость к

выявленным провалам напряжения по сравнению с другими представленными методами. Построенные компьютерные модели и результаты моделирования подтверждают адекватность и корректность полученных аналитических результатов исследований.

4.6 Выводы по четвертой главе

1. Разработана модель для исследования переходных процессов в Z -инверторе и получены численные значения передаточных функций. Анализ вида кривых переходных процессов подтвердил адекватность полученных аналитических выражений (3.18)-(3.21) и верифицировал разработанный алгоритм выбора параметров (3.34).

2. Разработан блок управления Z -преобразователем в составе имитационной модели электропривода газового компрессора, позволяющий определять границы допустимых диапазонов снижения напряжения ЗПТ в условиях симметричных провалов напряжения.

3. Разработан способ управления Z -инвертором на основании установленной аналитической зависимости (3.42), обеспечивающий компенсацию симметричных провалов напряжения за счет выработки значения скважности состояния КЗ Z -инвертора.

4. Установлено, что устойчивая работа электропривода газового компрессора обеспечивается при симметричных провалах напряжения длительностью до 100мс и глубиной до 50%, что является минимально допустимым значением напряжения звена постоянного тока

5. Эффективность применения разработанного способа управления Z -инвертором в составе электропривода газового компрессора доказывается результатами имитационного моделирования, адекватно отражающими выявленную аналитическую зависимость (3.42).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения актуальной научно-технической задачи по обеспечению бесперебойной работы электротехнического комплекса с турбинами комбинированного питания при провалах напряжения и смене топлива решены следующие задачи:

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».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович, Б. Н. Электроснабжение нефтегазовых предприятий: учебное пособие / Б. Н. Абрамович, Ю. А. Сычев, Д. А. Устинов ; Санкт-Петербургский государственный горный институт. – СПб, 2008. – 81с. – Текст : непосредственный.
2. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат., 1982. – 392 с. – Текст : непосредственный.
3. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник / Л. А. Бессонов. – М.: Гардарики, 2002. – 638 с. – Текст : непосредственный.
4. Браславский, И. Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, В. Н. Поляков. – М.: Академия, 2004. – 202 с. – Текст : непосредственный.
5. Бугрим, Л. И. Разработка метода анализа нелинейной системы регулирования газотурбинной энергетической установки: специальность 05.13.07 «Автоматизация технологических процессов и производств»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Бугрим Леонид Иванович. – Москва, 1984. – 27с. – Текст : непосредственный.
6. Газовые турбины. – Текст, изображения: электронные // Компания Siemens : официальный сайт. – URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines.html> (дата обращения: 05.10.19).
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в сетях общего назначения. – Москва: Изд-во стандартов, 2013. – 16с. – Текст : непосредственный.
8. ГОСТ Р 50369-92. Электроприводы. Термины и определения. – Москва: Стандартинформ, перизд., 2005. – 13 с. – Текст : непосредственный.
9. Гулянский, М. А. Методы утилизации нефтяного газа: технологические и экономические аспекты, новые решения на основе мембранных технологий [Текст] / М. А. Гулянский, А. А. Котенко, Е. Г. Крашенинников, С. В. Потехин // Сфера. Нефть и газ. – 2013. – №4, вып. 37. – С.100-107.
10. Гуревич, Ю. Е. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя / Ю. Е. Гуревич, К. В. Кабиков. – М.: ЭЛЕКС-КМ, 2005. – 408с. – Текст : непосредственный.

11. Добыча природного и попутного нефтяного газа. – Текст : электронный // Министерство Энергетики РФ: официальный сайт. – URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1215> (дата обращения: 05.10.19).
12. Ершов, С. В. Анализ средств и способов ограничения влияния провалов напряжения [Текст] / С. В. Ершов, М. С. Пигалов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. – № 1, вып.12. – С.95–104.
13. Ершов, С. В. Особенности определения провалов напряжения в системах электроснабжения [Текст] / С. В. Ершов, Б. А. Жабин // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2014. – №8. – С.97-102.
14. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях (3 изд. перераб. и доп.) / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 252с.– Текст : непосредственный.
15. Зиновьев, Г. С. Основы силовой электроники, ч.2 / Г. С. Зиновьев. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 197 с. .– Текст : непосредственный.
16. Кавалеров, Б. В. Математическое моделирование электрической системы в задачах испытания и настройки средств управления газотурбинных энергетических установок [Текст] / Б.В. Кавалеров, В.П. Казанцев // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – №1. – С.2-7.
17. Кавалеров, Б. В. Методологические и теоретические основы автоматизации испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками с учетом динамики электроэнергетической системы: специальность 05.13.06 «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами»: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук: / Кавалеров Борис Владимирович. – Пермь, 2012. – 33с. – Текст : непосредственный.
18. Киотский протокол. – Текст : электронный // Рамочная конвенция ООН об изменении климата: официальный сайт. – URL: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php (дата обращения: 05.10.19).
19. Ковчин, С. А. Теория электропривода: учебник для вузов / С. А. Ковчин, Ю. А. Сабинин. – Спб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1994. – 496 с. – Текст : непосредственный.
20. Коржубаев, А. Г. Проблемы и перспективы эффективного использования попутного нефтяного газа в России [Текст] / А. Г. Коржубаев, Д. А. Ламерт, Л. В. Эдер // Бурение и нефть. – 2012. – №04. – С. 4-7.

21. Кутепова, Е. А. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России: ежегодный обзор [Текст] / Е. А. Кутепова, А. Ю. Книжников, К. В. Кочи // WWF-России, КПМГ. – 2012. – В.4. – 35с.
22. Ладыгин, А. Н. Энергосберегающий электропривод подъемного механизма с резервным питанием [Текст] / А. Н. Ладыгин, Д. Д. Богаченко, Н. А. Ладыгин, В. В. Холин // Вестник МЭИ. – 2017. – № 6. – С. 125-132.
23. Лукас, В. А. Теория автоматического управления: учебник для вузов / В. А. Лукас. – М.: Недра, 1990. – 416 с. – Текст : непосредственный.
24. Меньшов, Б. Г. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учебник для вузов / Б. Г. Меньшов, М. С. Ершов, А. Д. Яризов. – М.: Недра, 2000. – 487с. – Текст : непосредственный.
25. Новожилов, Н. Г. Структура и алгоритмы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом при провалах напряжения в электрической сети: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Новожилов Никита Геннадьевич; Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., 2017. – 220с. – Текст : непосредственный
26. Ольховский, Г. Г. Энергетические газотурбинные установки / Г.Г. Ольховский. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с. – Текст : непосредственный.
27. Об особенностях исчисления платы за негативное воздействие на окружающую среду при выбросах в атмосферный воздух загрязняющих веществ, образующихся при сжигании на факельных установках и (или) рассеивании попутного нефтяного газа: постановление Правительства РФ от 08.11.2012 г. № 1148 (ред. от 17.12.2016 и 28.12.2017) [Текст] // Российская бизнес-газета. – 2012. – №873.
28. О промышленной безопасности опасных производственных объектов. – Текст : электронный // Федеральный закон от 21 июля 1997 г. №116 (с изменениями и дополнениями. – URL: <http://base.garant.ru/11900785/> (дата обращения: 05.10.19).
29. О ставках платы за негативное воздействие на окружающую среду и дополнительных коэффициентах. – Текст : электронный // Постановление Правительства РФ от 13 сентября 2016 г. № 913. – URL: <http://base.garant.ru/71489914/> (дата обращения: 05.10.19).
30. Отчеты в области устойчивого развития. – Текст : электронный // Компания Роснефть: официальный сайт. – URL: <https://www.rosneft.ru/Development/reports/> (дата обращения: 05.10.19).

31. Першин, П. И. Разработка математической модели многоагрегатной газотурбинной электростанции для исследования и оптимизации алгоритмов управления: специальность 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Першин Павел Иванович. – СПб, 2006. – 27с. – Текст : непосредственный
32. Разложение на симметричные составляющие. – Изображение : электронное // Проект РЗА. – 2017. – URL: <https://pro-rza.ru/symcomp/> (дата обращения: 05.10.19).
33. Розанов, Ю. К. Основы силовой электроники / Ю. К. Розанов. – М: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с. – Текст : непосредственный.
34. Рудаченко, А. В. Газотурбинные установки: учебное пособие / А. В. Рудаченко, Н. В. Чухарева, С. С. Байкин ; Томский Политехнический университет. – Томск, 2008. – 139с. – Текст : непосредственный.
35. Сабуров, А. Л. ГТЭС на Приобском месторождении – крупнейшая в России электростанция на попутном газе [Текст] / А. Е. Чубарь, В. А. Кукаренко, С. И. Захарченко // Турбины и дизели. – 2012. – май-июнь.– С. 4-9.
36. 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.
37. 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.
38. Салов, Р. А. Математическое описание динамических процессов в Z-инверторе / Я. Э. Шклярский, Р. А. Салов, А. И. Данцевич, Ю. В. Растворова. – Текст : электронный // Материалы III Всероссийской научно-практической конференции «Энергетика и энергосбережение: теория и практика». Кемерово: Изд-во КузГТУ. – 2017. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/energ/2017/energ/index.htm>. – Дата публикации: 28 декабря 2017.
39. Салов, Р. А. Повышение эффективности работы энергетических центров на попутном газе [Текст] / Я. Э. Шклярский, Р. А. Салов // Известия ТулГУ, Технические науки. – 2017. – №12, Ч.2. – С. 356-366.
40. Салов, Р. А. Режимы работы Z-инвертора / О. Б. Шонин, Р. А. Салов. – Текст : электронный // Материалы II Всероссийской (с международным участием)

молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетику». Кемерово: Изд-во КузГТУ. – 2016. – URL: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/Other/2016/energ1/energ/index.htm>. – Дата публикации: 19 декабря 2016.

41. Салов, Р. А. Сравнительный анализ систем управления асинхронным электроприводом газового компрессора на основе Z-инвертора [Текст] / Р. А. Салов, Э. В. Яковлева // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME. Санкт-Петербург. – 2018. – С.178.

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 20176175283 Российская Федерация, Программа для вычисления параметров Z инвертора с активно-индуктивной нагрузкой / Р. А. Салов, заявл. 17.05.2017, зарегистр. 06.07.2017; опубл. 06.07.2017. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

43. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский – М.: Академия, 2006. – 272 с. – Текст : непосредственный.

44. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов/ В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Изд-во Академия, 2006. – 304 с. – Текст : непосредственный.

45. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учебное пособие / А. А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с. – Текст : непосредственный.

46. Федосеев, А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: учебник для вузов (2-е изд., перераб. и доп.) / А. М. Федосеев, М. А. Федосеев. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 528 с. – Текст : непосредственный.

47. Филиппов, А. В. Попутный газ последних ступеней сепарации. Компримирование низконапорного ПНГ [Текст] / А. В. Филиппов, А. А. Крамской // Neftegaz.Ru. – 2014. – №5. – С.12-17.

48. Фишман, В. Провалы напряжения в сетях промпредприятий / В. Фишман. – Текст : электронный // Новости электротехники. – 2004. – №5, вып.29. – URL: <http://www.news.elteh.ru/arh/2004/29/06.php>. – Дата публикации: 2014.

49. Черкасский, В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры (2-е издание, перераб. и доп.) / В. М. Черкасский. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с. – Текст : непосредственный.

50. Черный, Г. Г. Газовая динамика: Учебник для университетов и вузов / Г. Г. Черный. – М.: Наука. – 1988. – 424 с. – Текст : непосредственный.
51. Шклярский, А. Я. Причины возникновения провалов напряжения и средства их компенсации / А. Я. Шклярский. – Текст : электронный // Современная техника и технологии: электронный журнал. – 2014. – №5. – URL: <http://technology.snauka.ru/2014/05/3833>. – Дата публикации: май 2014.
52. Шонин, О. Б. Определение параметров кривой устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети [Текст] / О. Б. Шонин, Н. Г. Новожилов, С. Б. Крыльцов // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2017. – №1(379). – С.120–127.
53. Шонин, О. Б. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети [Текст] / О. Б. Шонин, Н. Г. Новожилов, С. Б. Крыльцов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2016. – №11.Ч.2. – С. 507-520.
54. Экология. – Текст, изображения : электронные // Компания Сургутнефтегаз: официальный сайт. – URL: <https://www.surgutneftegas.ru/responsibility/ecology/> (дата обращения: 05.10.19).
55. Anderson, T. Test and evaluation of voltage dip immunity / T. Anderson, D. Nisson. – UK: Inst. Elteknik STRI, 2002. – 122p.
56. Asgari, H. Modelling and Simulation of Gas Turbines / H. Asgari, X. Q. R. Chen. – DOI: 10.1504/IJMIC.2013.057137 // International Journal of Modelling, Identification, and Control (IJMIC). – 2013. – V. 20, n.3. – P. 253-270.
57. Vapaiah, P. Power Quality Improvement by using DSTATCOM / P. Vapaiah // International Journal of Emerging Trends in Electrical and Electronics (IJETEE). – 2013. – V.2, n.4. – P. 1-12.
58. Bo, Y. Effect of Voltage sags on the Z-Source Adjustable-Speed Drives / Y. Bo, D. Xinping, L. Yan, L. Xia, L. Hong // Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. – 2011. – P. 3517-3522.
59. Bollen, M. H. J. Characterization of voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives / M. H. J. Bollen. – DOI: 10.1109/61.634188 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – V.12. – P. 1666-1672.
60. Bollen, M. H. J. Voltage sags in three-phase system / M. H. J. Bollen. – DOI: 10.1109/MPER.2001.948617 // IEEE Power Engineering Review. – 2001. – P. 8-15.

61. Edris, A. A. Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS) / A. A. Edris and others. – DOI: 10.1109/61.634216 // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1997. – V.12, n.4. – P.1848–1853.
62. Ellabban, O. An overview for the Z-Source Converter in motor drive applications / O. Ellabban, H. Abu-Rub. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.04.004 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2016. – V.61. – P. 537–555.
63. Ellabban, O. Capacitor Voltage Control Techniques of the Z-source Inverter: A Comparative Study / J. V. Mierlo, O. Ellabban. – DOI: 10.1080/09398368.2011.11463806 // EPE Journal. – 2011. – V. 21. – P.13-24.
64. Ellabban, O. Direct Torque Controlled Space Vector Modulated Induction Motor Fed by a Z-source Inverter for Electric Vehicles / O. Ellabban, J. V. Mierlo, P. Lataire. – DOI: 10.1109/PowerEng.2011.6036568 // International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. – Spain, 2011.
65. Ellabban, O. Experimental Study of the Shoot-Through Boost Control Methods for the Z-Source Inverter / O. Ellabban, J. V. Mierlo, P. Lataire. – DOI: 10.1080/09398368.2011.11463792 // European Power Electronics Journal (EPE J). – 2011. – V.21, n.2. – P. 18-29.
66. Ellabban, O. Impedance source power electronic converters / Y. Liu, H. Abu-Rub, B. Ge, F. Blaabjerg, O. Ellabban, P. C. Loh. – UK: John Wiley & Sons, 2016. – 404p.
67. Ellabban, O. Indirect field oriented control of an induction motor fed by a bidirectional quasi Z-source inverter / O. Ellabban, H. Abu-Rub. – DOI: 10.1109/IECON.2012.6389538 // IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. – 2012. – P.5297-5302.
68. Erickson, R.W. Fundamentals of Power Electronics – 2nd ed. / R. W. Erickson, D. Maksimovic. – NY: Kluwer academic publishers, 2001. – 883p.
69. Flisar, U. Voltage sag independent operation of induction motor based on Z-source inverter / U. Flisar, D. Voncina, P. Zajec. – DOI: 10.1109/CPE.2011.5942217 // COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering. – 2012. – V.31, n. 6. – P. 1931-1944.
70. Guo, F. Development of an 85 kW bidirectional quasi-Z-source inverter with DC-link feed-forward compensation for electric vehicle applications / F. Guo, L. Fu, C. Lin, C. Li, W. Choi, J. Wang. – DOI: 10.1109/TPEL.2012.2237523 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – V.28, n.12. – P.5477–5488.

71. Holtz, J. Controlled AC Drives with Ride-Through Capability at Power Interruption / J. Holtz, W. Lotzkat. – DOI: 10.1109/28.315239 // IEEE Transactions on Industry Applications. – 1994. – V.30, n.5. – P.1275-1283.
72. Holtz, J. Sensorless Control of Induction Motor Drives / J. Holtz. – DOI: 10.1109/JPROC.2002.800726 // Proceedings of the IEEE. – 2002. – V.90, n.8. – P. 1359–1394.
73. Joseph, J. C. A Novel Space Vector PWM of Z-Source Inverter with Minimum Inductor Current Ripple / J. C. Joseph, S. V. Menon, K. P. Sreedevi. – DOI: 10.1109/TIE.2013.2240632 // Asian Journal of Engineering and Technology. – 2015. – V.3,n.4. – P. 204-213.
74. Kasari, P. R. Analysis of D-STATCOM for Power Quality Enhancement in Distribution Network / P. R. Kasari, M. Paul, B. Das, A. Chakraborti. – DOI: 10.1109/TENCON.2017.8228081 // Proceedings of the 2017 IEEE Region 10 Conference (TENCON). – Malaysia, 2017. – P. 1421-1426.
75. Kennedy, B. W. Power quality primer/ B. W. Kennedy. – USA: McGraw-Hill, 2000. – 385p.
76. Kim, S. K. Gas turbine dynamic simulation using SIMULINK / S. K. Kim, P. Pilidis, J. Yin. – DOI: 10.4271/2000-01-3647 // SAE Technical Paper: 2000-01-3647, 2000 – P.231-237.
77. Lee, K. Design-oriented Analysis of dc bus dynamics in adjustable speed drives under input voltage unbalance and sag conditions / K. Lee, G. Venkataramanan, T. M. Jahns. – DOI: 10.1109/PESC.2004.1355678 // Proceedings of the 37th Power Electronics Specialists Conference. – 2004. – P. 1675-1680.
78. Loh, P. C. Pulse-Width Modulation of Z-Source Inverters / D. M. Vilathgamuwa, Y. S. Lai, G. T. Chua, Y. Li, P. C. Loh. – DOI: 10.1109/ECCE.2010.5618196 // IEEE Transactions Power Electronics. – 2005. – V.20. – P.148-155.
79. Manana, M. The role of the dc-bus in voltage sags experienced by three-phase adjustable-speed drives / M. Manana, L. M. Muniz, A. Ortiz, R. Aranda, A. Arroyo, F. Delgado. – DOI: 10.24084/repqj08.575 // International Conference on Renewable Energies and Power Quality. – Spain: Granada, 2010. – V.1, n.8. – P. 1047-1050.
80. Maxwell, G. Dynamic Simulation of Compressed Air Systems / G. Maxwell, P. Rivera // ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry: Conference Proceedings. – 2003. – V.3. – P.147–156.

81. Meherwan, P. Boyce Gas Turbine Engineering Handbook 4th Edition / P. Boyce Meherwan. – UK: Butterworth-Heinemann, Elsevier, XXXIV, 2012. – 956p.
82. Mohan, N. Power electronics: Converter, Applications and Design / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. – USA: John Wiley & Sons, 2003. – 792p.
83. Patrascioiu, C. Control Valves – Modeling and Simulation / C. Patrascioiu, C. Panaitescu, N. Paraschiv // Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on dynamical systems and control. – 2009. – P.63-68.
84. Peng, F. Z. A Direct DC-Link Boost Voltage PID-Like Fuzzy Control Strategy in Z-Source Inverter / X. Ding, Z. Qian, S. Yang, B. Cui, F. Z. Peng. – DOI: 10.1109/PESC.2008.4591963 // The IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC). – 2008. – P. 405-411.
85. Peng, F. Z. A Direct Peak DC-link Boost Voltage Control Strategy in Z-Source Inverter / X. Ding, Z. Qian, S. Yang, B. Cui, F. Z. Peng. – DOI: 10.1109/APEX.2007.357583// The 22nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC). – 2007. – P. 648-653.
86. Peng, F. Z. A high-performance Z-source inverter operating with small inductor at wide-range load / X. Ding, Z. Qian, S. Yang, B. Cui, F. Z. Peng. – DOI: 10.1109/APEX.2007.357578 // Proceedings of Twenty Second Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC). – 2007. – P. 615–620.
87. Peng, F. Z. A PID Control Strategy for DC-link Boost Voltage in Z-source Inverter / X. Ding, Z. Qian, S. Yang, B. Cui, F. Z. Peng. – DOI: 10.1109/APEX.2007.357659 // The 22nd Annual IEEE Applied Power Electronics Conference (APEC). – 2007. – P. 1145-1148.
88. Peng, F. Z. Four quasi-Z-source inverters / J. Anderson, F. Z. Peng. – DOI: 10.1109/PESC.2008.4592360 // IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC). – 2008. – P.2743–2749.
89. Peng, F. Z. Impedance source network for electric power conversion-Part I: A topological review / Y. P. Siwakoti, F. Z. Peng, F. Blaabjerg, P. C. Loh, G. E. Town. – DOI: 10.1109/TPEL.2014.2313746 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – V.30, n.2. – P.699-716.
90. Peng, F. Z. Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part II: Review of Control and Modulation Techniques / Y. P. Siwakoti, F. Z. Peng, F. Blaabjerg, P. C. Loh, G. E. Town. – DOI: 10.1109/TPEL.2014.2329859 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2015. – V.30, n.4. – P. 1887-1906.

91. Peng, F. Z. Maximum Boost Control of the Z Source Inverter / F. Z. Peng, M. Shen, Z. Qian. – DOI: 10.1109/TPEL.2005.850927 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – V.20, n.4. – P. 833-838.
92. Peng, F. Z. Maximum Constant Boost Control of the Z-Source Inverter / J. Wang, A. Joseph, F. Z. Peng, L. M. Tolbert, D. J. Adams, M. Shen. – DOI: 10.1109/IAS.2004.1348400 // Industry Applications Conference, 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE. – 2004. – P.142-147.
93. Peng, F. Z. Unified Control Technique for Z-Source Inverter / S. Yang, X. Ding, F. Zhang, F. Z. Peng, Z. Qian. – DOI: 10.1109/PESC.2008.4592452 // IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC). – 2008. – P. 3236-3242.
94. Peng, F. Z. Z-Source Inverter / F. Z. Peng. – DOI: 10.1109/TIA.2003.808920 // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2003. – V.39, n.2. – P. 504-510.
95. Peng, F. Z. Z-source inverter for adjustable speed drives / F. Z. Peng, X. M. Yuan, X. P. Fang, Z. M. Qian. – DOI: 10.1109/LPEL.2003.820935 // IEEE Power Electronics Letters. – 2003. – V.1, n. 2. – P.33-35.
96. Peng, F. Z. Z-Source Inverter for Motor Drives / F. Z. Peng, A. Joseph, J. Wang, M. Shen, L. Chen, Z. Pan, E. Ortiz-Rivera, Y. Huang. – DOI: 10.1109/TPEL.2005.850938 // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2005. – V.20, n.4. – P. 857-863.
97. Pham, C.-T. A. Comparison of Control Methods for Z-Source Inverter / C.-T. Pham, A. Shen, P. Q. Dzung, N. B. Anh, N. X. Phu. – DOI: 10.4236/epe.2012.44026 // Energy and Power Engineering. – 2012. – P. 187-195.
98. Ping, L. Application of Z-source Inverter for Permanent-magnet Synchronous Motor Drive System for Electric Vehicles / L. Ping, L. He-ping. – DOI: 10.1016/j.proeng.2011.08.060 // Procedia Engineering. – 2011. – V. 15. – P. 309-314.
99. Rabkowski, J. The bidirectional Z-source inverter as an energy storage/grid interface / J. Rabkowski. – DOI: 10.1109/EURCON.2007.4400641 // Proceedings of International Conference on Computer as a Tool (EUROCON). – 2007. – P.1629–1635.
100. Ramasamy, A. K. Dynamic Voltage Restorer For Voltage Sag Compensation / A. K. Ramasamy, R. K. Iyer, Dr. V. K Ramachandaramuthy, R. N. Mukerjee. – DOI: 10.1109/PEDS.2005.1619886 // Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drives Systems. – 2005. – P. 1289-1294.
101. Rashid, M. H. Power electronics handbook: devices, circuits, and applications handbook / M. H. Rashid. – USA: Elsevier, 2011. – 1390p.

102. Rowen, W. I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines / W. I. Rowen. – DOI: 10.1115/1.3227494 // Journal of Engineering for Power Transactions of the ASME. – 1983. – V.105, n.4. – P. 865-869.

103. 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.

104. 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.

105. 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.

106. Salov, R. A. Improvement of the reliability of power plant operation on associated petroleum gas / R. A. Salov // Scientific Reports on Resource Issues, Medienzentrums der TU Bergakademie Freiberg Publ. – 2016. – V.1. – P. 283-287.

107. Schmidt, C. Modeling and Simulation of Air Compressor Energy Use / C. Schmidt, K. Kissock // Proceedings of Summer Study on Energy in Industry. – 2005. – P.131-142.

108. Spee, R. Voltage Sag Ride-Through for Adjustable-Speed Drives With Active Rectifiers / A. van Zyl, R. Spee, A. Faveluke, S. Bhowmik. – DOI: 10.1109/28.739005 // IEEE Transactions on industry applications. – 1998. – V.34, n.6. – P. 1270-1277.

109. Standard EN 50160. Voltage Characteristics in Public Distribution Systems. Voltage disturbances. – Wroclaw: Copper Development Association, 2004. –16p.

110. Stockman, K. Ride-through of adjustable speed drives during voltage dips / K. Stockman, F. D'hulster, K. Verhaege, M. Didden, R. Belmans. – DOI: 10.1016/S0378-7796(03)00071-3 // Electric Power Systems Research. – 2003. – n. 66. – P. 49-58.

111. Tajima, G. Experimental Studies on Drive Performances of Wound Field Synchronous Motor Drive Integrated with ZSI / G. Tajima T. Kosaka, N. Matsui. – DOI: 10.1109/APEC.2015.7104361 // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 2015. – P. 262-269.

112. Tavakoli, M. R. B. An educational guide to extract the parameters of heavy-duty gas turbines model in dynamic studies based on operational data / M. R. B. Tavakoli, B. Vahidi, W. Gawlik // IEEE Transactions on Power Systems. – 2009. – V. 24, n.3. – P. 1366-1374.

113. Thangaprakash, S. Implementation and Critical Investigation on Modulation Schemes of Three Phase Impedance Source Inverter / S. Thangaprakash, A. Krishnan // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. – 2010. – V.6, n.2. – P.84-92.

114. Vepa, R. Dynamic Modeling, Simulation and Control of Energy Generation / R. Vepa. – UK: Springer London Heidelberg NY Dordrecht, 2013. – 373p.

115. Zhang, G. Power electronics converters: Past, present and future / G. Zhang, Z. Li, B. Zhang, W. A. Halang. – DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.290 // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – P. 1-17

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по образовательной
деятельности ФГБОУ ВО «Санкт-
Петербургский Горный университет».
д.т.н. проф. А.П. Господариков
» 06 2019г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс



Результаты диссертационной работы Салова Р.А. «Повышение эффективности работы энергетического центра на попутном газе с использованием турбин комбинированного питания» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский Горный университет».

В частности, разработанный метод управления Z-инвертором и модель частотно-регулируемого привода на его базе предлагаются для изучения на практических занятиях при обучении студентов направления 13.03.02 – «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика» и направления 13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электроприводы и системы управления электроприводов».

В ходе практических занятий студенты осваивают особенности протекания динамических процессов и определяют передаточные функции Z-инвертора в зависимости от выбранных параметров преобразователя.

В ходе лабораторных занятий студенты указанных направлений исследуют динамические процессы частотно-регулируемого привода с векторной системой управления при возникновении кратковременных провалов напряжения для различных методов модуляции Z-инвертора. Обучающиеся изучают динамику изменения напряжений конденсаторов и токов индуктивностей Z-инвертора, а также электромагнитного момента и скорости исследуемого двигателя при провалах напряжения различной длительности и глубины в зависимости от скважности пробивного состояния Z-инвертора.

Декан электромеханического факультета
д.т.н., проф.
Заведующий кафедрой электроэнергетики и электромеханики
д.т.н., проф.

 В.В. Максаров
 В.А. Шпенст

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Справка о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы в производственную деятельность



АО «Новая ЭРА»

195248, Санкт-Петербург, ул. Партизанская 21, Телефон: +7(812)610-0240, +7(812)909-0240, Факс +7(812)303-8977, E-mail: info@newelectro.ru
ИНН 7806008174, КПП 780601001, ОГРН 1027804176047, ОКПО 23100968



СПРАВКА

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы
аспиранта 4 курса Горного университета Салова Романа Алексеевича
«Повышение эффективности работы энергетического центра на попутном газе с
использованием турбин комбинированного питания»

Настоящей справкой подтверждается, что результаты исследований Салова Р.А. актуальны, представляют практический интерес и могут быть использованы в производственной деятельности АО «Новая ЭРА».

В частности, разработанный автором метод управления Z-инвертором в составе частотно-регулируемого привода полезен для обеспечения бесперебойной работы электропривода при провалах напряжения, так как обеспечивает компенсацию симметричных провалов напряжения в сети глубиной до 50% и длительностью до 100мс.

Предлагаемые автором новые решения в области управления Z-инвертором позволят обеспечить непрерывность работы преобразователя частоты во время симметричных провалов напряжения входной сети за счет реализации регулирования дополнительной запасенной энергии в Z-элементах.

Заместитель директора конструкторского бюро –
начальник отдела преобразовательной техники


А.И. Ивановский



ПРИЛОЖЕНИЕ В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617528

ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ
Z-ИНВЕРТОРА С АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ
НАГРУЗКОЙ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Автор: *Салов Роман Алексеевич (RU)*

Заявка № 2017614476

Дата поступления 17 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июля 2017 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев