

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

На правах рукописи

ЛЕ ВАН ТУНГ



**СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ
КОНВЕЙЕРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ РАБОТЫ
НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Козярук Анатолий Евтихиевич

Санкт-Петербург – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ ВО ВЬЕТНАМЕ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ	10
1.1 Использование конвейерного транспорта на горнодобывающих предприятиях.....	10
1.2 Обзор электрических систем привода конвейерных лент на горнодобывающих предприятиях.....	14
1.3 Технология транспортировки угля на угольной шахте Маохе	17
1.4.1 Оценка систем управления электроприводом конвейера.....	18
1.4.2 Методики расчёта нагрузок электроприводов конвейерных установок.....	21
1.4.3 Технические требования и характеристики электроприводов.....	26
1.4.4 Использование преобразователей частоты на угольных шахтах Вьетнама	28
1.4.5 Технические требования к конвейерам в горнодобывающей промышленности.....	29
1.5 Выбор метода управления электроприводом конвейера	35
1.6 Выводы по Главе 1.....	37
ГЛАВА 2 ТИПОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА.....	38
2.1 Анализ структурной схемы электроприводом конвейера в настоящее время	38
2.2 Анализ двухзвенных преобразователей частоты.....	39
2.2.1 Двухзвенные преобразователи частоты с диодными выпрямителями.....	39
2.2.2 Анализ методов уменьшения гармонических искажений ПЧ.....	42
2.2.2.1 Анализ влияния электроприводов преобразователей частоты	42
2.2.2.2 Методы многоимпульсного выпрямителя преобразователей частоты	43
2.2.2.3 Анализ методов фильтрации гармоник	45
2.2.3 Двухзвенные преобразователи частоты с активными выпрямителями	51
2.3 Анализ использования преобразователей частоты многодвигательных электроприводов	52
2.3.1 Преобразователи частоты многодвигательных электроприводов с диодными выпрямителями	52
2.3.2 Преобразователи частоты многодвигательных электроприводов с активным выпрямителям	54
2.4 Системы управления асинхронными двигателями	56

2.4.1 Обзор методов управления асинхронными двигателями	56
2.4.2 Алгоритм прямого управления моментом	57
2.5 Анализ метода прямого управления моментом	61
2.5.1. Анализ метода прямого управления моментом использования вектора напряжения переключения	61
2.5.2 Прямое управление моментом с пространственной векторной модуляцией	64
2.6 Имитационное моделирование системы управления электроприводом конвейерного транспорта	67
2.6.1. Система управления электроприводом магистральный конвейерной линии	67
2.6.2. Использование преобразования частоты с 12-импульсным выпрямителем	74
2.6.3. Преобразователь частоты с активным фильтром	76
2.7 Выводы по Главе 2	77
ГЛАВА 3 СТРУКТУРА И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ	79
3.1 Обзор метода управления активным выпрямителем напряжения.....	79
3.1.1 Математическое описание активного выпрямителя	79
3.1.2. Метод управления активным выпрямителем с ориентацией	87
по вектору напряжения	87
3.2. Моделирования системы электропривода конвейера с активным выпрямителем	89
3.3 Выводы по Главе 3	97
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА МЕТОДА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ЧЕРЕЗ НЕСКОЛЬКО ТАБЛИЦ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ КЛЮЧЕЙ	98
4.1 Анализ системы управления активным выпрямителем напряжения	98
4.2 Метод прямого управления мощностью активного выпрямителя	99
4.3 Оценка метода прямого управления мощностью активного выпрямителя через несколько таблиц переключения ключей.....	107
4.4. Имитационного моделирования системы электропривода конвейера с активным выпрямителем с прямым управлением мощностью	113
4.4 Выводы по Главе 4.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	121

ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчет механической части автоматизированного электропривода конвейерной установки	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственном регистрации программы для ЭВМ.....	134
ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ о внедрении результатов работы	135
ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТ о внедрении результатов работы в учебный процесс	136

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В настоящее время во Вьетнаме увеличиваются темпы добычи угля (общий объем в 2020 году - 55 млн. тонн). Запасы угля сосредоточены в основном в провинции Куангнинь (90% угля страны). План разработки группы компаний «Вьетнамская угольная и минеральная промышленность» (ВИНАКОМИН) составляет 70 млн. тонн к 2025 году, из которых более 70% приходится на подземный способ.

Горное предприятие представляет собой сложный взаимосвязанный комплекс различных производственных механизмов, включая системы электроприводов конвейеров. Конвейеры являются важным оборудованием для непрерывной транспортировки грузов в подземных месторождениях, открытых шахтах и предприятиях по переработке угля. В подземных шахтах уголь транспортируется с места добычи через систему, состоящую из скребкового конвейера, бункера, ленточного конвейера.

В настоящее время, при увеличении глубины добычи, увеличение расстояния транспортировки приводит к увеличению эксплуатационных расходов на систему электропривода конвейера. Кроме того, система электропривода транспортировки угля работает с большим количеством устройств, параметры, которых необходимо оптимизировать. Поэтому актуальной задачей сейчас является повышение эффективности и надежности работы системы электропривода конвейера на горнодобывающих предприятиях Социалистической Республики Вьетнам.

Степень разработанности темы исследования

На протяжении многих лет ряд технических компаний во всем мире вели разработки систем электропривода для конвейеров, например: Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония), Rockwell Automation (США), Omron (Япония), ABB (Швейцария) и др. Российские ученые, такие как Гливанский А.А., Галкин, В.И., Дьячков В.К., Запенин И.В., Кубрин С.С., Спиваковский А.О., Тарасов Ю.Д., Шахмейстер Л.Т., и др. исследовали повышение эффективности электропривода конвейеров.

Несмотря на то, что было проведено множество исследований по повышению эффективности систем электропривода конвейеров, проблемы, связанные с энергосбережением и электромагнитной совместимостью системы многодвигательного

частотно-регулируемого электропривода с активным выпрямителем являются актуальными.

Цель работы

Повышение энергетической эффективности электропривода конвейера с минимизацией его влияния на качество электрической энергии карьерной сети за счёт использования активных выпрямителей с системой прямого управления мощностью в многоинверторных преобразователях частоты.

Идея работы

Использование многоинверторных преобразователей частоты с общим активным выпрямителем и системой прямого управления мощностью для регулирования коэффициента мощности многодвигательного электропривода, потребления тока по форме близкого к синусоидальной и минимальным влиянием на форму напряжения сети.

Основные задачи исследования:

1. Анализ и оценка систем ЭП конвейерного транспорта на горнодобывающих предприятиях Вьетнама и мирового опыта.
2. Разработка многоинверторной топологии силовой части многодвигательного электропривода конвейера.
3. Оценка влияния систем частотно-регулируемых электроприводов на показатели энергоэффективности.
4. Разработка алгоритмов прямого управления мощностью активного выпрямителя ПЧ с возможностью регулирования входного коэффициента мощности.
5. Выполнение компьютерного имитационного моделирования многодвигательного электропривода с активным выпрямителем в преобразователе частоты и системы прямого управления мощностью.
6. Анализ полученных теоретических и модельных результатов исследований с разработкой рекомендаций по их внедрению на шахтах Вьетнама.

Научная новизна работы

Разработка многоинверторных ПЧ с общим активным выпрямителем и системы прямого управления мощностью, обеспечивающих индивидуальное управление приводными машинами и сетевыми переменными электроприводами с поддержанием

коэффициента мощности, близкого к единице и близкой к синусоидальной форме входного тока и напряжения.

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы могут быть использованы при проектировании и модернизации систем электропривода конвейерного транспорта в угольной шахте Маохе, а также на других горнодобывающих предприятиях Социалистической Республики Вьетнам.

Результаты диссертации могут быть использованы в учебном процессе в университетах Социалистической Республики Вьетнам. Имеются справки об использовании в куангниньском промышленном университете.

Методология и методы исследований

Теоретические исследования осуществлялись с применением основ теории электропривода, теории автоматического управления и методов компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием методов имитационного моделирования в среде Matlab и Simulink.

Соответствие паспорту специальности

Работа соответствует 2 и 3 пунктам паспорта научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы – п. 2 – Обоснование совокупности технических, технологических, экологических, экономических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем и п. 3 – Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Использование общего активного выпрямителя в структуре многоинверторного преобразователя частоты электропривода конвейерных установок обеспечивает возможность индивидуального управления приводами электродвигателя с повышенным качеством по сравнению с многопульсным выпрямителем и активным фильтром.

2. Система прямого управления мощностью активного выпрямителя преобразователя частоты с разработанными алгоритмами управления обеспечивает улучшение показателей энергоэффективности электропривода конвейерных установок по сравнению с алгоритмом векторного управления.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные положения обсуждались на заседаниях кафедры электроэнергетики и электромеханики ФГБОУ «Санкт-Петербургский горный университет», докладывались на конференциях:

1. Международная научно-техническая конференция «Автоматизация» (RusAutoCon–2018), Сочи, Россия, 2018.

2. XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», Санкт –Петербург, Россия, 2020.

3. VII Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME –2020». Санкт-Петербург, Россия, 2020.

4. Международная конференция по автоматизированному электроприводу (АЭП – 2020), Санкт-Петербург, Россия, 2020.

5. III Международная конференция по инженерным исследованиям и приложениям (ICERA – 2020), Thai Nguyen, Viet Nam, 2020.

Личный вклад автора

Участие во всех этапах исследования, прямой сбор исходных данных и анализ систем ЭП конвейеров на горнодобывающих предприятиях в Российской Федерации и Вьетнаме.

Создание имитационных моделей систем электропривода конвейеров, помогающих оценить энергоэффективность, электромагнитную совместимость.

Рекомендации по модернизации электропривода конвейера приняты к использованию в ВИНАКОМИН в Социалистической Республике Вьетнам.

Публикации

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 3 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, четырех приложений, изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 100 рисунков, 30 таблиц, список литературы из 115 наименований.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ ВО ВЬЕТНАМЕ НА УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

1.1 Использование конвейерного транспорта на горнодобывающих предприятиях

В Социалистической Республике Вьетнам группа компаний «Вьетнамская угольная и минеральная промышленность» («ВИНАКОМИН») с 100% долей участия государства в уставном капитале выполняет функции по добыче, транспортировке и переработке минеральных ресурсов, таких как уголь, медь, железо, золото, олово, цинк и другие минералы. При этом 50% общей выручки компании «ВИНАКОМИН» приходится на уголь. Объемы добычи угля подземным, открытым и другими способами разработки угольных месторождений в Социалистической Республике Вьетнам в период с 2013-2019 гг приведены на рисунке 1.1. Стоит отметить, что добыча угля в 2020 году составила 55 миллионов тонн, что превышает показатели прошлых лет.

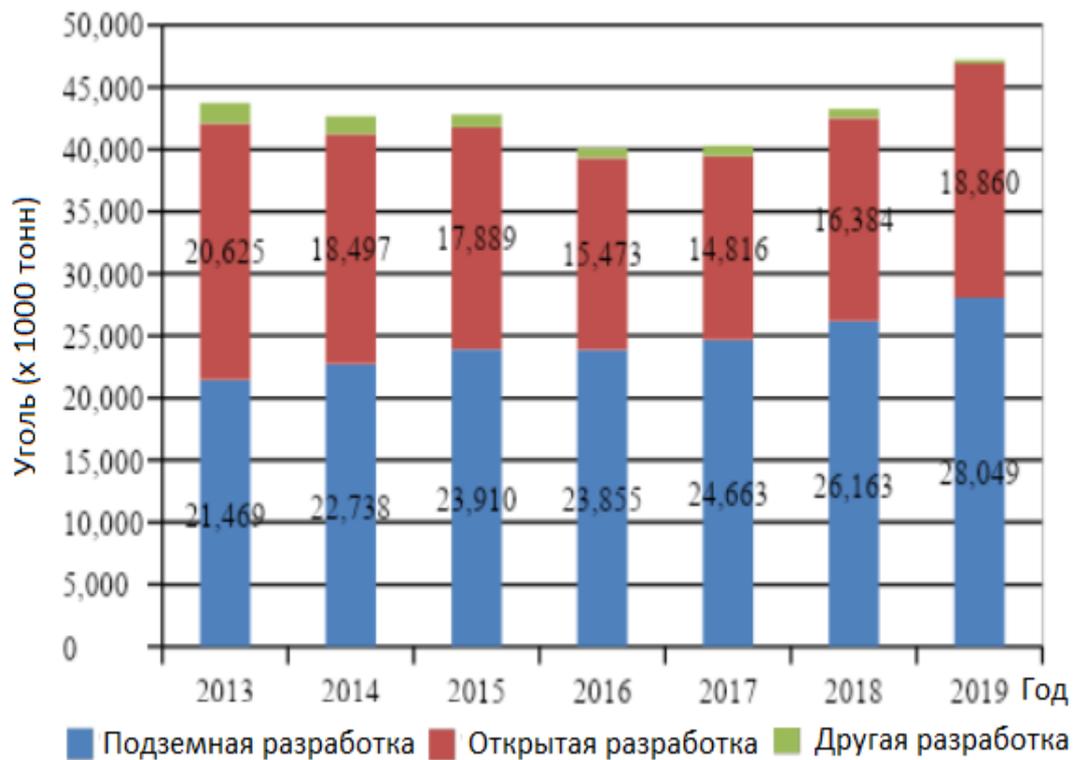


Рисунок 1.1 – Добыча угля во Вьетнаме за период 2013 -2019 г

Запасы угля в основном сосредоточены в провинции Куангнинь. На рисунке 1.2 показана карта расположения горнодобывающих предприятий в угольном бассейне Куангнинь.

В то же время, технологии добычи, транспортировки и переработки угля во Вьетнаме являются устаревшими. Монтаж, эксплуатация, ремонт и обслуживание

машин для угольного производства является дорогостоящим по сравнению с производительностью транспортировки.



Рисунок 1.2 – Карта расположения горнодобывающих предприятий в угольном бассейне Куангнинь

Конвейерное оборудование широко применяется в транспортных комплексах горнодобывающих предприятий. В подземных шахтах уголь транспортируется с места добычи через систему, состоящую из скребкового конвейера, бункера, ленточного конвейера. Данная транспортная система может быть объединена с подъемниками для транспорта груза вверх, которые находятся на земле. Конвейеры являются важным оборудованием для непрерывной транспортировки грузов в подземных шахтах, открытых шахтах и предприятиях по переработке угля [64].

На угольных разрезах, таких как Кок 6, Каошон, Хату, Деонай, Нуйбео, обычно используются автомобили для транспортировки пустой породы на отвалы. Для транспортировки необработанного угля к месту погрузки или на сортировочный завод для сортировки и обработки различной по качеству угольной массы используются карьерные автосамосвалов БелАЗ и грузовые машины, так и конвейеры.

В угольных шахтах, таких как Маохе, Вангзань, Донгбак, Наммау, Монгзыонг и Халонг, конвейеры обычно используются в сочетании с другими транспортными средствами, такими как вагонетки, трамваи для транспортировки угля.

Система мониторинга и автоматического управления транспортировки угля имеет следующие преимущества:

- обеспечивает высокую производительность транспортировки;
- сокращает время простоя;
- обеспечивает удаленную работу системы;
- осуществляет сбор данных и дистанционный мониторинг состояния транспортных систем;
- оповещает о проблемах системы;
- обеспечивает синхронную работу скребкового конвейера, бункера, дробилки и магистрального конвейера между друг другом;
- осуществляет автоматическое хранение транспортной информации.

С 2008 года по настоящее время компания «ВИНАКОМИН» инвестировала в ряд специализированных конвейерных и железнодорожных проектов транспортировки угля для замены используемого грузового транспорта. В городах Халонг и Камфа вместо существующей ранее системы железнодорожного транспорта проведена конвейерная лента к портам погрузки угля для синхронизации процесса эксплуатации, сортировки, переработки и транспортировки угля [49].

Компания «ВИНАКОМИН» инвестировала во многие специализированные конвейерные проекты в разных районах провинции Куанг Нинь, например, в 6-километровый конвейер от рудника Маохэ до Бенкан в районе Хечам. В 2016 году компания «ВИНАКОМИН» построила систему американского угольного порта КМ6 протяженностью 4,5 км в районе Камфа, в районе Уонгби – Маохе. В 2017 году завершилось строительство конвейерной ленты длиной 8 км, транспортирующей уголь из угольного склада Хенгат в порт Дьенконг. Компания поддерживает и другие многие проекты, включающие высокоинвестиционные проекты транспортировки угля конвейерной лентой в районах Камфа, Халонг, Юнгби, Маохе.

Таким образом, до 2025 года угольная отрасль Вьетнама продолжит инвестировать в конвейерные линии, чтобы полностью изменить транспортную систему угля из шахт в порты и на тепловые электростанции в провинциях с целью ограничения образования пыли, шума, выбросов в окружающую среду.

В таблицах 1.1 и 1.2 приведена спецификация конвейерного оборудования, используемого в подземных шахтах и в открытых угольных бассейнах Куангнинь.

Таблица 1.1 – Конвейерное оборудование, используемое в подземных шахтах угольного бассейна Куангнинь [98]

Угольная шахта	Шифр	Источник	Рнм (кВт)	Длина (м)	Число конвейеров
Угольная шахта Хечам	STJ-800	Китай	40÷90	300	14
	SST-650	Китай	40÷110	300	13
	TD-2	Китай	220÷250	600	02
Угольная шахта Халам	B-500	Вьетнам	5,5÷7,5	35,43÷61,19	06
	B-650	Вьетнам	5,5÷30	18,2÷230	16
	B-800	Вьетнам	15÷55	50÷365	09
	B-800	Вьетнам	55÷250	365÷480	05
Угольная шахта Тхонгхат	STJ-800	Китай	30÷90	200÷320	14
	SQD-800/75x2	Китай	75x2	210÷320	12
	STJ-800/37x2	Китай	90x2	420	6
Угольная шахта Маохе	YNMX-1P	Китай	315	550÷650	05
	PTG50/1000	Китай	45	100	15
Угольная шахта Монгзыонг	B-3165	Китай	11÷22	85	10
	B-800	Вьетнам	15÷55	50÷365	09
Угольная шахта Куангхань	DTC-80	Китай	55	320	05
	B-650	Вьетнам	5,5÷22	18÷70	20
Угольная шахта Вангзанг	B-800	Вьетнам	22÷55	50÷150	08
	КЛ150	Россия	40	150	03
	BT-II	Китай	315	482	02
Угольная шахта Халонг	SQQ-800/2x90	Китай	2x90	358	05
	DHT-800	Китай	90	323	05
	B650/190/45	Вьетнам	45	190	04
	SPJ-650	Китай	55	235	05
	SPJ-650	Китай	2x55	319	06

Продолжение таблицы 1.1

Угольная шахта Уонгби	SPJ-650	Китай	22x47	400	20
	SPJ-800	Китай	17÷50	400	18
	SPJ-650	Китай	17÷40	400	18
	SPJ-800	Китай	18,5	150	22
Угольная шахта Хонгтай	YB225M -4	Китай	40	238	05
	YB225M -4	Китай	2x40	512÷600	10

Таблица 1.2 – Конвейерное оборудование, используемое на открытых разработках горнодобывающих предприятий [98]

Угольная шахта	Источник	Рнм (кW)	Длина (m)	Число конвейеров
Маохе	Китай, Вьетнам	11÷132	70÷2000	30
Наммау	Вьетнам	30÷160	100÷6000	26
Нуибео	Китай	7,5÷55	40÷350	22
Каошон	Китай	45	100÷350	28
Порт Нам Каучанг	Вьетнам	15÷45	50÷250	26
Уонгби	Китай, Вьетнам	22x47	400	20
Таунам-Дамаи	Вьетнам	11÷22	50÷150	30
Деонаи	Китай, Вьетнам	75÷200	300÷6000	22
Зыонгхуй	Китай, Вьетнам	18,5÷30	50÷200	20

1.2 Обзор электрических систем привода конвейерных лент на горнодобывающих предприятиях

Сейчас в угольной промышленности Вьетнама системы конвейерных линий в основном оснащены простой системой электропривода. Большинство двигателей малой мощности конвейерной линии включают методом прямого пуском от сети, в то время как запуск и регулировка скорости работы мощных двигателей осуществляют посредством преобразователя частоты и методов плавного пуска [49]:

Угольная шахта Маохе

Объемы добычи угля на угольной шахте Маохе составляет 1,6 млн. тонн в год. Уголь добывается подземным способом и транспортируется по 11 конвейерам из подземели на поверхность участка переработки. В конвейерных установках используется электропривод с асинхронными двигателями мощностью 11 кВт - 132 кВт. Недостатком этой системы является то, что такая система не имеет измерительных устройств, системы предупреждения о неисправностях на линии, что затрудняет нормальное управление работой сортировочной станции работниками предприятия. Большинство двигателей разгружаемой конвейерной ленты (К2) работают со средней потребляемой мощностью, равной $P_{см}$ (средняя мощность) = 36,7 кВт, при номинальной мощности $P_{нм}$ = 132 кВт, и со средним коэффициентом мощности $K_m = 0,77$. Конвейерная лента (К1) имеет два приводных двигателя с одинаковым номинальным значением мощности $P_{нм} = 132$ кВт. Первый двигатель имеет среднюю потребляемую мощность $P_{см} = 125,9$ кВт со средним коэффициентом мощности $K_m = 0,87$. У второго двигателя средняя потребляемая мощность $P_{см} = 42,82$ кВт со средним коэффициентом мощности $K_m = 0,73$.

Видно, что двигатели конвейерной ленты работают в режиме недогрузки по мощности и с коэффициентом мощности меньшим 1. На сортировочной станции отсутствуют энергосберегающие и энергоэффективные технические решения по управлению электроприводом конвейера.

Угольная шахта Наммау

В настоящее время угольная компания Наммау обладает конвейерной лентой, которая находится на глубине 130 метров в Хетнан. Производительность сортировочной установки равна 1000 тонн за смену. Она состоит из множества конвейеров, оборудованных электроприводами с системой регулирования частоты. Конвейеры обладают низким энергопотреблением от 13%÷36%. Диапазон коэффициент мощности двигателей равен $K_m = 0,2÷0,88$.

– конвейер 1: состоит из 2 двигателей номинальной мощностью $P_{нм} = 160$ кВт. Двигатель № 1 имеет среднюю потребляемую мощность $P_{ср} = 32,19$ кВт с $K_m = 0,85$ и коэффициент использования 20%. Двигатель № 2 имеет среднюю потребляемую мощность $P_{см} = 51,79$ кВт с $K_m = 0,88$ и коэффициент использования 30%. Скорость ленточных конвейеров 1,7 м/с.

– конвейер 2: состоит из 2 двигателей номинальной мощностью $P_{\text{нм}} = 160$ кВт. Первый двигатель имеет среднюю потребляемую мощность $P_{\text{см}}=58,3$ кВт с $K_{\text{м}} = 0,81$ и коэффициент использования 20%. Двигатель № 2 имеет среднюю потребляемую мощность $P_{\text{см}}=55,74$ кВт с $K_{\text{м}} = 0,83$ и коэффициент использования 30%. Оба асинхронных двигателя работают с частотой $f < 35$ Гц.

Угольная шахта Зыонгхуй

Сортировочная станция включает в себя три конвейера:

Конвейер №1 приводится в движение двигателями номинальной мощностью $P_{\text{нм}} = 30$ кВт, конвейеры №2 и №3 приводятся в движение двигателями номинальной мощностью $P_{\text{нм}} = 18,5$ кВт. Включение двигателей конвейеров осуществляется методом прямого пуска с помощью магнитного пускателя. Результаты испытаний мощности приводного двигателя показывают, что конвейерные ленты работают в режиме непрерывной нагрузки, мощность двигателей изменяется в зависимости от нагрузки на ленту. Средние рабочие мощности и средние коэффициенты мощности двигателей конвейеров составили:

- конвейер №1: $P_{\text{см}} = 10,87$ кВт и $K_{\text{м}} = 0,76$;
- конвейеры №2 и №3: $P_{\text{см}} = 7,3$ кВт и $K_{\text{м}} = 0,82$.

Угольная шахта Деонай

На конвейере 1 сортировочной линии используется двигатель номинальной мощностью $P_{\text{нм}} = 200$ кВт. Средняя рабочая мощность двигателя $P_{\text{см}} = 145,9$ кВт, средний коэффициент мощности $K_{\text{м}} = 0,81$. На конвейере 2 сортировочной линии используется двигатель номинальной мощностью $P_{\text{нм}} = 75$ кВт, который включается путем прямого пуска, коэффициент использования двигателя при работе составляет 65%.

Угольная шахта Тайнам-дамай

В настоящее время сортировочная станция производительностью 500 Т/ч угольной шахты имеет 4 конвейера:

- конвейер подачи 1: двигатель с номинальной мощностью $P_{\text{нм}} = 22$ кВт, двигатель работает со средней мощностью $P_{\text{см}} = 2,63 \div 3,33$ кВт, со средним коэффициентом мощности $K_{\text{м}} = 0,32 \div 0,44$, а коэффициент использования составляет $12\% \div 15\%$.

– конвейер 2: Двигатель имеет номинальную мощность $P_{\text{нм}} = 18,5$ кВт, двигатель работает со средней мощностью $P_{\text{см}} = 3,97 \div 4,61$ кВт, со средним коэффициентом мощности $K_m = 0,36 \div 0,42$ и коэффициентом использования $21\% \div 25\%$.

– конвейер 3: Двигатель имеет мощность $P_{\text{нм}} = 15$ кВт, двигатель работает со средней мощностью $P_{\text{см}} = 3,09 \div 3,61$ кВт, со средним коэффициентом мощности $K_m = 0,34 \div 0,4$ и коэффициентом использования $21\% \div 24\%$.

– конвейер 4: Двигатель имеет мощность $P_{\text{нм}} = 22$ кВт, двигатель работает со средней мощностью $P_{\text{см}} = 8,03 \div 15,62$ кВт, со средним коэффициентом мощности $K_m = 0,37 \div 0,71$ и коэффициентом использования $31\% \div 37\%$.

1.3 Технология транспортировки угля на угольной шахте Маохе

Шахта Маохе является ведущим горнодобывающим предприятием компании «ВИНАКОМИН» во Вьетнаме. Угольная шахта Маохе занимает площадь 40 км^2 . Текущая добыча составляет 1,6 млн.т/год, план добычи составляет 2 млн.т/год на 2022 год. На рисунке 1.3. приведена Конвейерная линия от -230 м до +30 м (над землей) шахты Маохе в угольном бассейне Куангнинь.

Шахта Маохе обеспечивает добычу угля с крутопадающих угольных пластов. Схема вскрытия, применяемая на данной шахте, предусматривает использование наклонных и вертикальных стволов. До отметки 137 м вскрытие осуществлено наклонными стволами от 40 м до 140 м. Вскрытие горизонтов от 250 м до 600 м осуществляется главным наклонным стволом с уклоном, на котором установлено магистральная конвейерная линия. Очистные забои ориентированы по падению пласта и расположены с наклоном 20-35 градусов. Сдвоенные штреки 1 и 2 предназначены для подготовки выемочных столбов по углю, схемой вскрытия месторождения предусмотрено оставление между этими столбами целика шириной от 25 м до 40 м. В настоящее время, штреки используются только при отработки одного выемочного столба за пределом лавы данный штрек погашен. Отработка пласта выполняется в направлении магистрального ленточного конвейера. Спуск отбитого угля из забоя осуществляется по средством рештаков непосредственно конвейерный штрек, обозначенный выше. Для крепления призабойного пространства в очисном забое предусмотрено использования гидравлической крепи щитового типа, на сопряжениях используются металлическая и деревянная крепи. Добыча угля осуществляется буровзрывным способом длинными столбами простирания, при чем длина столбов достигает

700 м, а длина лав находится в диапазоне от 80 до 580 м. В дальнейшем длина столбов может быть увеличена вплоть до одного километра с перспективами дальнейшего увеличения в перспективе. Производительность забоя по горной массе, в настоящее время, составляет не менее 320 тонн в час.



Рисунок 1.3 – Конвейерная линия от -230 м до +30 м (на земле) шахты Маохе в угольном бассейне Куангнинь

Для транспортировки угля непосредственно в лаве, как было указано ранее, используются решетки. В наклонной штольне и на транспортном штреке, в настоящее время, используются участковые конвейерные линии, оснащенные скребковыми конвейерами. В наклонном магистральном шурфе применяются магистральные ленточные конвейеры, для перегрузки отбитой горной массы с участковых конвейеров на магистральный применяется промежуточный бункер-накопитель. Скорость движения рабочего органа скребкового конвейера составляет 0,7 м/с, длина конвейера – 80 м. Магистральная конвейерная линия включает в себя три ленточных конвейера длиной каждого конвейера по 600 м.

1.4 Технология управления электроприводом конвейера на шахте Маохе

1.4.1 Оценка систем управления электроприводом конвейера

Ранее технология управления конвейером на угольном месторождении с применением пускателя, конвейерного двигателя с прямым пускателем.

Преимуществами вышесказанных систем электроприводов являются простота магнитного работы, удобство ремонта, смены и установки. Их недостатком является

невозможность регулирования скорости двигателя, двигатель всегда работает на одной начальной мощности, это вызывает энергетические затраты.

На рисунке 1.4 показан взрывобезопасный магнитный пускатель типа KDP с взрывобезопасным типом ExdI, напряжением 660 (380) В и 1140 (660) В, частотой 50 Гц, устанавливается в трехфазной сети переменного тока с изолированным нейтралью трансформатором для запуска и остановки 3-фазного электродвигателя в угольных и сланцевых шахтах, где есть риск попадания воздуха и пыли. Магнитный пускатель KDP защищает от короткого замыкания, перегрузки и запрещает включение при утечке тока через кабельный вывод магнитного пускателя.



Рисунок 1.4 – Магнитный пускатель взрывозащищенного искробезопасного типа KDP-ExdI из Китая

В настоящее время, в шахте Маохе используются ПЧ с диодным выпрямителем для управления конвейерными двигателями.

На входе преобразователя частоты устанавливается пассивный LC фильтр с целью снижения гармоник у входного напряжения системы. ПЧ с пассивный LC фильтром снижает потери электроэнергии в приводе и позволяет регулировать скорость конвейера в соответствии с практическими условиями. Однако пассивные фильтры гармоник имеют громоздкие размеры и не устраняют все гармоники высокого порядка.

Для непрерывного контролирования работы конвейера необходима установка датчиков расстояния, датчиков схода лента, датчиков объема и массы угля (рисунок 1.5). Использование методов управления с контролированием скорости с помощью датчиков обеспечивает поддержания мощности двигателя в соответствии с объемом угля на ленте (рисунок 1.6). Необходимо измерить скорость ленты V (м/с), объем подачи

угля q (кг/с) на ленту. По полученной с датчиков информации система управления соответственно регулирует скорость ленты. Это позволяет установить необходимую мощность подачи угля, обеспечить экономию электроэнергии, повысить долговечность механической структуры ленты.

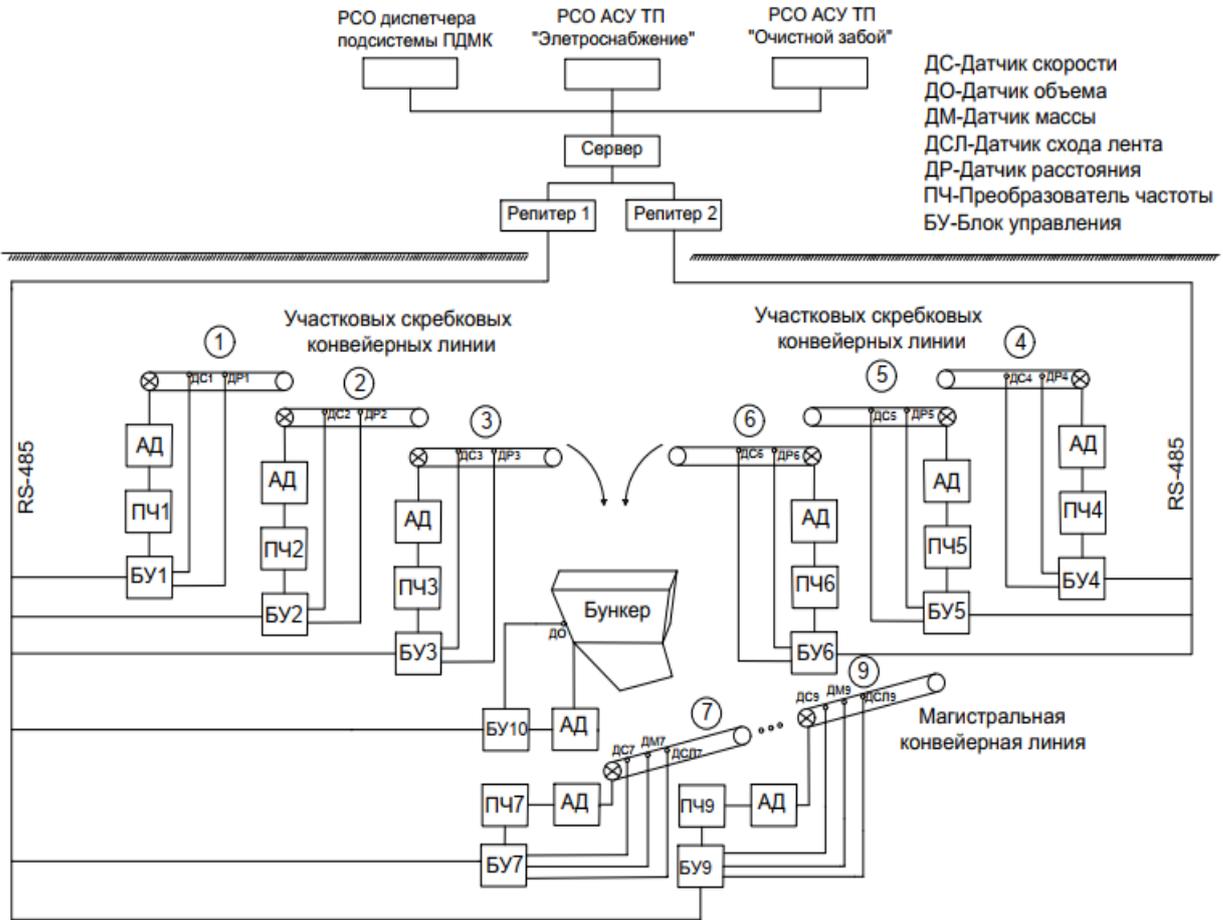


Рисунок 1.5 – Схема системы электроприводом транспорта конвейеров

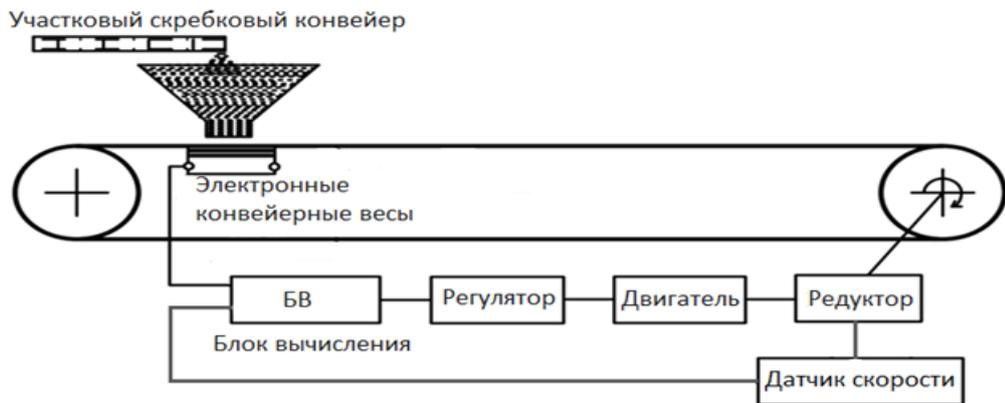


Рисунок 1.6 – Общая схема системы автоматической регулировки скорости конвейерного двигателя

В подземной транспортной системе имеется множество конвейеров, лебедок, работающих на разных склонах, часто происходит рекуперативное торможение,

поэтому необходимо установить больше разрядных резисторов, что приведет к увеличению размеров преобразователя и увеличит затраты на него. Необходимо исследовать и использовать преобразователи частоты для повышения эффективности работы электропривода конвейера и уменьшения искажения гармоник тока в сети. Поэтому устройство такого преобразователя и его режимы работы широко изучается в настоящее время.

Исследование по соответствию конвейера на угольном месторождении Маохе с использованием управляющих алгоритмов с контролем скорости, например, прямое управление моментом с целью соблюдения стабильности всей ленты при пуске, торможении и регулировании скорости. Это увеличивает срок службы и долговечность конвейерного механизма.

1.4.2 Методики расчёта нагрузок электроприводов конвейерных установок

Число приводных барабанов и двигателей определяют систему электропривода. Системы приводных блоков конвейерных установок приведены на рисунке 1.7.

В настоящее время, различают следующие типы кинематических схем конвейерных установок, приведенные на рисунке 1.7. На рисунке 1.7 (а) и (б) показаны кинематические схемы с одним двигателем и редуктором. Двигатель Д и однобарабанный привод Б могут быть расположены перпендикулярно (рисунок 1.7 а) или параллельно (рисунок 1.7 б) ленте конвейера. Следует отметить, что параллельное расположение позволяет уменьшить ширину блока привода и тем самым обеспечить преимущества при его эксплуатации в ограниченном пространстве подземных выработках.

На рисунке 1.7 (в) показан однобарабанный привод с двумя электродвигателями. Такой привод применяется для конвейеров конвейера средней мощности и позволяет обеспечить высокий коэффициент сцепления барабана с его лентой.

Для обеспечения работы конвейерной ленты большой длины или при необходимости добиться высокой производительности такой ленты используют мощные двухбарабанные привода с двумя или более двигателями (рисунок 1.7 г).

Такие системы привода обеспечивают большой угол обхвата ленты барабанов, однако одноприводные барабаны требуют меньше затрат на их разработку, установку и эксплуатацию. Кроме того требуется учитывать вопросы выравнивания нагрузки приводных электродвигателей [18].

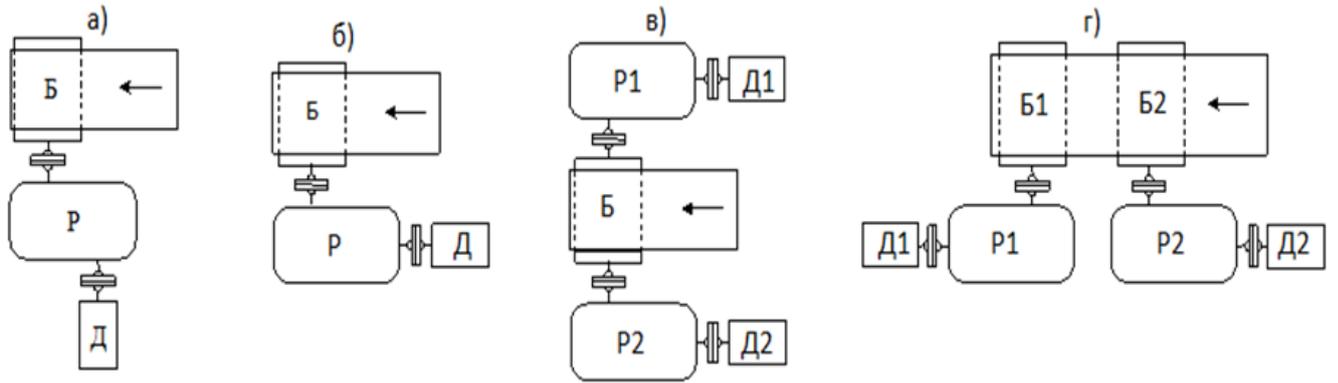


Рисунок 1.7 – Кинематические схемы приводных блоков конвейерных установок

Расчет момента инерции и рабочих нагрузок электропривода выполняется по техническим параметрам и характеристикам действующий ленточных конвейеров и их приводных двигателей на рассматриваемом горном предприятии в соответствии с его техническим проектом [17, 18].

На рисунке 1.8 приведена схема однобарабанного электропривода.

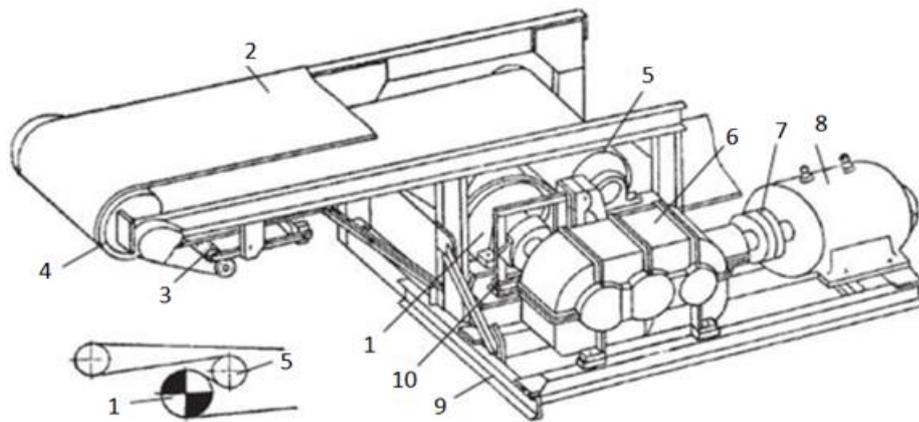


Рисунок 1.8 – Схема однобарабанного электропривода: 1 – приводной барабан; 2 – лента; 3 – устройство для очистки ленты; 4 – разгрузочный барабан; 5 – отклоняющий барабан; 6 – редуктор; 7 – муфта; 8 – асинхронный электродвигатель во взрывобезопасном исполнении с короткозамкнутым (мощностью 100-200 кВт) или фазовым ротором (мощностью до 500 кВт); 9 – рама привода; 10 – тормоз.

Определяют усилия на грузовой F_z и порожняковой F_n ветвях конвейера простой конфигурации (выражения 1.1 и 1.2):

$$F_z = 9,81 \cdot K \cdot (q_z + q_n + q_p') \cdot L \cdot w_p' \cdot \cos \beta \pm 9,81 \cdot (q_z + q_n) \cdot L \cdot \sin \beta, \text{ [Н]}; \quad (1.1)$$

$$F_n = 9,81 \cdot K \cdot (q_n + q_p'') \cdot L \cdot w_p'' \cdot \cos \beta \mp 9,81 \cdot q_n \cdot L \cdot \sin \beta, \text{ [Н]}, \quad (1.2)$$

где K – коэффициент, учитывающий зависимость величины дополнительного сопротивления на приводных барабанах и натяжных устройствах от длины конвейера

(таблица 1.3); q_z – погонная масса груза на ленте, кг/м; q_l – погонная масса ленты конвейера, кг/м; q'_p – погонная масса вращающихся частей роликов грузовой ветви, кг/м; q''_p – погонная масса вращающихся частей роликов порожняковой ветви, кг/м; L – длина конвейера, м; w'_p – коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам грузовой ветви конвейера; w''_p – коэффициент сопротивления движению ленты по роликоопорам порожняковой ветви конвейера; β – угол наклона конвейера, градус, знак плюс в формулах принимается при движении грузовой или порожняковой ветви вверх, минус – при движении вниз.

Таблица 1.3 – Зависимость коэффициента дополнительного сопротивления от длины конвейера [18]

L , м	100	200	300	450	600	850	1000	1500
K	1,75	1,45	1,3	1,2	1,15	1,1	1,08	1,05

Погонная масса груза на ленте определяется по формуле 1.3:

$$q_z = \frac{Q}{3,6 \cdot v} \approx \frac{G}{L}, [\text{кг/м}], \quad (1.3)$$

где Q – производительность конвейера, т/час; v – скорость ленты, м/с;

G – масса нагрузки на ленту (кг);

L – длина конвейера (м).

В соответствии с ГОСТ 20 – 85, в горной промышленности необходимо применять трудновоспламеняющиеся резинотканевые и резинотросовые ленты конвейеров. В их технических характеристиках приводятся только удельные массы на площадь поверхности ленты (кг/м^2).

Для определения погонной массы ленты используется формула 1.4:

$$q_l = B \cdot m_l, [\text{кг/м}], \quad (1.4)$$

где B – ширина ленты, м; m_l – удельная масса, кг/м^2 .

Погонная масса вращающихся частей роликов грузовой ветви определяется по формуле 1.5:

$$q'_p = \frac{m'_p}{l'_p}, [\text{кг/м}], \quad (1.5)$$

где m'_p – масса ролика грузовой ветви (желобчатая роlikоопора), кг; l'_p – расстояние между роlikоопорами, м.

Погонная масса вращающихся частей роlikов порожняковой ветви определяется по формуле 1.6:

$$q''_p = \frac{m''_p}{l''_p}, \text{ [кг/м]}, \quad (1.6)$$

где m''_p – масса ролика порожняковой ветви (прямая роlikоопора), кг; l''_p – расстояние между роlikоопорами, м.

Массы роlikоопор ленточного конвейера приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Массы роlikоопор ленточного конвейера [18]

Ширина ленты, мм	Желобчатая роlikоопора		Прямая роlikоопора	
	диаметр ролика, мм	масса, кг	диаметр ролика, мм	масса, кг
800	89	8,5	89	7,7
800	127	22	127	19
1000	127	25	127	21,5
1200	159	57	127	26

Типовое расстояние между роlikоопорами:

- желобчатая роlikоопора – 1,0 м;
- прямая роlikоопора – 2,4 м.

В таблице 1.5 приведены данные коэффициентов сопротивления движению конвейера в зависимости от условий работы конвейера.

Суммарное тяговое усилие определяется как сумма усилий грузовой и порожняковой ветвей определяется по формуле 1.7:

$$F_{\Sigma} = F_z + F_n, \text{ [Н]} \quad (1.7)$$

Можно определить суммарное тяговое усилие с использованием общего коэффициента сопротивления движению определяется по формуле 1.8:

$$F_{\Sigma} = 9,81 \cdot K \cdot (q_z + 2 \cdot q_n + q'_p + q''_p) \cdot L \cdot w' \cdot \cos \beta \pm 9,81 \cdot q_z \cdot L \cdot \sin \beta, \text{ [Н]} \quad (1.8)$$

Таблица 1.5 – Значения коэффициентов сопротивления движению [33]

Условия работы	w'_p грузовой ветви	w''_p порожняковой ветви	Общий коэффициент сопротивления w'
Конвейер большой мощности, работает в стационарном состоянии без загрязнений, техническое состояние установки хорошее.	0,020 – 0,025	0,025 – 0,035	0,025
Конвейер работает в стационарном состоянии с небольшими загрязнениями ленты или при наличии абразивной пыли, техническое состояние установки хорошее.	0,025 – 0,030	0,030 – 0,040	0,030
Конвейер работает в полустационарном состоянии с сильным загрязнением ленты, техническое состояние установки хорошее.	0,030 – 0,035	0,035 – 0,045	0,035
Конвейер работает в передвижном состоянии в условиях сильного загрязнения и запыленности воздуха помещения, техническое состояние установки удовлетворительное.	0,035 – 0,045	0,040 – 0,050	0,040

Приведенный к скорости двигателя момент статического сопротивления определяется по формуле 1.9:

$$M_c = \frac{F_\Sigma \cdot R_\sigma}{i_p \cdot \eta_\sigma \cdot \eta_p}, [\text{Нм}] \quad (1.9)$$

где R_6 – радиус приводного барабана, м; i_p – передаточное число редуктора; η_6 – КПД барабана (η_6 при использовании подшипников качения принимают равным $\eta_6 = 0,96 \div 0,98$ при подшипниках скольжения $\eta_6 = 0,93 \div 0,98$), η_p – КПД редуктора.

КПД редуктора зависит от числа ступеней редуктора и типа передачи. Значения КПД редукторов по каждой ступени передачи:

- цилиндрическая передача $\eta_p = 0,97 \div 0,99$;
- коническая передача $\eta_p = 0,96 \div 0,98$.

При многоступенчатой цилиндрической или конической передачи суммарный КПД редуктора определяется произведением значений КПД каждой его ступени.

Таким образом, через датчик измерения нагрузки на конвейере будет определяться изменение фактического момента нагрузки.

1.4.3 Технические требования и характеристики электроприводов

Конвейерный электропривод должен быть взрывобезопасным, соответствовать правилам использования электрооборудования в подземных шахтах национального стандарта Социалистической Республики Вьетнам – TCVN 7079:2003 [98] и нормам изготовления взрывобезопасных двигателей в соответствии со стандартом IEC 60079-0:2011 [86]. Взрывобезопасный двигатель охлаждается вентилятором на задней оси двигателя.

Электроприводы должны иметь защиты от следующих вероятных аварийных режимов:

- токов короткого замыкания (защитные устройства должны срабатывать немедленно или в течение времени до 0,2 с);
- перегрузки по току или перегрев;
- утечке тока через крышку от обмоток статора электродвигателя;
- утечке напряжения, связанного с уменьшением сопротивления изоляции по сравнению с допустимым сопротивлением изоляции относительно земли;
- обрыве фазы (электропривод должен иметь встроенную защиту от такого режима);
- повторной подаче электропитания на электропривод, при выходе из строя защитных устройств двигателя, повреждении механической части конвейерной ленты;
- защитные устройства должны работать даже при длительном времени запуска.

В настоящее время в шахте Маохе, конвейерные и скребковые двигатели имеют напряжение 220/380 В и 380/660 В с частотой 50. На магистральной конвейерной линии установлено три конвейера с максимальной пропускной производительностью 250 т/час, общей длиной 1900 м. Их параметры приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Таблица параметров магистральной конвейерной линии

Q, т/час	v, м/с	Длина (м)	β (градус)
250	1,5	550	5
250	1,5	600	4,8
250	1,5	750	7,8

Расчет механической части автоматизированного электропривода конвейерной установки и параметры выбранного асинхронного двигателя для конвейерной установки приведены в приложении А. В электроприводных конвейерах с двигателями большой мощности в приложении А ($P_{АД1} = P_{АД2} = 110$ кВт и $P_{АД3} = 150$ кВт) всегда должен обеспечиваться плавный запуск и стабильный рабочий процесс с возможностью регулировки скорости вращения. Для управления конвейерной установкой при значительных пусковых токах и возможности процесса пуска в режиме послеаварийной остановки необходимо использовать электроприводы с повышенной перегрузочной способностью. В таблице 1.7 приведены технические характеристики скребкового конвейера и электродвигателя бункера соответственны с рисунке 1.5.

Таблица 1.7 – Технические характеристики скребкового конвейера

Технические характеристики	Параметры
Тип скребкового конвейера	СКАТ -80
Длинна скребкового конвейера:	80 m
Мгновенная производительность:	100 Т/ч
Скорость движения цепи:	0,738 m/c
Косоймаксимальный допустимый угол:	18 ⁰
Тип электродвигателя:	JDSB-22
Скорость вращения ротора:	1460 об/мин
Номинальная мощность электродвигателя:	18,5 кВт
Номинальное напряжение электродвигателя:	660 В

1.4.4 Использование преобразователей частоты на угольных шахтах

Вьетнама

Основываясь на информацию о типе электроприводов, используемых в конвейерных системах во Вьетнаме, и об их энергетических параметрах работы, можно сделать вывод о том, что в конвейерах угольных шахт преобладает неуправляемый электропривод с магнитными пускателями. При этом даже существующие установки электропривода конвейера с частотными преобразователями требуют улучшения системы управления с целью повышения качества регулирования для обеспечения экономии энергии, плавной и бесшумной работы конвейера, повышения его надежности и безопасности, минимизации времени и затрат на его ремонт.

В настоящее время системы электропривода с преобразователями частоты применяются на горнодобывающих предприятиях Вьетнама, но в основном в наземных системах. Используемые преобразователи частоты поставляются ведущими мировыми компаниями, такими как Siemens, ABB, Omron, LS, INVT. Однако, в подземных шахтах преобразователи частоты используются редко, поскольку они требуют наличия взрывозащиты.

В настоящее время ряд компаний по всему миру изготавливает взрывозащищенные модели преобразователей частоты для синхронных и асинхронных двигателей. Эти преобразователи частоты имеют входное напряжение 660/1140 В, входную частоту от 45 Гц до 65 Гц и выходную частоту от 0 Гц до 60 Гц. Китайские преобразователи частоты ВРJ1 (рисунок 1.9) используются на некоторых угольных предприятиях Вьетнама. Эти типы преобразователей частоты имеют высокую цену, поэтому их использование ограничено.

В настоящее время ряд компаний по всему миру изготавливает взрывозащищенные модели преобразователей частоты для синхронных и асинхронных двигателей. Эти преобразователи частоты имеют входное напряжение 660/1140 В, входную частоту от 45 Гц до 65 Гц и выходную частоту от 0 Гц до 60 Гц. Китайские преобразователи частоты ВРJ1 (рисунок 1.9) используются на некоторых угольных предприятиях Вьетнама. Эти типы преобразователей частоты имеют высокую цену, поэтому их использование ограничено.



Рисунок 1.9 – Взрыво-искробезопасные ПЧ из Китая (ВРП1)

Данные взрывобезопасные преобразователи частоты используются в некоторых шахтах Вьетнама и имеют структурную схему, показанную на рисунке 1.10.

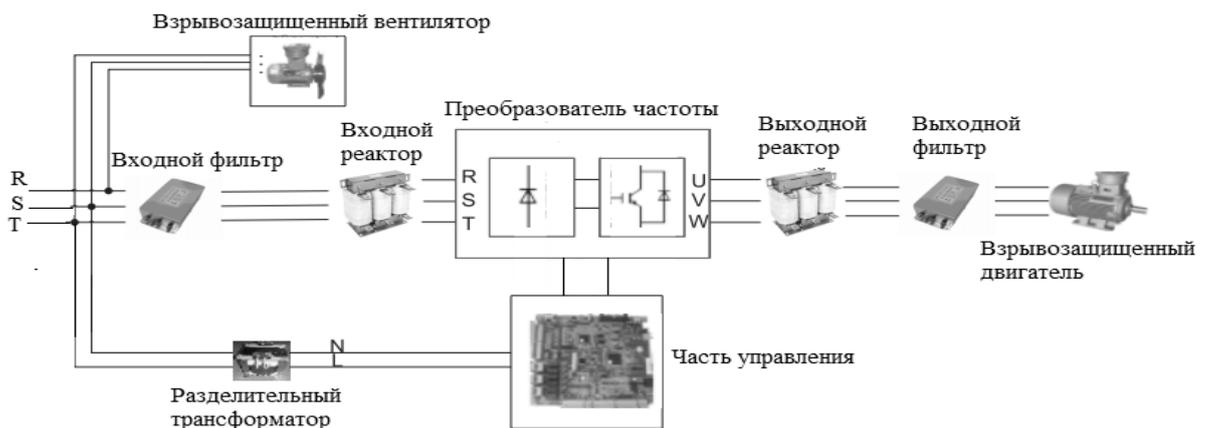


Рисунок 1.10 – Структурная схема взрывозащищенного преобразователя частоты ВРП1

Отечественные научные исследования и разработки в области преобразователей частоты электропривода являются первоочередной задачей исследовательских институтов и компаний Вьетнама. Одной из таких задач является разработка взрывозащищенного преобразователя частоты, для использования в подземных угольных шахтах.

Результаты исследования и разработок в области преобразователей частоты должны обеспечивать высокие требования к энергосбережению, качеству тока и напряжения на входе и выходе преобразователя, обмену энергией по двум направлениям и гарантировать низкую себестоимость его изготовления. Выполнение этих требований даст гарантию, что Вьетнам получит самостоятельность в технологии изготовления преобразователей частоты, снизит затраты на производство и эксплуатацию систем электроприводов с переменной частотой для использования в угольных шахтах.

1.4.5 Технические требования к конвейерам в горнодобывающей промышленности

Работа шахтной транспортной системы определяется технико-экономическими показателями. В частности, надежность транспортной системы тесно связана с электроприводом ленточного конвейера. Основной вклад в суммарное время простоя,

который может достигать значения равный 50% общего времени простоя, связан с вероятностью отказов и особенностями режимов работы ленточных конвейеров в период их эксплуатации [18, 68]. Динамика снижения надежности конвейеров приведена в таблице 1.8, а причины простоев и параметры надежности элементов конвейеров приведены в таблице 1.9 с учетом времени эксплуатации конвейера.

Таблица 1.8 – Динамика снижения надежности ленточных конвейеров в зависимости от времени эксплуатации [68]

Показатели	Второй год эксплуатации	Третий год эксплуатации	Четвертый год эксплуатации
Время простоя ленточного конвейера, ч	265	735	2384
Потери угля в результате остановки его добычи, т	1373	3255	6643

Таблица 1.9 – Удельный вес причин простоев основных элементов конвейеров за год [68]

Причины простоев	Простои, ч	Число отказов	Наработка на отказ, ч	Время восстановления, ч
Неисправность механической части конвейера	642,9	265	7,35	2,384
Неисправность электрической части конвейера	580,1	771	2,52	0,764
Вулканизация ленты	472,0	11	17,54	4,25
Сход ленты	417,9	289	6,74	1,44
Повреждение ленты	237,4	574	3,39	0,414
Очистка ленты, барабанов, бункеров	214,9	399	4,88	0,539
Прочие	138,7	697	2,79	0,199

По данным таблицы 1.10 видно, что среднее время ремонта конвейера может составлять от 21 до 24 часов. Прочность ленточного конвейера зависит от следующих факторов: от физических свойств и структуры ленты; от габаритных размеров ленты; от скорости конвейера; от характера груза (его жесткость, размер); от времени безотказной работы и производительности ленты т/ч. Нагрузка оказывает большое влияние на износ ленточного конвейера и может привести к отклонению барабана.

Таблица 1.10 – Время ремонта основных элементов конвейеров в зависимости от года эксплуатации [18, 68]

Восстанавливаемый узел	Среднее время восстановления по годам, ч		
	1-й год	2-й год	3-й год
Механическое оборудование	1,1	6,5	0,8
Гидросистема и система смазки	0,5	1,5	1,6
Электрооборудование	0,4	1,4	0,3
Ремонт ленты (мелкий)	0,7	1,5	0,6
Ремонт ленты (вулканизация)	26,0	23,8	21,5

В процессе эксплуатации конвейерные установки подвергаются нагрузкам от давления веса угля на ленту и давления веса ленты на приводной барабан, динамическим нагрузкам от веса груза на ленту и циклическим продольным и поперечным нагрузкам от изгиба ленты, оказываемые на роlikоопоры. Помимо этого, происходят срывы и истирания резины рабочей обкладки, отслоение резины от сердечника, разрывы, проколы, прорывы и истирания обкладки в результате упругого проскальзывания и пробуксировка ленты на барабане, что приводит к износу ленты конвейера.

Специфика технологического процесса, условий эксплуатации и способов электроснабжения, а также конструктивные особенности механизмов определяют технологические требования к статическим и динамическим характеристикам электроприводов конвейеров [17]. Специфика электропривода конвейерного транспорта описывается в [50, 55]:

– лента является самой дорогой частью конвейерной установки, поэтому необходимо обеспечить ее нормальный режим работы. Недопускаются сбегания ленты с

барабанов и роlikоопор и ее пробуксировка, а также задевания ленты об опорные конструкции;

– для управления конвейерной установкой при значительных пусковых токах и возможности процесса пуска в режиме послеаварийной остановки необходимо использовать электроприводы с повышенной перегрузочной способностью;

– на ленту электропривода действует неравномерная статическая нагрузка потоков груза. Система управления должна обеспечивать распределение нагрузки, особенно при загрузке магистральных конвейеров доставляющие породу из добычных забоев в капитальных выработках;

Электропривод конвейерного транспорта работает в продолжительных режимах с редкими пусками и неизменным направлением вращения, возможные пуски ленты под статической нагрузкой потока груза после аварийной остановки технологического процесса и влиянием перепада температур и уровня запыленности в пространстве нахождения механизма. Необходимо обеспечить высокое натяжение ленты, чтобы предотвратить ее проскальзывание и учитывать высокие повышенные моменты на валу двигателя в режимах разгона и торможения конвейера.

Рассмотрим условия работы конвейера, учитывая статические и динамические свойства электропривода и его системы управления. В нормальном длительном режиме работа конвейера может осуществляться в одном направлении, без рекуперации энергии, в случае изменения нагрузки. Когда же работа конвейера осуществляется под углом наклона, тогда уже необходимо обеспечить реверс направления движения электропривода из двигательного в тормозной режим [25]. При последовательном соединении конвейеров работа синхронная их работа без завалов в точках перегрузки осуществляется за счет правильной очередности их включения и отключения. При встречном грузопотоке происходит включение конвейера, при обратном- отключение.

Плавность пуска и торможения с ограничением максимального момента и тока электродвигателя обеспечивает условие надежного сцепления грузового материала с лентой конвейера и ленты с барабаном. Для этого электрический привод конвейера должен ограничить ускорение при пуске ленты большой длины до допустимой величины и нивелировать динамические колебания нагрузки [24].

Выбор электропривода транспортной системы осуществляется по условиям пуска и разгона тягового органа конвейера. Передача тягового усилия осуществляется с

помощью упругого удлинения ленты. Если оно за короткое время будет приложено к началу ленты, то это приведет к разгону приводного барабана и сцепленной с ней части ленты. Под действием сил упругой деформации произойдет увеличение длины ленты и часть нее будет неподвижна. Чем больше длина конвейера, тем сильнее будет запаздывания движения отдельных частей ленты. С уменьшением силы натяжения ленты будет выравнивать ее скорость. Однако, на участках растянутой ленты была запасена энергия, которая может привести к увеличению их скорости и к колебаниям ленты вместе с грузовым материалом на ней. Такой переходном процесс в тяговом органе приводит к динамическим перенапряжения в ленте, и как следствие, к ее ускоренному износу и разрыву.

Поэтому необходимо ограничить величины ускорения и силы рывка ленты при разгоне конвейера, а в некоторых случаях, рядом исследователей, показана необходимость также регулировать скорость электропривода на мощных (тяжелых) конвейерах (приложение А) [19, 21, 64]. В случае, если транспортная система состоит из множество последовательных конвейеров, объединенных общим производственным процессом, то каждый из них должен быть строго синхронизирован и согласован по скорости.

1.4.6 Обзор работ по регулированию грузопотока конвейерной транспортной системы

Работы авторов [34, 36] по регулированию нагрузки ленточных конвейеров при эксплуатации на горнодобывающих предприятиях указывают на причины их пониженной эффективности, к которым относятся колебания грузопотока на ленте в широком диапазоне и выбор оборудования исходя из значений максимального коэффициента использования. Поэтому, для повышения экономической эффективности ленточного конвейера, необходимо подобрать его параметры в соответствии с фактическим грузопотоком.

Возможно сделать непрерывный и равномерный грузопоток конвейер, чтобы обеспечить его стабильность работы. Существуют два способа решения:

– *Применение бункера и дискретное регулирование скорости конвейера*

Бункеры обеспечивают непрерывную работу горного предприятия в период кратковременного выхода из строя одного из компонентов транспортной системы. В 1987-1992 г. Назаренко В.М., разработал систему управления скоростью ленточного

конвейера с использованием бункеров на шахтах с рядом режимов управления [27, 84]. С помощью бункера с небольшой вместимостью (не более 10% от расчетной нагрузки на ленту) координируется скорость конвейера и интенсивность нагрузки, с помощью изменения размера разгрузочной щели. Благодаря этому способу снижается нагрузка на конвейер.

Если бункер имеет большую емкость для накопления максимального количества груза, то можно загружать ленту потоком, близким к расчетному уровню. При этом способе транспортировки груз в бункере будет накапливаться до заданного уровня (максимального и минимального), после чего процесс будет циклически повторяться [47, 52]. Согласно работам [47], преимуществом этого режима является отсутствие динамики, режим всегда считается статическим. Ленточный конвейер работает в режиме номинальной нагрузки. Однако, методика с использованием бункера имеет много периодически повторяющихся пуско-тормозных режимов и двигатель работает только на номинальной скорости.

– Регулирование скорости ленточного конвейера в зависимости от грузопотока

Регулирование скорости конвейера уменьшает ширину ленты при проектировании, а также уменьшает износ ленты и энергопотребление. Существуют два метода регулирования скорости ленты: непрерывный и дискретный.

Метод дискретного регулирования, основанный на количестве измеренного груза, изменяет скорость конвейера дискретно при достижении определенного порогового значения груза по требованию технологии. При непрерывном методе регулирования скорость конвейера изменяется пропорционально потоку груза.

Работа Г.И. Солода [47, 63] доказывает эффективность регулирования скорости конвейера в зависимости от скорости движения комбайна. По данным работы О.М. Зарецкого [33] следует не только измерять фактический грузопоток на конвейерной ленте, но также, если транспортная система состоит из нескольких конвейеров, можно измерять скорость предыдущего конвейера, чтобы изменять скорость последующего.

В работе Запенина И. В. [31, 32] проанализирован ленточный конвейер с многомассовыми компонентами, в которых сосредоточенная масса соединена невесомыми упругими вязкими элементами. Автор уделяет особое внимание оптимизации динамических режимов конвейера и вводит критерии оптимизации

динамических режимов ленты в зависимости от ее скорости и ускорения. Функция этого метода описывается интегральным уравнением Винера-Хопфа.

Конвейерные системы электроприводов с постоянной скоростью и без измерения потока груза имеют низкую эффективность около 50-70% и работают 60-70% времени [32, 65]. Поэтому, важно повышать эффективность транспортных систем в угольных шахтах за счет использования бункеров на выходе из скребковых конвейеров и регулирования скорости магистрального конвейера в соответствии с грузопотоком.

1.5 Выбор метода управления электроприводом конвейера

Опыт работы с ленточными конвейерами показал, что для повышения эффективности использования энергетических систем ленточных и роликовых конвейеров наиболее эффективным является использование частотно-регулируемого электропривода [19, 21]. Это позволяет регулировать скорость конвейера в зависимости от грузопотока на ленте, обеспечить плавность пуска без проскальзывания ленты и исключить ударные нагрузки на привод, рабочий орган и сеть.

Метод регулирования скорости асинхронного двигателя позволяет достичь максимальной и наиболее перспективной экономической эффективности [8, 38, 61].

Система регулирования частоты электропривода для конвейерного транспорта обеспечивает:

- плавный пуск и остановку системы электропривода;
- автоматическую регулировку скорости ленточного конвейера в зависимости от грузопотока на ленте и в соответствии с конкретными характеристиками производства;
- повышение уровня автоматизации механизмов электропривода, системы диагностики, защиты и мониторинга;
- снижение динамических нагрузок в системе электропривода и тягового механизма в рабочих режимах;
- снижение затрат на потери электроэнергии транспортного процесса.

Преобразователи частоты с диодными выпрямителями обычно используются в системах электропривода конвейеров. Данные преобразователи потребляют реактивную мощность от сети питания, вызывая значительные искажения тока и напряжения сети на входе выпрямителя. Когда двигатель работает в рекуперативном режиме, электроэнергия рекуперации не возвращается в сеть, а рассеивается в резисторных элементах преобразователя, что является ограничением применения преобразователя в

системе шахтного лебёточного конвейера. Одним из наиболее эффективных решений, доступных сегодня, является применение ПЧ с активными выпрямителями. В схеме выпрямителя используются полностью управляемые полупроводниковые IGBT-транзисторы. Следовательно, двухступенчатый преобразователь с активным выпрямителем обеспечивает обмен энергии в двух направлениях между источником питания и двигателем, уменьшает гармонические искажения тока, потребляемого от источника питания, и обеспечивает коэффициент мощности равное единице [60].

Следовательно, необходимо разработать электропривод с функцией регулирования частоты для транспортной системы угольной шахты Вьетнама с ПЧ на базе активного выпрямителя.

Управление частотой асинхронного двигателя системы электропривода осуществляется с помощью скалярного, векторного, разрывного и скользящими (система прямого управления моментом) и других алгоритмов управления.

Скалярный метод управления основан на законах частотного управления М.П. Костенко [9, 57, 58, 77]. Метод прост в реализации, но он обеспечивает недостаточно широкое регулирования скорости на диапазоне изменения.

В 1971 г. инженерами фирмы Siemens предложен метод векторного управления, который должен был устранить недостатки скалярного управления. Алгоритмы векторного управления широко описаны в литературе [35, 40]. Система векторного управления обеспечивает независимое регулирование момента на валу двигателя и скорость его вращения. Векторный принцип управления имеет высокую сложность вычислительного алгоритма, который для выполнения качественного регулирования, в соответствии с заданными параметрами, требует точных измерительных и вычислительных операций и увеличивает колебания скорости двигателя на постоянной нагрузке, по сравнению с скалярным управлением [3, 53].

Система прямого управления моментом (DTC – Direct Torque Control) устраняет недостатки рассмотренных методов [39, 83, 84, 90]. Она обеспечивает инвариантность к внешним и параметрическим возмущениям и применяется в электроприводах с тяжелыми условиями эксплуатации.

Преимущества метода прямого управления моментом:

- независимая структура с параметрами ротора, применимая к синхронным и асинхронным двигателям;
- простая реализация работы двигателя без присутствия датчика;
- нет преобразования координат;
- нет контура управления током;
- постоянная частота коммутации;
- выходное униполярное напряжение инвертора.

Электропривод асинхронного двигателя с системой прямого управления моментом обеспечивает выполнения задания на регулирование момента в течение 1-2 мс, в том числе при низких частотах вращения, точность значения скорости вращения на уровне 10% без использования датчика скорости и 0,01% при использовании датчика скорости от значения скольжения асинхронного двигателя [111, 112]. Динамические свойства систем прямого управления моментом позволяют управлять конвейером большой протяженности с существенными колебаниями нагрузки.

Таким образом, система прямого управления позволяет добиться высокого быстродействия в сочетании с большой перегрузочной способностью, что делает этот алгоритм более предпочтительным, по сравнению с другими выше рассмотренными [78, 83].

1.6 Выводы по Главе 1

Существующие в угольной промышленности Вьетнама системы электропривода шахтных ленточных конвейеров на базе асинхронных двигателей не удовлетворяют техническим требованиям по энергосбережению и энергоэффективности.

Необходимо исследовать особенности режимов работы и преимущества преобразователей частоты с активным выпрямителем для конвейерной системы передачи на шахте Маохе, а также других угольных шахт во Вьетнаме. Такие преобразователи обеспечивают коэффициент мощности, близкий к единице, и значения коэффициента искажения синусоидальности напряжения в пределах, установленных в национальных стандартах.

Использование алгоритма прямого управления моментом двигателей обеспечивает регулирование момента при низких частотах вращения и улучшает динамические характеристики конвейера.

ГЛАВА 2 ТИПОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ КОНВЕЙЕРНОГО ТРАНСПОРТА

2.1 Анализ структурной схемы электроприводом конвейера в настоящее время

В настоящее время вьетнамские горнодобывающие предприятия используют множество взрывозащищенных пускателей для управления конвейерными двигателями в угольных шахтах. Чтобы обеспечить плавный пуск и торможение системы электропривода, некоторые горнодобывающие предприятия применяют взрывозащищенные устройства плавного пуска, закупаемые в Китае (рисунок 2.1). Однако использование взрывозащищенных пускателей и устройств плавного пуска с низкой стоимостью, но без возможности регулирования скорости конвейера, не является энергосберегающим и экономически выгодным решением.

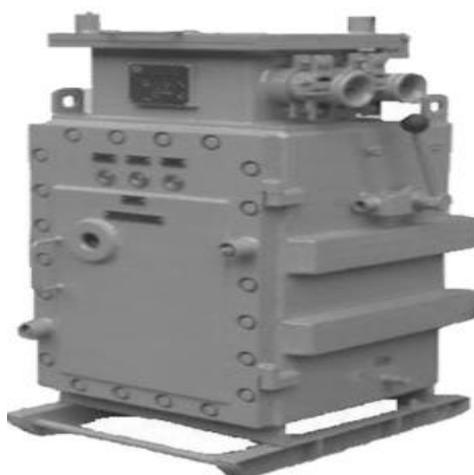


Рисунок 2.1 – Схема устройств плавного пуска взрывозащищенного типа ТКМР

В угольном бассейне Куангнинь во Вьетнаме текущая тенденция направлена на постепенную замену магнитных пускателей на преобразователи частоты, которые, по сравнению с магнитными пускателями, обладают преимуществами в регулирование скорости двигателя и экономии энергии.

В 2020 году институт горной и энергетической механики – ВИНАКОМИН (IEEM) успешно изготовил взрывозащищенный преобразователь частоты VSKINV-Eх-660 номинальной мощностью 45-350 кВт, который находится на стадии испытаний на ряде горнодобывающих предприятий (рисунок 2.2). В структуре устройства используется двухзвенный преобразователь частоты с диодным неуправляемым выпрямителем и транзисторным инвертором.



Рисунок 2.2 – Схема устройств взрывозащищенного ПЧ типа VSKINV-Eх-660

Преобразователь частоты, напрямую подключенный к зажимам двигателя конвейера, обладает преимуществами, которые связаны с простотой его установки, ремонта и замены. Но число таких преобразователей должно быть равно числу работающих двигателей, что увеличивает итоговую стоимость конвейерной системы с увеличением количества ее двигателей. Поэтому необходимо изучить и предложить структуру системы привода инвертора с несколькими подключенными к нему двигателями для повышения энергоэффективности и обеспечения требований к транспортировке угля.

2.2 Анализ двухзвенных преобразователей частоты

Сегодня технология изготовления полупроводниковых приборов активно развивается, создавая на их базе высокопроизводительные преобразователи энергии. Преобразователи частоты имеют высокое качество, очень низкие коммутационные потери, меньшие габариты и более высокую производительность по сравнению с ПЧ с неуправляемым выпрямителем [34, 56].

2.2.1 Двухзвенные преобразователи частоты с диодными выпрямителями

В настоящее время, преобразователи частоты с неуправляемыми выпрямителями-инверторами (двухзвенные преобразователи частоты на основе АИН) интенсивно изучаются [30, 36]. Принципиальная схема такого преобразователя приведена на рисунке 2.3. Простая схема преобразователя частоты с диодным выпрямителем и инвертором имеет 6 управляемых ключей, которые обычно используются для регулировки частоты электропривода. Вход преобразователя частоты питается от промышленных сетей.

На рисунке 2.3 видно, что преобразование частоты осуществляется в два этапа: на первом этапе напряжение сети выпрямляется диодами VD1 ... VD6, а затем на втором этапе выпрямленное постоянное напряжение на входе инвертора преобразуется в напряжение с переменной частотой. Посредством методов модуляции осуществляется управление коммутацией ключей VT1 ... VT6, в результате которой на выходе инвертора формируется напряжение переменной частоты. Выходной ток на нагрузке будет иметь синусоидальную форму [26, 62, 66].

В преобразователе частоты, показанном на рисунке 2.3 и 2.4, конденсатор большой емкости C1 является важным компонентом в промежуточном звене. Он необходим для выравнивания пульсаций напряжения на выходе выпрямителя, а также является накопителем энергии при работе двигателя в режиме генератора [26, 62]. Благодаря использованию диодного выпрямителя обмен энергией происходит только в одном направлении: от сети к двигателю. Когда происходит процесс рекуперации энергии, она проходит через рассеивающее сопротивление (R1) последовательно включенное с транзисторным ключом VT7.

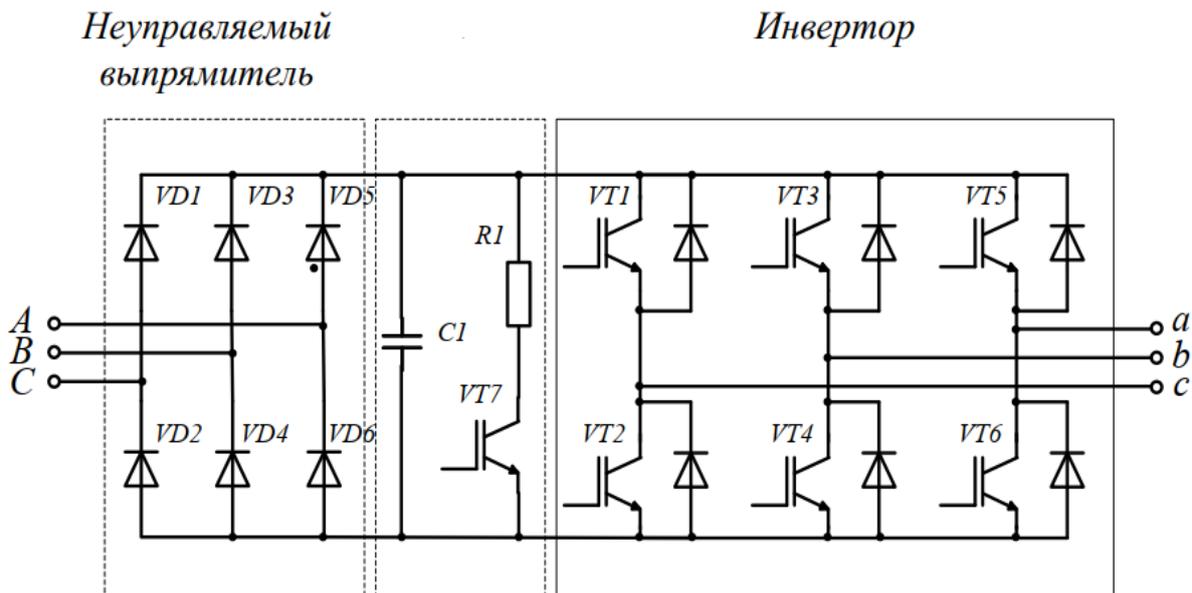


Рисунок 2.3 – Преобразователь с диодным выпрямителем

Частота на выходе ДПЧ колеблется в широком диапазоне. Благодаря техническим характеристикам ключей, ДПЧ может иметь максимальный предел частоты в диапазоне 15-20 килогерц. Данный преобразователь частоты использует диодный выпрямитель, поэтому существуют некоторые недостатки, такие как искажение напряжения и тока в питающей сети. Гармонические составляющие тока на входе ДПЧ включают в себя

канонические гармоники, начиная с пятой (т.е. 5-ая, 7-ая, 11-ая и т.д. гармоники). Они приводят к дополнительным потерям мощности в сети [5].

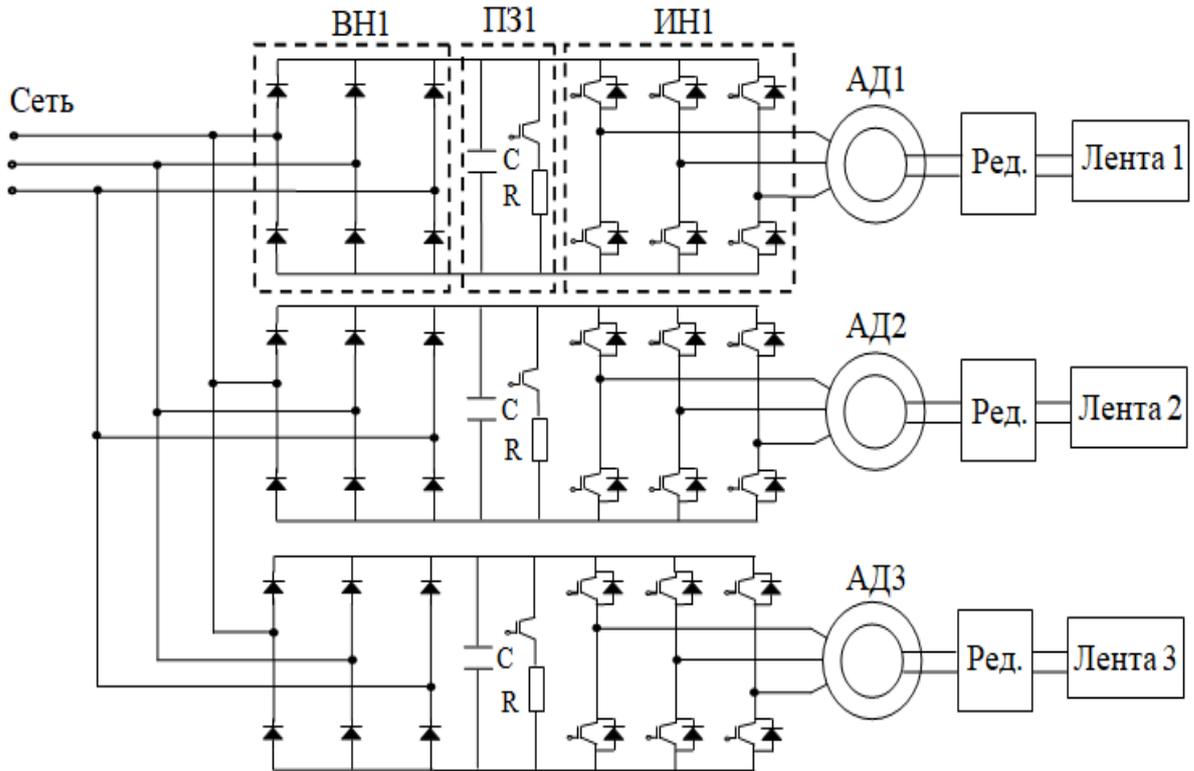


Рисунок 2.4 – Схема электропривода с диодным выпрямителем: ВН1 – выпрямитель напряжения; ПЗ1 – промежуточное звено постоянного напряжения; ИН1 – инвертор напряжения; АД1, АД2, АД3 – асинхронный двигатель; Ред. – Редуктор

Наличие высших гармоник тока и напряжения влияет на работу электрооборудования в сети. Следовательно, они являются причиной, которая существенно ограничивает использование ПЧ на практике.

В настоящее время проводятся исследования для обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) ПЧ с питающей сетью путем использования разных методов модуляции для управления ключами инвертора или использования методов модуляции для управления выпрямителем. Для улучшения формы напряжения на выходе ПЧ производитель может добавить в устройство индуктивно-емкостные (синусные) фильтры. Но это увеличит стоимость и габаритные размеры ПЧ. Для улучшения качества питания сети и соответствия требованиям ЭМС был использован ряд методов, таких как установка фильтра на входе ПЧ; индуктивность в цепи постоянного тока; использование многоимпульсного выпрямителя на входе ПЧ; использование ПЧ с активным выпрямителем или с активным фильтром высших гармоник.

2.2.2 Анализ методов уменьшения гармонических искажений ПЧ

2.2.2.1 Анализ влияния электроприводов преобразователей частоты

Полупроводниковая электроника имеет нелинейные характеристики. Они являются причиной появления гармонических несинусоидальных токов в сетях питания и вызывают потери напряжения в элементах сети [29, 37]. Высшие гармоники тока и напряжения снижают энергоэффективность и надежность работы электрооборудования сети. В зависимости от спектра, величины и продолжительности протекания гармоник по элементам системы электроснабжения оцениваются уровни дополнительных потерь в двигателях, уровень их вибраций, тепловое и электрическое старение изоляции электрооборудования, которое приводит к их преждевременному выходу из строя [29, 37, 67].

Необходимо рассмотреть влияние нелинейных искажений системы регулирования частоты асинхронного двигателя на сеть, и в то же время предлагать методы для повышения электромагнитной совместимости электропривода с сетью и другим электрооборудованием во время работы.

Определение суммарного коэффициента гармонических искажений напряжения основано на стандартах МЭК 61000-2-2 и IEEE 519-1992 и рассчитывается по следующей формуле 2.1 [57, 58]:

$$THD_u = K_u = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{40} U_n^2}{U_1^2}}, \quad (2.1)$$

где U_n – эффективное значение напряжения высших гармоник, U_1 – эффективное значение базового напряжения.

Суммарный коэффициент гармонических искажений тока определяется по следующей формуле 2.2 [56]:

$$THD_i = K_i = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{40} I_n^2}{I_1^2}}, \quad (2.2)$$

где I_n – эффективное значение тока высших гармоник, I_1 – эффективное значение базового тока.

Частотные преобразователи с неуправляемыми выпрямителями в системах электропривода асинхронных двигателей в результате дискретного управления потоками энергии генерируют в сеть интергармонических, субгармонических

составляющие и радиопомехи, влияющие как на работу ПЧ, так и самой сети [2, 6]. Электропривод с частотным управлением является крупным потребителем реактивной мощности, что приводит к снижению общего коэффициента мощности электрической сети [7, 10].

2.2.2.2 Методы многоимпульсного выпрямителя преобразователей частоты

Система электропривода с преобразователем частоты для управления скоростью двигателя состоит из трех основных частей: выпрямителя, конденсатора постоянного тока (DC) и инвертора. Выходное напряжение (DC) выпрямителя должно быть как можно более волнистым, поэтому большой конденсатор действует как фильтр на стороне постоянного тока. Этот конденсатор заряжается до значения, близкого к пиковому значению входного напряжения переменного тока. В результате ток, проходящий через выпрямитель, очень велик, почти равен пиковому току входного переменного напряжения и является прерывистым. Получается, что выпрямители будут генерировать более искаженный ток. Этот ток имеет нелинейную форму, которая деформирует источник питания переменного тока, вызывая проблемы как в двигатели, так и в другом электрическом оборудовании. Чем больше мощность выпрямителя, тем выше уровень искажений.

Таким образом, необходимы исследования по снижению коэффициента суммарных гармонических искажений THD для преобразователя частоты с диодным выпрямителем. Одним из известных текущих решений является использование схемы многоимпульсного выпрямителя, в которой используется фазосдвигающий трансформатор [23, 95].

Базовый выпрямитель имеет 6-импульсную форму, а для создания многоимпульсного выпрямителя требуется однородный сдвиг фазы, соответствующий схеме с 12, 18, 24 и более импульсами. Повышение эффективности многоимпульсного выпрямителя достигается за счет уменьшения общего гармонического искажения в питающем токе, уменьшения пульсаций напряжения постоянного тока и коэффициента искажения.

Многоимпульсный метод можно использовать с несколькими выпрямителями, объединенными вместе. Гармоники, генерируемые этим выпрямителем, будут компенсироваться гармониками, генерируемыми в других выпрямителях. Этим методом могут быть устранены определенные гармоники, связанные с величиной импульсности

многоимпульсного выпрямителя. Уменьшение высших гармоник входного переменного тока имеет важное значение, поскольку работа преобразователя частоты влияет на электрическую систему.

Шестиимпульсный выпрямитель является источником гармонических искажений, поэтому для уменьшения THD системы электропривода с функцией регулировки частоты можно использовать схемы 12, 18, 24 импульсных выпрямителей. 12-импульсный выпрямитель состоит из двух параллельных 6-импульсных выпрямителей (12-диодная схема), соединенные через две вторичные обмотки сетевого трансформатора, которые создают угол сдвига фаз между выпрямителями равный 30 градусом, что позволяет устранить 5-ю, 7-ю гармоники входного тока (рисунок 2.5).

То же самое касается 18-импульсного выпрямителя с использованием трех 6-импульсных выпрямителей (18 диодов) и многофазного трансформатора с одной первичной обмоткой и тремя вторичными обмотками, создающими угол сдвига фаз равный 20 градусом. Это устраняет 5-ю, 7-ю, 11-ю и 13-ю гармоники входного тока [95].

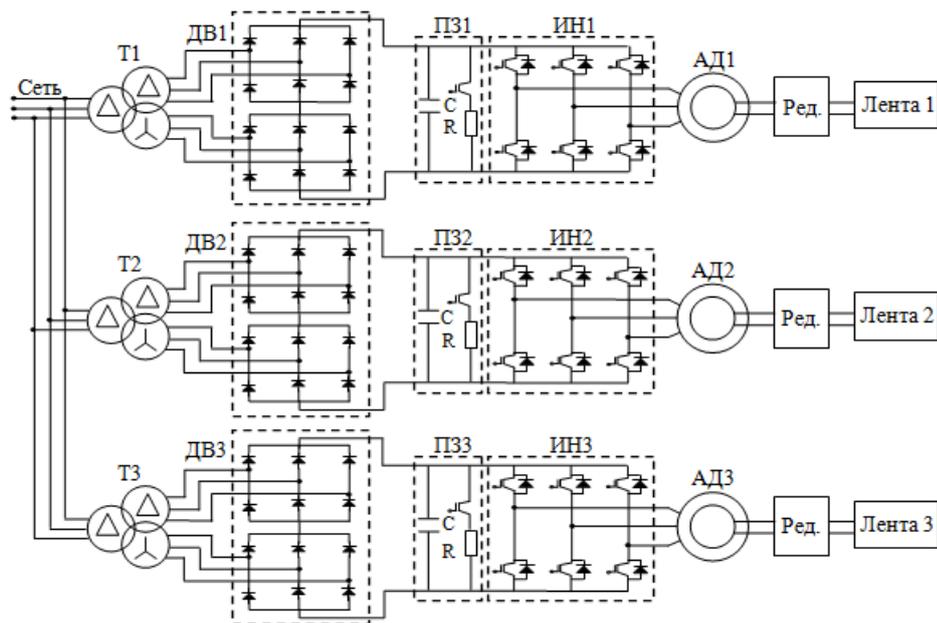


Рисунок 2.5 – Схема электропривода с 12-пульсным выпрямителем и асинхронными двигателями: Т1, Т2, Т3 – трансформаторы; ДВ1, ДВ2, ДВ3 – схема 12-импульсного выпрямителя; ПЗ1, ПЗ2, ПЗ3 – промежуточное звено постоянного напряжения; ИН1, ИН2, ИН3 – инверторы напряжения; АД1, АД2, АД3 – асинхронные двигатели; Ред. – редуктор

В настоящее время изучаются и применяются на практике более сложные многоимпульсные выпрямители, имеющие 18, 24, 36, 48 или 60 диодов. Однако,

недостатками этих выпрямительных систем являются более сложные технические характеристики трансформаторов, большие габариты преобразователей частоты, их высокая стоимость и сложность технического обслуживания. Особенно это актуально при использовании систем электропривода в подземных шахтах Вьетнама. В них такие схемы не применимы из-за сложных условий работы, что приводит к увеличению затрат на эксплуатацию таких многоимпульсных преобразователей.

2.2.2.3 Анализ методов фильтрации гармоник

В настоящее время, в системах электроприводов конвейерных лент шахты Маохе используются только пассивные фильтры, установленные на входе ПЧ (рисунок 2.6). Их преимущества - простота в изготовлении и в техническом обслуживании и возможность компенсации реактивной мощности. Однако, пассивные фильтры не могут полностью компенсировать все высшие гармоники из-за параметров сопротивлений реакторов и конденсаторов, поскольку они могут быть настроены только на компенсацию определенного выбранного спектра высших гармоник (рисунок 2.6). Пассивные фильтры имеют сложный процесс настройки, который требует точного анализа гармонических составляющих нагрузки. Пассивные фильтры имеют большой габаритный размер по сравнению с активным фильтром и их характеристики зависят от параметров сети.

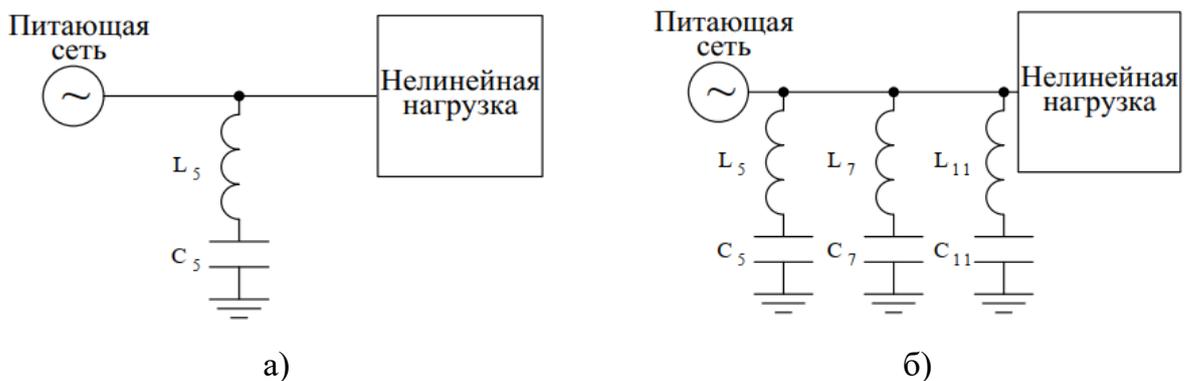


Рисунок 2.6 – Структура пассивного фильтра с заданием компенсации: а) – 5-й гармоника; б) – 5-й, 7-й, 11-й гармоник

С развитием полупроводниковых технологий были созданы транзисторы DSP, IGBT и MOSFET, работающие на высоких частотах, характеристики которых подходят для разработки активного фильтра гармоник электроэнергии (АФЭ) [34, 56, 108].

АФЭ может компенсировать большинство гармонических составляющих и реактивную мощность, потребляемые от питающей сети. АФЭ подает реактивную

мощность в сеть, когда это необходимо, устраняет резонанс в сети и позволяет производить балансировку несимметричной нагрузки.

Таким образом, АФЭ лишен всех недостатков пассивных фильтров и является наиболее эффективным устройством [1, 2, 6]. Выделяют параллельную, последовательную, параллельно-последовательную и гибридную структурные схемы подключения АФЭ к электросети: [22, 51, 81, 82].

Параллельный активный фильтр (ПАФЭ) подключается параллельно нелинейной нагрузке и в точке подключения к сети может полностью компенсировать весь спектр высших гармоник тока, в результате будет формировать ток, наиболее близкий к синусоидальному (рисунок 2.7 а) [1, 41]. Кроме того, ПАФЭ компенсирует реактивную мощность, потребляемую нелинейными нагрузками от сети.

Последовательный АФЭ подключается последовательно с нелинейной нагрузке и в точке подключения к сети может полностью компенсировать высших гармоник напряжения, а также колебаний, провалов, скачков и несимметрию напряжения сети (рисунок 2.7 б) [41, 42]. Он генерирует мгновенное напряжение на выходе инвертора, имеющее амплитуду, равную амплитуде искаженного входного напряжения, но обратную по фазе. Посредством такой компенсации синусоидальное напряжение подается на вход нелинейной нагрузки. Таким образом, последовательный АФЭ является фильтром для защиты нагрузки от искажений и провалов низковольтного напряжения сети.

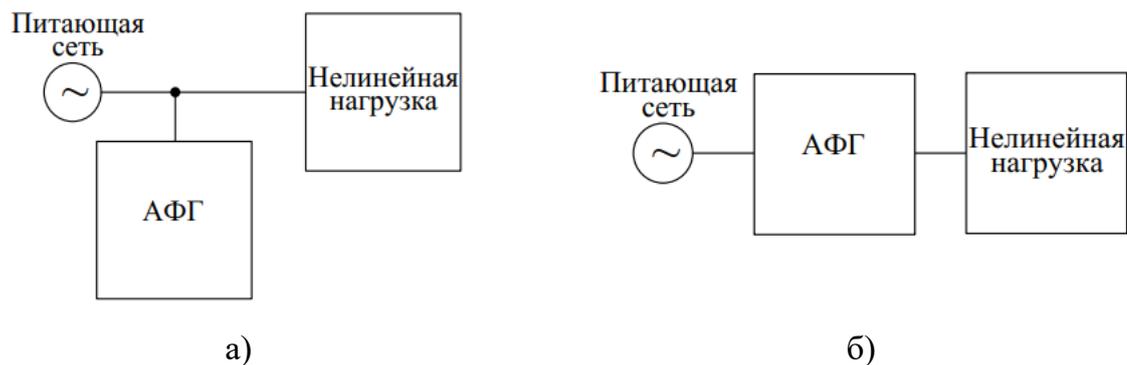


Рисунок 2.7 – Структурная схема АФЭ: а) Параллельный; б) последовательный

Параллельно-последовательный АФЭ сочетает в себе свойства параллельного и последовательного активного фильтра (рисунок 2.8) [42, 43]. Поэтому он будет компенсировать гармоники напряжения и тока на входе нелинейной нагрузки. Параллельно-последовательный АФЭ – это лучший и наиболее качественный активный

фильтр. Он гарантирует как защиту потребителя электроэнергии от негативного воздействия сети, так и защищает питающую сеть от негативного гармонического воздействия и влияния реактивной мощности потребителя электроэнергии.

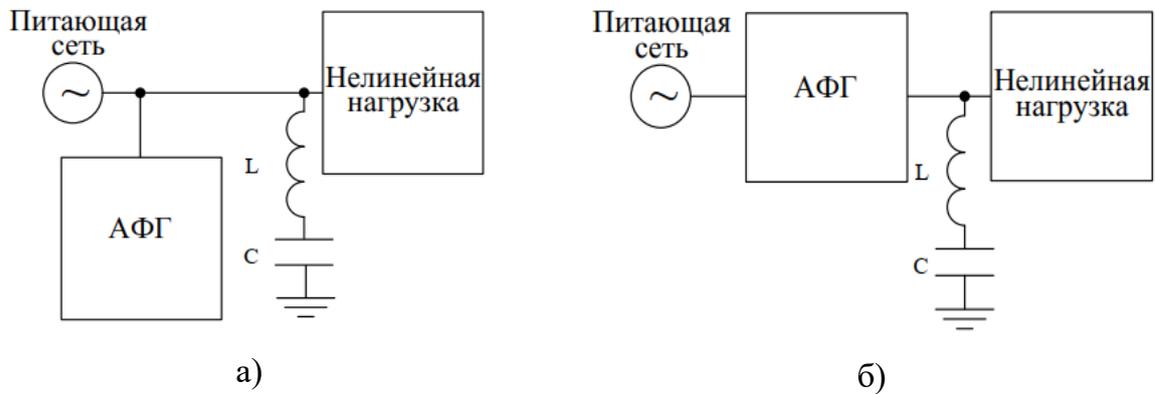


Рисунок 2.8 – Структурная схема гибридного пассивно-активного ФЭ:

а) – параллельного; б) – последовательного

Как правило, возможно уменьшить нелинейные искажения напряжения через компенсацию высших гармоник тока с помощью ПАФЭ, поскольку гармоники тока вызывают падения напряжения на элементах системы и тем самым увеличивают искажения формы напряжения сети на рисунке 2.9 [29].

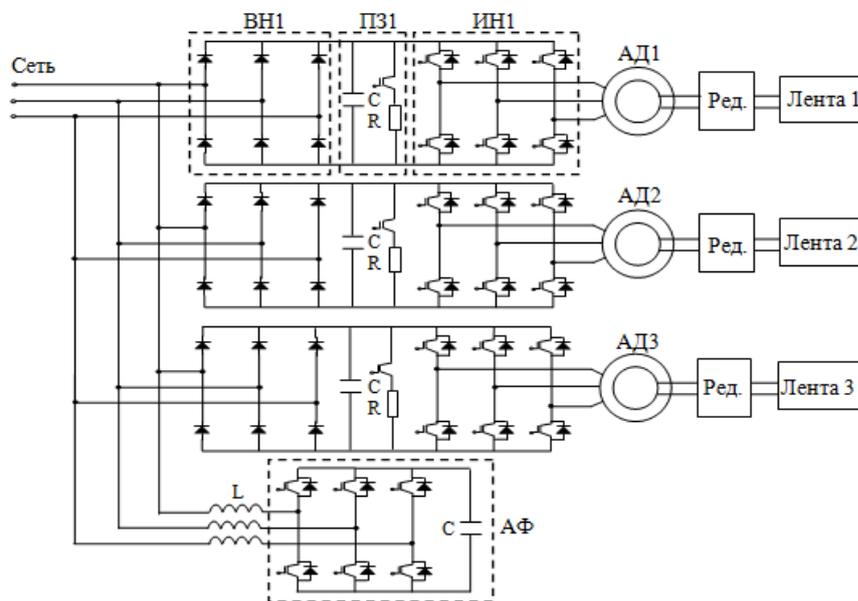


Рисунок 2.9 – Схема электропривода конвейера с активным фильтром

ПАФЭ – АИН на основе полностью управляемых IGBT-транзисторов, присоединяемая к сети через индуктивности, имеющая на стороне постоянного тока конденсаторную батарею и управляемая с помощью системы управления на основе данных с датчиками тока и напряжения (рисунок 2.10). Конденсатор накапливает

энергию в звене постоянного тока, индуктивность предохраняет IGBT-транзисторы от перенапряжений и обеспечивает заряд конденсаторов АИН ПАФЭ на напряжение выше, чем средневывпрямленное напряжение мостового выпрямителя за счет создания на ней ЭДС самоиндукции при переключении силовых ключей транзисторов.

Активные фильтры включают в себя активные выпрямители (на базе IGBT-транзисторов) и датчики измерения напряжения и тока. Согласно теории мгновенной мощности p - q автора Акаги, в электрической системе мгновенную мощность p и мгновенную реактивную мощность q нагрузки можно разделить на две составляющие: компоненту (\bar{p}, \bar{q}) соответствующую основной частоте тока нагрузки, и осциллирующую компоненту (\check{p}, \check{q}) , соответствующую гармонической волне высокого порядка. Теория мгновенной мощности p - q позволяет выбирать сигналы нужной частоты, что является основой для разработки активных фильтров.

На рисунке 2.10, приняты следующие обозначения: u_s – фазное напряжение сети; i_s – фазный ток сети; DT_S – датчик фазного тока сети; L_F – индуктивность реактора источника; DT_F – датчик фазного тока для компенсации; DT_L – датчик фазного тока нагрузки; i_c – фазный ток для компенсации; i_L – фазный ток нагрузки; ФВЧ – фильтр верхних частот; АВН – активный выпрямитель напряжения; PI – регулятор напряжения постоянного тока для компенсации потери мощности p_0 .

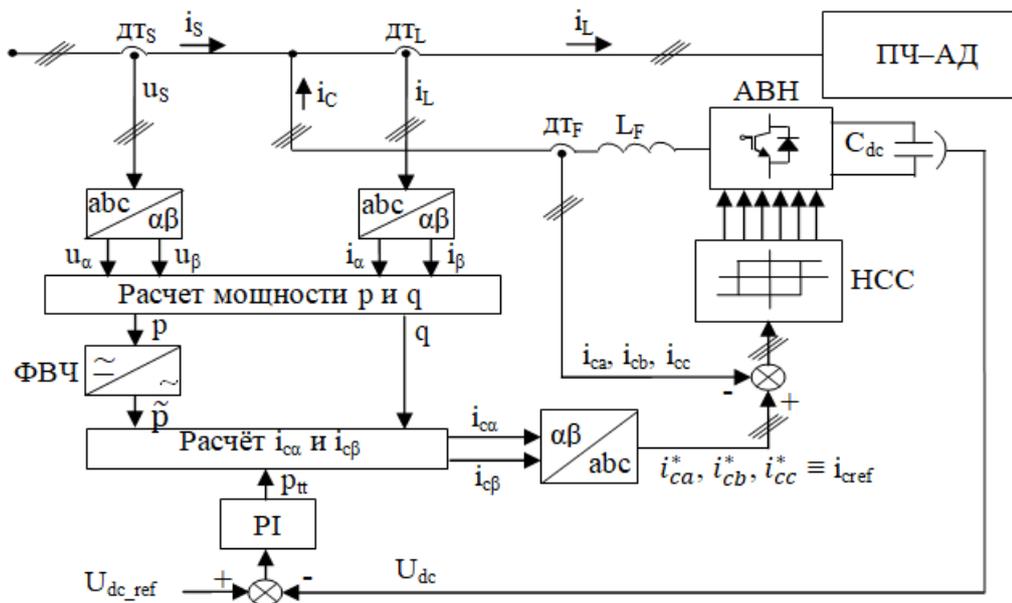


Рисунок 2.10 – Структура управления активным фильтром (АФ)

Структура управления АФ, как показано на рисунке 2.10, трехфазной электрической системой с изолируемым нулевым проводником, в которой компонента

тока i_0 не существует, удовлетворяет условию $i_a+i_b+i_c=0$. Ток нагрузки $i_L = [i_{La} \ i_{Lb} \ i_{Lc}]^T$ и напряжения источника $u_s = [u_a \ u_b \ u_c]^T$ преобразуется в систему координат $\alpha\beta$ путем преобразования Кларка по выражениям (2.3) – (2.4):

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Уравнения (2.3) и (2.4) определяют суммарную мгновенную мощность нагрузки в системе координат $\alpha\beta$ по выражению (2.5):

$$\begin{aligned} S &= u \cdot i^* = (u_\alpha + ju_\beta) \cdot (i_\alpha - ji_\beta) \\ S &= (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta) + j(u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таким образом, мгновенная активная мощность и реактивная мощность определяются выражениями (2.6) – (2.7):

$$p = u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.6)$$

$$q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.7)$$

Уравнения (2.6) и (2.7) будут вычислять i_α , i_β следующим образом уравнения (2.8) – (2.9):

$$i_\alpha = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (p \cdot u_\alpha + q \cdot u_\beta) \quad (2.8)$$

$$i_\beta = \frac{1}{u_\alpha^2 + u_\beta^2} (p \cdot u_\beta - q \cdot u_\alpha) \quad (2.9)$$

Активный фильтр обеспечивает необходимые значения составляющей мощности переменного тока \tilde{p} от значения p и реактивной мощности q , включая составляющие \bar{q} и \tilde{q} . Кроме того, напряжение на конденсаторе является нестабильным, поэтому, чтобы обеспечить постоянное напряжение на конденсаторе, источник питания должен обеспечивать необходимый уровень мощности p_0 фильтра.

АФ создает составляющие мощности p_{AF} и q_{AF} в сети, определяемые по формуле (2.10) – (2.11):

$$p_{AF} = \bar{p} - \bar{p} - \tilde{p} + p_0 = -\tilde{p} + p_0 \quad (2.10)$$

$$q_{A\Phi} = -\bar{q} - \tilde{q} \quad (2.11)$$

Из формул (2.8) – (2.11) рассчитывается ток компенсации следующим образом (2.12) – (2.13):

$$i_{c\alpha} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} (p_{A\Phi} \cdot u_{\alpha} + q_{A\Phi} \cdot u_{\beta}) \quad (2.12)$$

$$i_{c\beta} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} (p_{A\Phi} \cdot u_{\beta} - q_{A\Phi} \cdot u_{\alpha}) \quad (2.13)$$

Из формул (2.8) - (2.13) видно, что ток сети в системе координат $\alpha\beta$ будет повторно проверен, когда будет произведена компенсация, и в результате будет получен только основной компонент гармонической волны ($i_s = i_L + i_c$) выражения (2.14) – (2.15):

$$i_{s\alpha} = i_{c\alpha} + i_{\alpha} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} (\bar{p} + p_0) \cdot u_{\alpha} \quad (2.14)$$

$$i_{s\beta} = i_{c\beta} + i_{\beta} = \frac{1}{u_{\alpha}^2 + u_{\beta}^2} (\bar{p} + p_0) \cdot u_{\beta} \quad (2.15)$$

Уравнения (2.14) и (2.15) вычисляют необходимый ток компенсации в системе координат $\alpha\beta$ с двумя функциями фильтрации гармоник и компенсации реактивной мощности. Компенсационный ток в системе координаты $\alpha\beta$, который был рассчитан по формулам (2.3), (2.4), (2.12) и (2.13), преобразуется в компенсационный ток трехфазной системы через обратное преобразование координат abc выражение (2.16):

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = i_{cref} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Таким образом, алгоритм управления активным фильтром, основанный на теории мгновенной мощности $p-q$, рассчитывает требуемый ток компенсации, чтобы установить его значение для внутреннего контура. Внутренний контур управляет активным фильтром для создания мгновенного тока компенсации, уравнивает гармонические токи, генерируемые нагрузкой. Однако, при использовании преобразователей частоты в сочетании с пассивными фильтрами, увеличиваются размеры устройства, возрастает стоимость и усложняется конструкция фильтра высших гармоник [23]. Мощность системы велика и управление фильтром будет затруднено.

Преобразователи частоты с диодными выпрямителями позволяют энергии двигаться только в одном направлении и ими невозможно управлять. Поэтому

необходимо исследовать и разработать преобразователи частоты, подходящие для экономических и технических условий горнодобывающих предприятий Вьетнама.

2.2.3 Двухзвенные преобразователи частоты с активными выпрямителями

Использование фильтров высших гармоник или использование дросселя в звене постоянного тока преобразователя частоты ограничивает уровень высших гармоник, влияющих на питающую сеть. Эти методы ограничения гармоник обычно применяются к частотным преобразователям низкой или средней мощности. Для преобразователей частоты большой мощности требуются фильтры большего размера, иногда эквивалентные размеру преобразователя. Это делает их установку сложной и дорогостоящей. Недостатки преобразователя частоты ДПЧ с неуправляемым выпрямителем будут решены при использовании активного выпрямителя, как показано на рисунке 2.11. В ДПЧ с неуправляемым выпрямителем энергия обменивается в одном направлении от напряжения источника через мостовой выпрямитель (VT1...VT6), затем через промежуточное звено в одном направлении с конденсатором С и затем подается на схему инвертора (VT8 ... VT13). Её выход вырабатывает напряжение, которое имеет переменную частоту. Этот преобразователь работает с необходимым входным фильтром [5, 66]. Для преобразователей с активными выпрямителями, управляемыми методом широтно-импульсной модуляции, генерируемый на входе ток по форме близок к синусоидальной, энергия обменивается в двух направлениях и коэффициент мощности очень высокий, близкий к 1 [12, 62].

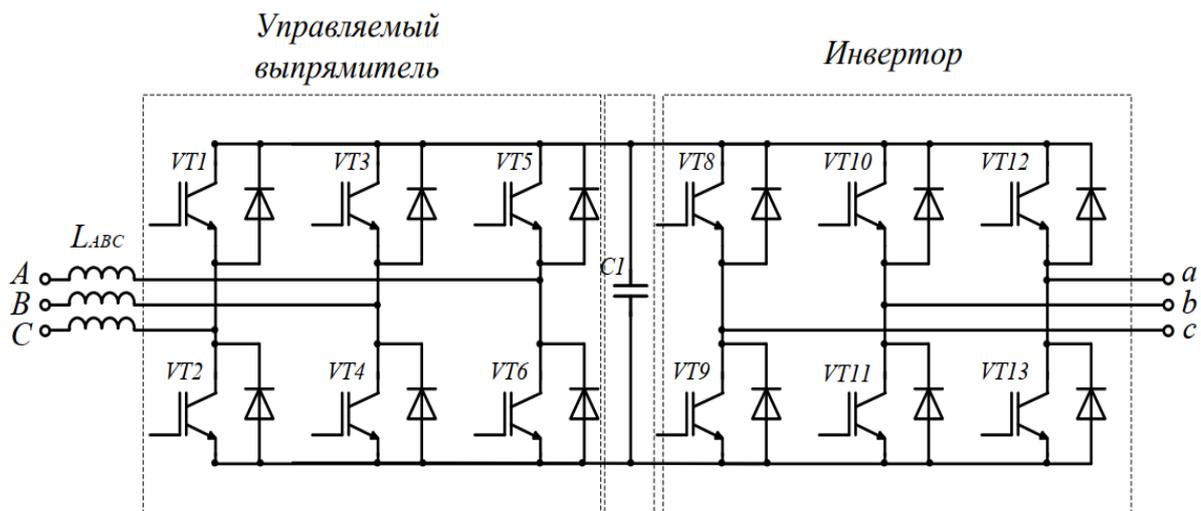


Рисунок 2.11 – Преобразователь с активным выпрямителем

Преобразователи с активными выпрямителями часто используются в приводах большой мощности, работающих в режиме динамического торможения, поскольку это

приводит к повышению КПД установки и коэффициента мощности на стороне питающей сети. Кроме того, эти преобразователи не требуют установки сопротивлений рассеивания поэтому их размеры компактны [62].

Активный выпрямитель напряжения (АВН) работает с высокой частотой коммутации ключей за счет использования IGBT-транзисторов.

АИН – автономный инвертор напряжения, выполненный на базе коммутационных ключей и обратных диодов и имеющий возможность двунаправленного обмена энергией между двигателем и сетью. АВН работает по принципу повышения напряжения, поэтому на входе выпрямителя необходимо устанавливать токоограничивающий дроссель. Чтобы осуществить обмен реактивной мощностью между сетью и АВН, в звене постоянного тока используют фильтрующий конденсатор.

2.3 Анализ использования преобразователей частоты многодвигательных электроприводов

2.3.1 Преобразователи частоты многодвигательных электроприводов с диодными выпрямителями

В настоящее время в промышленности, системы электропривода, в основном, состоят из асинхронных двигателей, управляемые через преобразователи частоты. Асинхронные двигатели, имеющие низкую стоимость, просты в изготовлении, надежны в работе, имеют простое регулирование скорости и электромагнитного момента [11, 72].

В конкретной системе электропривода, состоящей из асинхронных двигателей, необходимо изучить их комбинацию с одним или несколькими преобразователями частоты для обеспечения требований к качеству электроэнергии и надежности режимов работы. Для системы электропривода, состоящей из нескольких двигателей, работающих под нагрузкой, необходимо обеспечить согласование значений момента в каждом двигателе. Изменение момента одного из двигателей системы электропривода приводит к изменению общего момента электропривода.

В частности, двигатели в системе электропривода имеют различные рабочие условия, такие как условия охлаждения, которые также влияют на работу системы с несколькими двигателями [72].

Фактически, система многодвигательного электропривода с регулированием частоты имеет две структурные схемы, как показано на рисунке 2.12.

В системах (рисунок 2.12 а) используется индивидуальный ПЧ для каждого двигателя, которым можно управлять любым известным способом. Преимущество этой системы заключается в простоте установки и обслуживании каждого устройства (двигателей, ПЧ), но имеет такие недостатки, как: необходимость установки нескольких ПЧ, равных количеству двигателей, что обуславливает высокую стоимость, а в некоторых применениях требуется ещё и большое пространство для компоновки.

Для систем, использующих ПЧ с несколькими АД, как показано на рисунке 2.12 б, асинхронные двигатели соединены не только электрически, но иногда и механически. Эта система имеет такие преимущества, как компактность и пониженную себестоимость, по сравнению с индивидуальным подключением двигателя к ПЧ. Но недостатком такой системы является то, что параметры каждого двигателя не могут быть изменены без согласования с другим двигателем, так что ими невозможно управлять по отдельности.

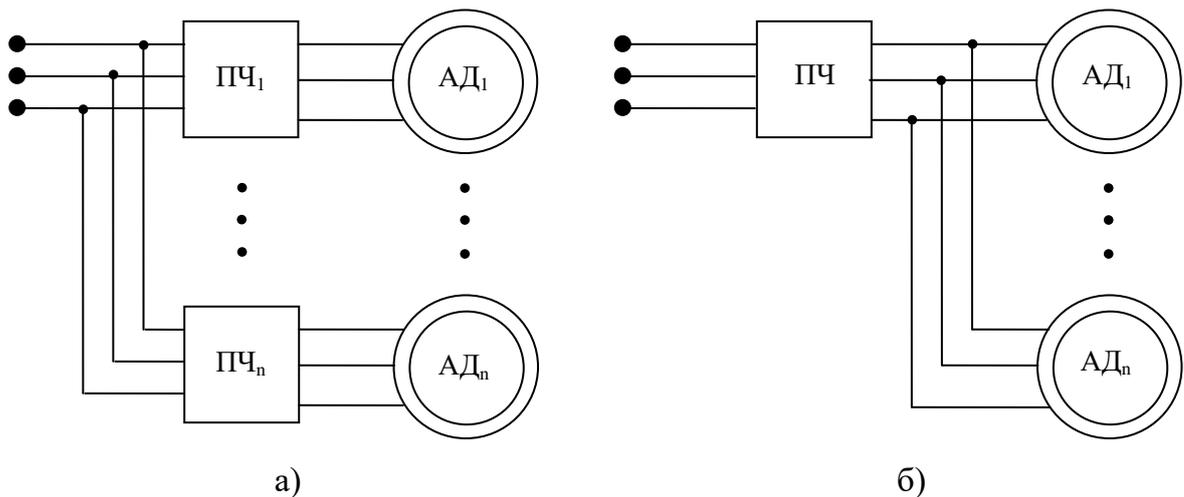


Рисунок 2.12 – Способ подключения многодвигательного асинхронного электропривода: а) индивидуальный; б) групповой

Таким образом, использование структурной схемы многодвигательного асинхронного электропривода в ПЧ (рисунок 2.12 и рисунок 2.13) имеет много недостатков, связанных с работой неуправляемых выпрямителей в схеме преобразователей частоты.

Преобразователь частоты с выпрямительными диодами имеет низкий уровень электромагнитной совместимости с сетью электропитания, генерируют высокие значения гармонических составляющих тока и напряжения в сеть, обладают низким

коэффициентом мощности и осуществляют обмен электроэнергией только в одном направлении.

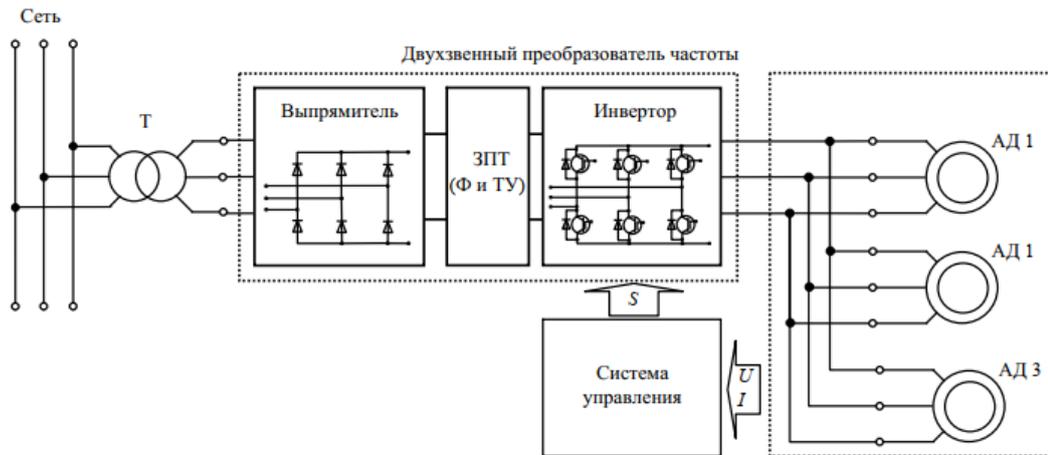


Рисунок 2.13 – Структурная схема многодвигательного электропривода в ПЧ

2.3.2 Преобразователи частоты многодвигательных электроприводов с активным выпрямителем

Из-за недостатков системы многодвигательного электропривода, использующей ПЧ с неуправляемым выпрямителем, необходимо исследовать и разработать ПЧ с высокими показателями электромагнитной совместимости (ЭМС) и энергосбережения [11, 13-16, 72]. Энергетические требования ЭМС, предъявляемые к системам многодвигательного электропривода (МДЭ), соблюдаются, если входной ток и напряжение имеют синусоидальную форму, коэффициент мощности сети близок к 1 и гарантируется обмен энергией в двух направлениях. Для обеспечения ЭМС в работе предлагается использовать ПЧ с активным выпрямителем.

Управление полупроводниковыми ключами активных выпрямителей и автономных инверторов на основе широтно-импульсной и пространственно-векторной модуляции снижает содержание высших гармоник тока и напряжения в источнике переменного тока. Это повышает эффективность фильтрации высших гармоник и обеспечивает синусоидальную форму входного тока сети. Значения индуктивности и активного сопротивления сетевого дросселя и изменение амплитуда фазового угла напряжения сети определяют фазовый угол потребляемого тока. С помощью метода управления активным выпрямителем, на основе параметров основных гармоник напряжения в сети, возможно поддержание заданного фазового угла и коэффициента мощности равного единице. Система многодвигательного электропривода с преобразователем частоты с активным выпрямителем обеспечивает отдельное

управление каждым асинхронным двигателем. Это называется многоинверторным преобразователем частоты, как показано на рисунке 2.14. Каждый автономный инвертор подает напряжение и частоту на обмотки статора подключенного к нему асинхронного двигателя и может использовать любые существующие методы управления скорости и момента двигателя.

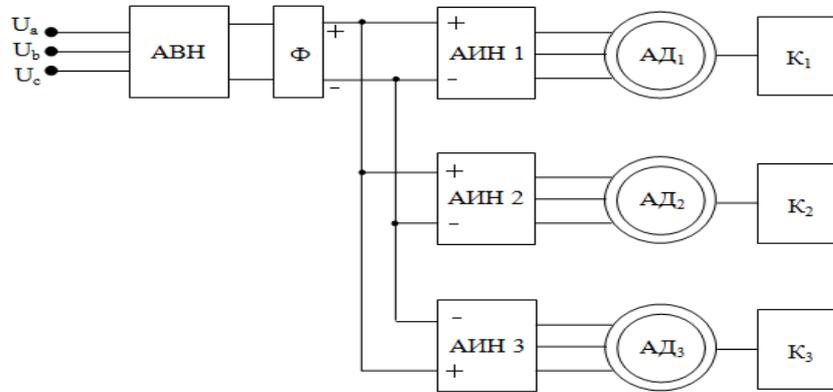


Рисунок 2.14 – Структурная схема электропривода магистральной конвейерной линии с многоинверторным ПЧ с АВН: $K_{1,2,3}$ – 1-й, 2-й, 3-й конвейер

Таким образом, рассмотренная выше система электропривода будет обеспечивать ЭМС для каждого двигателя и для системы электропривода в целом. Преимущество этой системы заключается в обеспечении требований электромагнитной совместимости, подходящих для систем с группами двигателей, работающих параллельно на один АВН. Также достигается экономия затрат при использовании цепи только одного активного выпрямителя. Таким образом, показанные преимущества схемы СМЭ с многоинверторным ПЧ, по сравнению с другими рассмотренными выше решениями, позволяют сделать вывод, что такой ПЧ должен применяться в системе передачи электроэнергии на угольных шахтах Вьетнама.

Силовые клеммы «+», «-» преобразователя обычно выведены наружу, что позволяет объединять звенья постоянного тока нескольких ПЧ. Тогда от одного из общих выпрямителей может одновременно питаться несколько инверторов (рисунок 2.14). При этом возможна передача энергии торможения от одного АИН к другому или обратно в сеть питания, и поэтому тормозной резистор не нужен. Другое преимущество этой схемы состоит в том, что она подходит для систем электропривода конвейерных лент, работающих с наклоном ($\beta > 0$ или $\beta < 0$), где двигатели работают в двигательном режиме, но иногда в течение короткого времени работают в режиме рекуперации энергии.

2.4 Системы управления асинхронными двигателями

2.4.1 Обзор методов управления асинхронными двигателями

В настоящее время в подземных угольных шахтах Вьетнама в электродвигателях конвейера в основном их скорость регулируется с помощью оператора без систем обратной связи по скорости. Такая система управления скоростью электропривода является открытой системой управление преобразователем частоты методом U/f регулирования. Общее направление развития систем автоматического управления представляет собой стремление к упрощению алгоритмов и переход к табличному логическому алгоритму, заложенному в память и обеспечивающему оптимальное регулирование выходных параметров с заданной степенью точности в зависимости от задания и условий работы [39]. Одним из новейших алгоритмов, построенным по этим принципам, является метод прямого управлением моментом. Анализ технических характеристик системы электропривода переменной частоты, который основан на методах управления асинхронным двигателем описан в [39, 76] и приведен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Технические характеристики системы электропривода с каждым алгоритмом управления САУ, (ДС – датчик скорости) [39, 76]

Характеристика	Скалярное управление		Векторное управление		управление DTC	
	Без ДС	С ДС	Без ДС	С ДС	Без ДС	С ДС
Диапазон регулирования	1:10	1:50	1:100	1:1000	1:1000	1:1000
Точность поддержания скорости, %	5,0	0,02	0,2	0,02	0,1	0,01
Точность поддержания момента, %	10,0	6,0	5,0	4,0	1,0	0,1
Максимальный пусковой момент, %	100	150	150	150	200	200
Возможность поддержания нулевой скорости	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Да

трех значений -1, 0 и 1. Если $C_{Me} = 1$, рассчитанное значение момента меньше заданного значения. Когда $C_{Me} = -1$, фактический момент двигателя больше заданного значения. На выходе регулятора потока двигателя присутствует одно из значений 1 и 0. Если $C_{\Psi_s} = 1$, рассчитанное значение потока меньше заданного значения. Когда $C_{\Psi_s} = -1$, фактический потока двигателя больше заданного значения.

Для управления автономным инвертором необходимо построить таблицу коммутации ключей. Через таблицу коммутации будет выбираться соответствующий вектор управления инвертором, то есть происходить регулировка потока и электромагнитного момента двигателя в соответствии с желаемым значением.

Переключения автономного инвертора будут регулировать положение вектора потока (Ψ_s) и напряжение статора [112]. Следовательно, можно создать таблицу коммутации ключей с 8 векторами напряжения (U_0-U_7), представленными в системе координат ($\alpha - \beta$), как показано на рисунке 2.16.

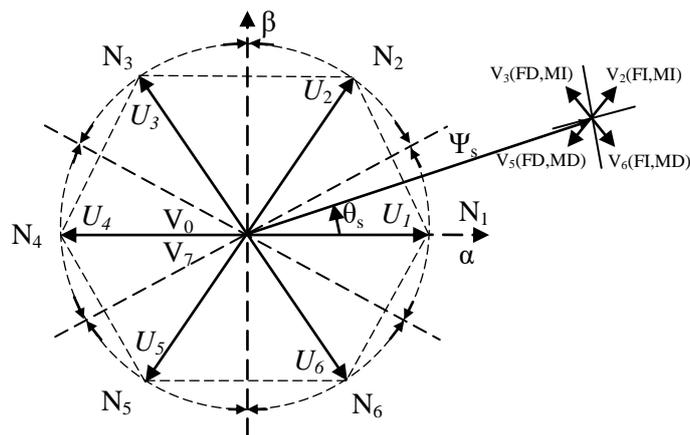


Рисунок 2.16 – Выходные векторы напряжения автономного инвертора в неподвижной системе координат ($\alpha - \beta$)

При DTC управлении вектор выходного напряжения автономного инвертора вычисляется на основе алгоритма переключений, который строится на основе таблицы 2.2. На вход таблицы переключений поступают выходные сигналы релейных регуляторов и номер сектора, в котором находится вектор потокосцепления статора. В таблице 2.2 и на рисунке 2.16 приняты следующие обозначения:

- FI – повышение потокосцепления статора;
- FD – снижение потокосцепления статора;
- MI – повышение момента двигателя;
- M – момент двигателя соответствует заданию;

MD – снижение момента двигателя.

Таблица 2.2 – Таблица выбора вектора напряжения [47]

C_{Ψ_s}	C_{Me}	N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6
FI = 1	MI = 1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	M = 0	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7
	MD = -1	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
FD = 0	MI = 1	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2
	M = 0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	MD = -1	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

Выбор угла вектора зависит от значения потокосцепления статора в системе координат (α - β) и определяется по следующей формуле 2.17:

$$\theta_s = \arctg\left(\frac{\Psi_{s\beta}}{\Psi_{s\alpha}}\right) \quad (2.17)$$

Состояние коммутации ключей автономного инвертора зависит от вектора напряжения, показанного в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Таблица переключения транзисторов [47]

	U_1	U_0	U_2	U_7	U_3	U_0	U_4	U_7	U_5	U_0	U_6	U_7
S_1	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+
S_2	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-
S_3	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+
S_4	+	+	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-
S_5	-	-	-	+	-	-	+	+	+	-	+	+
S_6	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	-

В таблице 2.3 знак «-» соответствует выключенному ключу, знак «+» – включенному. В каждый момент фазы двигателя подключаются к минусовому или плюсовому звену постоянного тока ПЧ.

На рисунке 2.17 показана схема двухуровневого инвертора. Для её упрощения выполним замену транзисторов идеальными ключами.

На рисунке 2.18 показана эквивалентная схема транзисторных ключей автономного инвертора. Ключи обозначены буквой S и имеют индекс, соответствующий транзистору реальной схемы. Ключи S_1 и S_2 образуют комплементарную пару и не могут быть включены одновременно. Если $S_1 = 1$, то фаза А двигателя подключена к «+» шины

постоянного тока и наоборот при $S_1 = 0$, фаза А подключена к «-». Аналогично коммутируются фазы В и С.

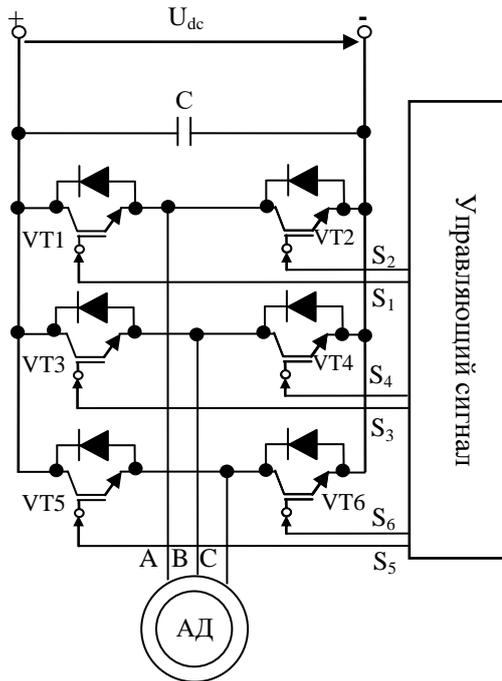


Рисунок 2.17 – Схема двухуровневого инвертора

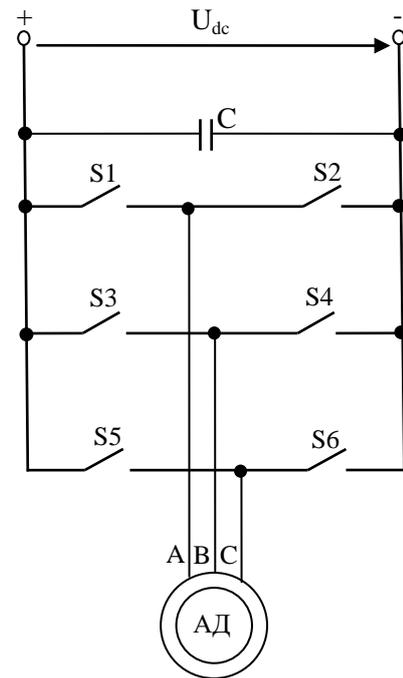


Рисунок 2.18 – Схема замещения двухуровневого инвертора

Таким образом, получается шесть активных векторов напряжения: U_1 (100), U_2 (110), U_3 (010), U_4 (011), U_5 (001), U_6 (101) и два нулевых вектора U_0 (000) и U_7 (111). Для обозначения векторов используется состояние ключей автономного инвертора, подключенных к положительной клемме шины постоянного тока. Выходные векторы напряжения автономного инвертора приведены на рисунке 2.16. Для построения системы DTC фазовая плоскость разбивается на шесть секторов следующим образом:

- если $\theta_s \in (-\pi/6, +\pi/6)$, то $N_1 = 1$;
- если $\theta_s \in (+\pi/6, +\pi/2)$, то $N_2 = 2$;
- если $\theta_s \in (+\pi/2, +5\pi/6)$, то $N_3 = 3$;
- если $\theta_s \in (5\pi/6, -5\pi/6)$, то $N_4 = 4$;
- если $\theta_s \in (-5\pi/6, -\pi/2)$, то $N_5 = 5$;
- если $\theta_s \in (-\pi/2, -\pi/6)$, то $N_6 = 6$.

Разбиение фазовой плоскости на шесть прямых секторов показано на рисунке 2.16. В результате, вращение вектора потокосцепления статора обеспечивается

с требуемой частотой при поддержании модуля вектора потокосцепления на заданном уровне только за счет скалярных регуляторов без векторных преобразований [17, 31].

На основании измеренных значений тока и напряжения статора в системе координат $(\alpha-\beta)$ рассчитываются значения момента, потокосцепления и частоты вращения, по уравнениям, приведенные в выражениях 2.18 [30]:

$$\begin{aligned}
 \Psi_{s\alpha} &= \int (U_{s\alpha} - i_{s\alpha} \cdot R_s) dt; \\
 \Psi_{s\beta} &= \int (U_{s\beta} - i_{s\beta} \cdot R_s) dt; \\
 \Psi_{r\alpha} &= \frac{L_r}{L_m} (\Psi_{s\alpha} - \sigma \cdot L_s \cdot i_s); \\
 \Psi_{r\beta} &= \frac{L_r}{L_m} (\Psi_{s\beta} - \sigma \cdot L_s \cdot i_s); \\
 \Psi_{sm} &= \sqrt{\Psi_{s\alpha}^2 + \Psi_{s\beta}^2}; \\
 \Psi_{rm} &= \sqrt{\Psi_{r\alpha}^2 + \Psi_{r\beta}^2}; \\
 M_o &= \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot (\Psi_{s\alpha} \cdot i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot i_{s\alpha}); \\
 \omega_r &= \frac{1}{p \cdot J_\Sigma} \cdot (M_o - M_c).
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Для обеспечения работоспособности системы необходимо использовать алгоритмы адаптации [3, 53]. При этих алгоритмах погрешность установленного потокосцепления не будет превышать 3%, погрешность расчета R_s – составит не более 1%, а погрешность расчета R_r – составит не более 7%. Точность оценки R_r можно повысить путем введения тепловой модели электрической машины [39, 47, 112].

2.5 Анализ метода прямого управления моментом

2.5.1. Анализ метода прямого управления моментом использования вектора напряжения переключения

Классический метод управления DTC имеет некоторые ограничения, например, при запуске и изменении частоты крутящий момент и магнитный поток двигателя реагируют медленно. Магнитный поток и момент не оцениваются и не анализируются, поскольку один и тот же вектор напряжения используется только во время запуска, изменения скорости и остановки процесса. Для модернизации системы DTC можно изменить таблицу переключений, которая основывается на разбиении фазовой

плоскости. Фазовую плоскость можно разбить на шесть сдвинутых секторов следующим образом:

если $\theta_s \in (0, +\pi/3)$, то $N_1 = 1$;

если $\theta_s \in (+\pi/3, +2\pi/3)$, то $N_2 = 2$;

если $\theta_s \in (+2\pi/3, +\pi)$, то $N_3 = 3$;

если $\theta_s \in (-\pi, -2\pi/3)$ то $N_4 = 4$;

если $\theta_s \in (-2\pi/3, -\pi/3)$, то $N_5 = 5$;

если $\theta_s \in (-\pi/3, 0)$, то $N_6 = 6$.

Разбиение фазовой плоскости на шесть сдвинутых секторов показано на рисунке 2.19. Принцип DTC управления при разбиении фазовой плоскости на шесть сдвинутых секторов основан на таблице 2.3. Отметим, что состояния U_1 и U_4 не используются в классической схеме DTC для создания момента, так как их проекция на ось момента равна нулю.

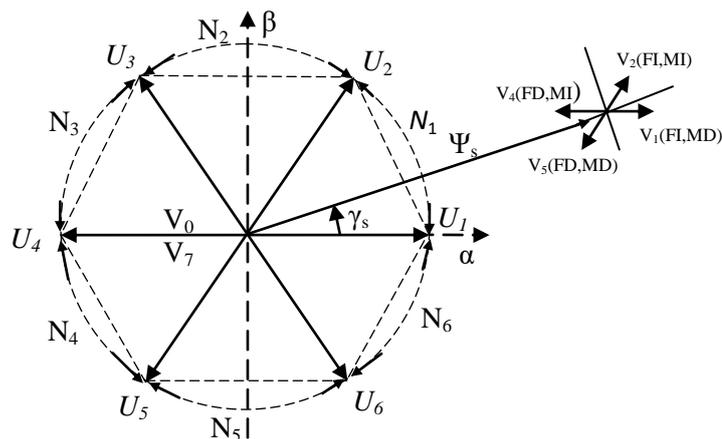


Рисунок 2.19 – Разбиение фазовой плоскости на шесть сдвинутых секторов

В таблице при разбиение плоскости сдвинутыми секторами переключений DTC U_3 и U_6 не используются для создания потокосцепления, так как их проекция на данную ось равна нулю.

Электромагнитный момент АД в системе DTC (согласно таблицам 2.2 и 2.4) является неустойчивым, так как величина потокосцепления статора и момента постоянно изменяется в диапазоне, который определяется зоной нечувствительность регуляторов. Также диапазон пульсаций зависит от частоты коммутации автономной инвертора. Основываясь на положении вектора потокосцепления статора, для уменьшения или увеличения крутящего момента выбирается вектор напряжения. Если на периоде коммутации величина момента выходит за пределы зоны

нечувствительности, то выбранный вектор напряжения автономного инвертора заменяется на другой. Таким образом, система DTC не позволяет обеспечить постоянное значение момента АД, что является недостатком.

Таблица 2.4 – Таблица переключения коммутаторов со сдвинутыми секторами [114]

dΨ	dM	N₁	N₂	N₃	N₄	N₅	N₆
FI	MI	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_1
	M=	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7
	MD	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
FD	MI	U_4	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3
	M=	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
	MD	U_5	U_6	U_1	U_2	U_3	U_4

Данный недостаток можно устранить двумя способами:

- увеличив частоту переключения автономного инвертора;
- изменив структуру системы управления.

Увеличение частоты переключений автономного инвертора приводит к увеличению потерь в электроприводе и снижению его коэффициент полезного действия.

Изменение структуры схемы увеличивает сложность алгоритма управления, однако, этот способ обеспечивает максимальный рост характеристик электропривода и является наиболее предпочтительным.

Основным способом модификацией системы DTC является изменение её таблицы переключения, структура которой изменяется двумя способами:

- изменением типов регуляторов;
- изменением количества секторов фазовой плоскости.

Максимальный эффект достигается за счет использования обоих спрбов в комплексе.

Целесообразнее всего осуществлять переход к 12-секторальному разбиению фазовой плоскости и выполнять замену трехуровневого регулятора момента на четырехуровневый [59]. Таблица переключений при 12-секторном разбиении фазовой плоскости 4-х позиционного регулятора момента показана в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Таблица переключений коммутаторов с 12 секторами разбиение фазовой плоскости 4 позиционного регулятора момента [59, 114]

dΨ	dM	N ₁	N ₂	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇	N ₈	N ₉	N ₁₀	N ₁₁	N ₁₂
FI	MI	U ₂	U ₃	U ₃	U ₄	U ₄	U ₅	U ₅	U ₆	U ₆	U ₁	U ₁	U ₂
	MSI	*U ₂	U ₂	*U ₃	U ₃	*U ₄	U ₄	*U ₅	U ₅	*U ₆	U ₆	*U ₁	U ₁
	MSD	U ₁	*U ₁	U ₂	*U ₂	U ₃	*U ₃	U ₄	*U ₄	U ₅	*U ₅	U ₆	*U ₆
	MD	U ₆	U ₁	U ₁	U ₂	U ₂	U ₃	U ₃	U ₄	U ₄	U ₅	U ₅	U ₆
FD	MI	U ₃	U ₄	U ₄	U ₅	U ₅	U ₆	U ₆	U ₁	U ₁	U ₂	U ₂	U ₃
	MSI	U ₄	*U ₄	U ₅	*U ₅	U ₆	*U ₆	U ₁	*U ₁	U ₂	*U ₂	U ₃	*U ₃
	MSD	U ₇	U ₅	U ₀	U ₆	U ₇	U ₁	U ₀	U ₂	U ₇	U ₃	U ₀	U ₄
	MD	U ₅	U ₆	U ₆	U ₁	U ₁	U ₂	U ₂	U ₃	U ₃	U ₄	U ₄	U ₅

2.5.2 Прямое управление моментом с пространственной векторной модуляцией

Основная идея DTC состоит в том, чтобы управлять в реальном времени как крутящий момент, так и величину потока в пределах соответствующих полос ошибок. Простая структура и очень хорошее динамическое поведение являются основными характеристиками DTC [46, 83].

Метод DTC использования таблицы переключения можно охарактеризовать следующим образом:

Преимущества:

- простая структура;
- нет преобразования координат;
- нет отдельного блока модуляции напряжения;
- нет токовых петель управления;
- очень хорошие динамические характеристики потока и крутящего момента по сравнению метода управления U/f.

Недостатки:

- переменная частота переключения силовых транзисторных ключей;
- большие колебания момента при запуске и работе на низкой скорости;
- высокий крутящий момент пульсации;
- поток и искажение тока, вызванные изменением положения вектора потока статора;

– высокая частота дискретизации требуется для цифровой реализации.

Недавно из классических методов DTC были разработан новый метод управления, называемый прямым управлением крутящим моментом - пространственно-векторной модуляцией (DTC-SVM). В этом новом методе устранены недостатки классического DTC. DTC-SVM - это методы, которые обеспечивают управление с постоянной частотой переключения силовых элементов. Представленная методика DTC-SVM также имеет простую структуру и обеспечивает динамическое поведение, сравнимое с классическим DTC. Однако метод DTC-SVM характеризуется гораздо лучшими параметрами в установившемся режиме работы.

Схемы прямого управления потоком и крутящим моментом с пространственно-векторной модуляцией (DTC-SVM) предлагаются для улучшения классического DTC.

Методы управления DTC-SVM работают с постоянной частотой переключения. В структурах управления используется алгоритм пространственной векторной модуляции (SVM). Тип стратегии DTC-SVM зависит от применяемого алгоритма управления потоком и крутящим моментом. В основном, контроллеры рассчитывают требуемый вектор напряжения статора, а затем он реализуется методом пространственной векторной модуляции.

Трехфазные двухуровневые преобразователи обеспечивают восемь возможных состояний переключения, состоящих из шести активных и двух нулевых состояний переключения. SVM правила напряжения переключения U_s должны быть окружностью, только одно переключение на переход состояния; не более трех переключений - один цикл. Конечное состояние одного сэмпла должно быть начальным состоянием следующего сэмпла, эти правила помогают ограничить число переключающих действий, а также уменьшаются потери на переключение и снижается THD (общее гармоническое искажение). Переменными прямого управления являются напряжение и частота двигателя. Гибкость выбора в активных состояниях переключения ключей, а их распределение в период времени переключения дает две степени свободы.

Схема прямого управления моментом с пространственной векторной модуляцией (рисунок 2.20) используется два пропорционально-интегральных ПИ-контроллеров вместо полосы гистерезиса, которые регулируют крутящий момент и величину магнитного потока. Следовательно, и крутящий момент, и величина потока находятся под контролем, тем самым генерируя команды для управления инвертором напряжения.

Отмечая, что механизм развязки не требуется, поскольку величина потока и крутящего момента могут регулироваться контроллерами ПИ-регулятора. Из-за структуры инвертора напряжение на шине постоянного тока является фиксированным, поэтому скорость пространственных векторов напряжения не контролируется, но мы можем регулировать скорость посредством вставки векторов нулевого напряжения для управления электромагнитным моментом, создаваемым асинхронным двигателем. Он основан не на области связи потока, а на векторе ошибок между ожидаемым и предполагаемым векторами связи потока.

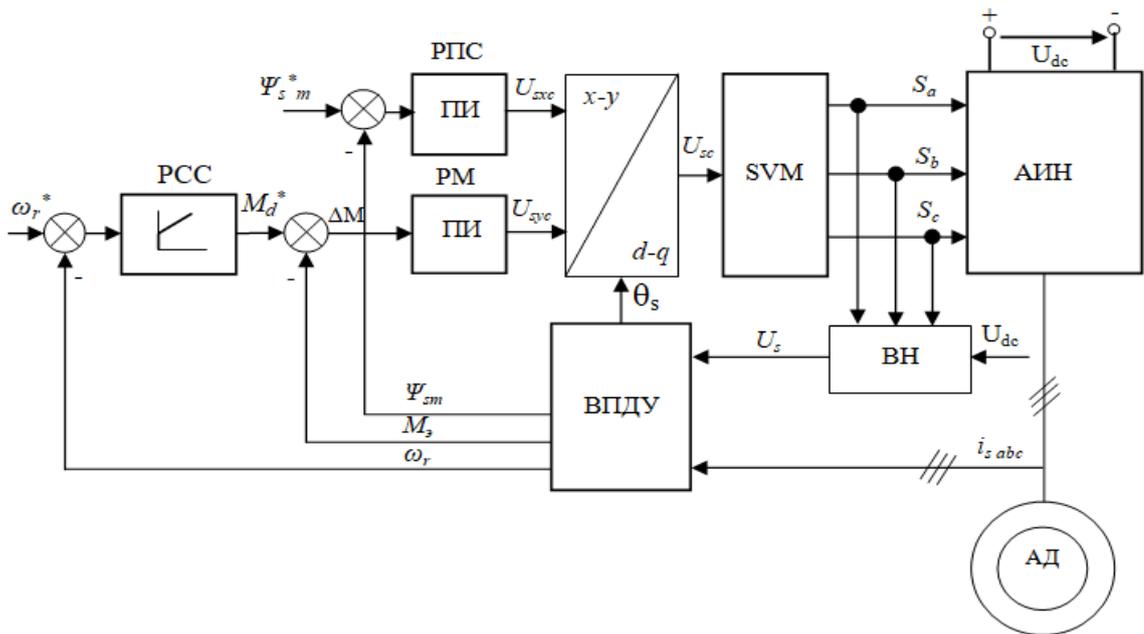


Рисунок 2.20 – Структурная схема DTC-SVM [46]

где ВН – вычислитель напряжения, ВПДУ – вычислитель момента, потокосцепления статора двигателя, скорости вращения ротора и угол вектора потока статора.

Компоненты d-q вектора опорного напряжения в статоре определяются через опорный магнитный поток статора по выражению (2.19):

$$\begin{aligned}
 U_{sd}^* &= (K_{P\psi} + K_{I\psi}) \cdot \Delta\Psi_s; \\
 U_{sq}^* &= (K_{PM} + K_{IM}) \cdot \Delta M_3; \\
 \Delta\Psi_s &= \Psi_s^* - \widehat{\Psi}_s \text{ и } \Delta M_d = M_d^* - \widehat{M}_3; \\
 U_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt}(\Psi_s); \\
 U_{sq} &= R_s I_{sq} + \omega_s \Psi_s; \\
 \omega_s &= \frac{d}{dt} \theta_s,
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

где θ_s – угол вектора потока статора, $K_{p\psi}$, $K_{i\psi}$ – пропорциональная и постоянная интегрирования потока статора, K_{pM} , K_{iM} – пропорциональная и постоянная интегрирования крутящего момента.

Электромагнитный крутящий момент может быть выражен следующей формулой 2.20:

$$M = 1,5P\Psi_s I_{sq} \quad (2.20)$$

Представленная выше модель контроллера будет использоваться в этой диссертации для исследования метода управления DTC-SVM с двумя PI-контроллерами. Блок SVM производит управления инвертором принимает опорные напряжения в системе отсчета потока статора. Принцип SVM основан на переключении между двумя соседними активными векторами и нулевым вектором в течение одного периода переключения.

2.6 Имитационное моделирование системы управления электроприводом конвейерного транспорта

2.6.1. Система управления электроприводом магистральной конвейерной линии

Система электропривода конвейера на угольной шахте Маохе имеет много двигателей, поэтому невозможно провести исследование всех систем электроприводов одновременно. В диссертации рассматривается система электропривода магистральной конвейерной линии с параметром двигателей в приложении А.

Для оценки качества работы выпрямителя и инвертора, предположим, что скорость и момент возрастают, а затем резко уменьшаются. Это - два наиболее важных изменения при работе асинхронного двигателя (рисунок 2.21, рисунок 2.22 и таблица 2.6). Модель системы электропривода была разработана для обеспечения стабильной работы при резком изменении момента нагрузки M_c .

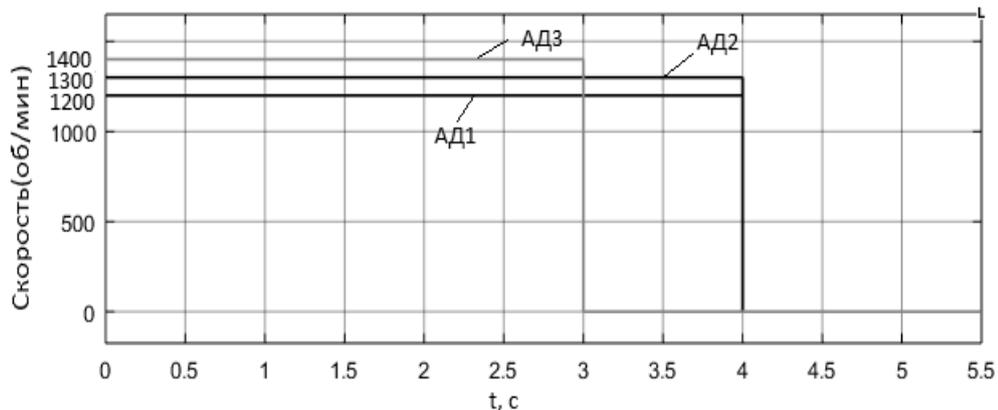


Рисунок 2.21 – График рабочей скорости трех конвейерных двигателей

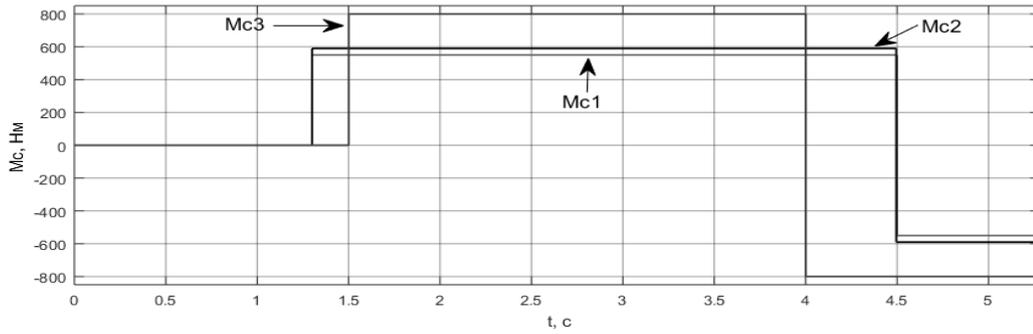


Рисунок 2.22 – График момента загрузки трех двигателей

Таблица 2.6 – Описание режима работы двигателей в разное время

Двигатель	Мощность (кВт)	Скорость(об/м) и время(с)	Момент загрузки (Н.м) и время(с)
1	110	$\omega = [1200 \ 0]$ $t = [0 \ 4]$	$Mc = [0 \ 550 \ -550]$ $t = [0 \ 1,3 \ 4,5]$
2	110	$\omega = [1300 \ 0]$ $t = [0 \ 4]$	$Mc = [0 \ 590 \ -590]$ $t = [0 \ 1,3 \ 4,5]$
3	150	$\omega = [1400 \ 0]$ $t = [0 \ 3]$	$Mc = [0 \ 800 \ -800]$ $t = [0 \ 1,5 \ 4]$

На угольной шахте Маохе система электропривода питается от трансформаторной подстанции 6/0,66 кВ. Имитационная модель системы электропривода магистральной конвейерной линии, состоящей из трех конвейерных двигателей, использующих диодные выпрямители с прямым управлением моментом, представлена на рисунке 2.23.

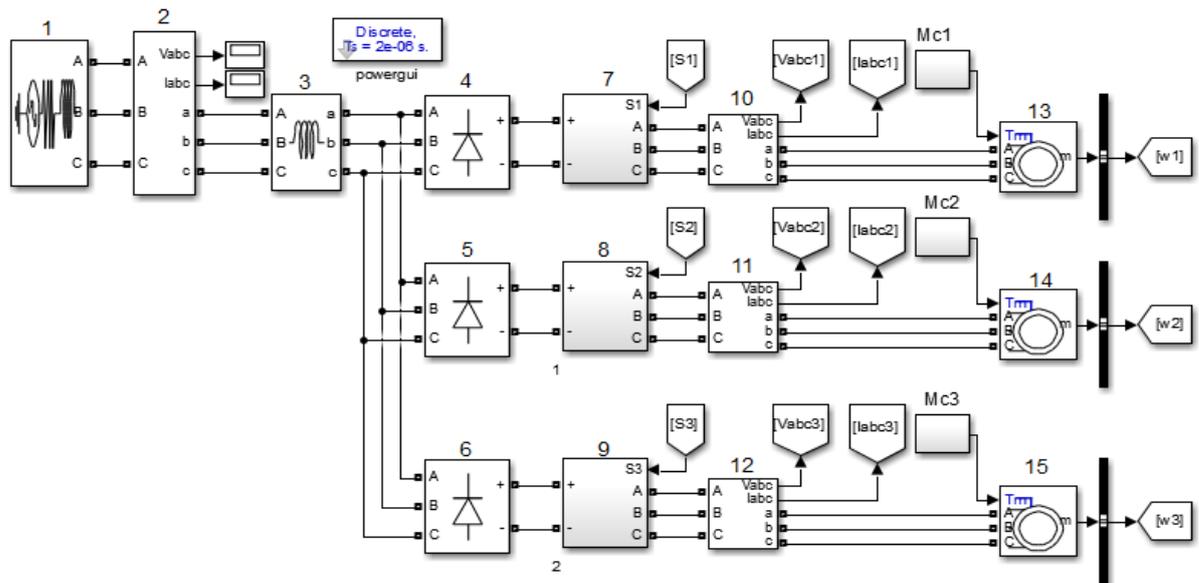


Рисунок 2.23 – Моделирование системы электропривода конвейеров с реактором

- фазовые обмотки в машине расположены симметрично в пространстве;
- потери в стальных сердечниках не учитываются;
- равномерность распределения напряжения между фазами;
- воздушный зазор между статором и ротором одинаков.

Модель расчета момента и магнитного потока статора двигателя в Matlab и Simulink на рисунке 2.25:

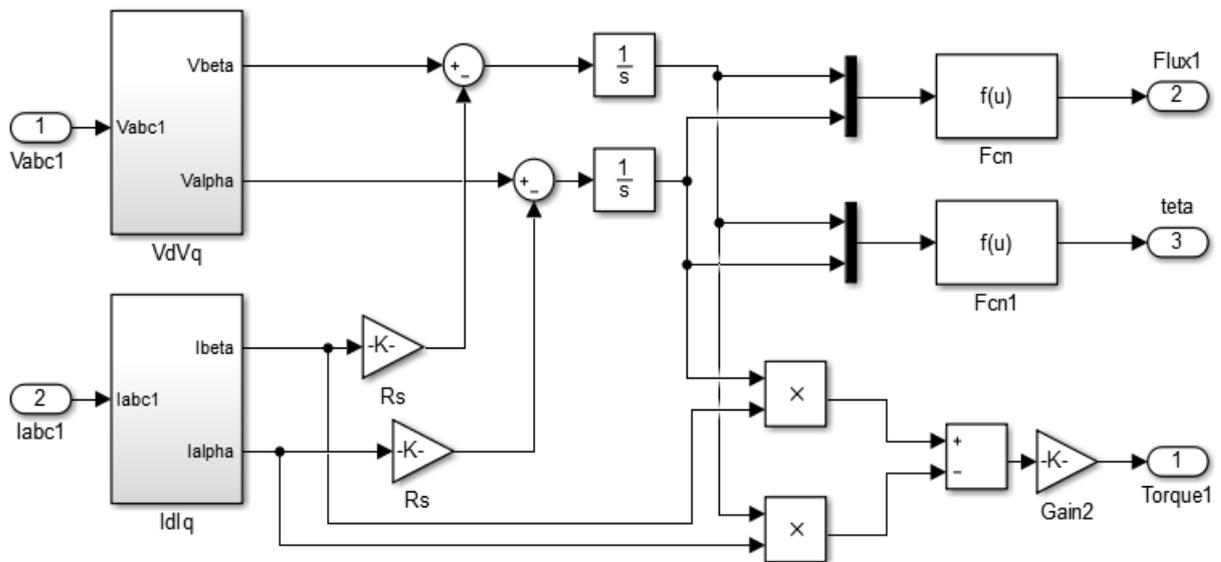


Рисунок 2.25 – Вычислитель момента, потокосцепления статора двигателя

Согласно технологическим требованиям (рисунок. 1.6), 1-й конвейерный двигатель работает со скоростью $\omega_1 \leq 1200$ (об/м). Он является конвейером, который поднимает уголь вверх через конвейерный двигатель 2 (рисунок 1.5) и через промежуточный бункер.

На рисунке 2.26 показан процесс плавного пуска и снижения скорости, при этом скорость двигателя не колеблется. Во время запуска двигателя электромагнитный момент двигателя всегда поддерживается равным $M_{Ад1} = 200$ (Нм), чтобы обеспечить его плавный запуск и недопустить вибрации в конструктивных частях двигателя.

В момент $t = 1,3$ (с) появляется момент нагрузки $M_{с1} = 550$ (Нм), электромагнитный момент двигателя сразу увеличивается в ответ на изменение момента нагрузки и практически мгновенно обеспечивает равенство моментов $M_{с1} = M_{Ад1}$. Частота вращения двигателя стабильна при значении $\omega_1=1200$ (об/м).

В момент времени $t = 4$ (с) скорость вращения первого конвейерного двигателя начинает уменьшаться до 0, электромагнитный момент также уменьшается до стабильного значения $M_{Ад1} = 350$ (Нм), обеспечивая плавный, неуклонный процесс

остановки.

В момент времени $t = 4,5(\text{с})$, когда частота вращения двигателя снижается, момент нагрузки становится меньше 0 ($M_{c1} = -550(\text{Нм})$), скорость имеет небольшие колебания, а магнитный момент двигателя $M_{\text{АД}} < 0$. Электродвигатель переключается в рабочее состояние пропорционально моменту нагрузки $M_{c1} = -550(\text{Нм})$.

Во время запуска, ток фазы (а) увеличивается до $I_{a1} = 820(\text{А})$, но ток быстро уменьшается за время в мс до небольших значений тока $I_{a1} = 100(\text{А})$, который является устойчивым и имеет синусоидальную форму.

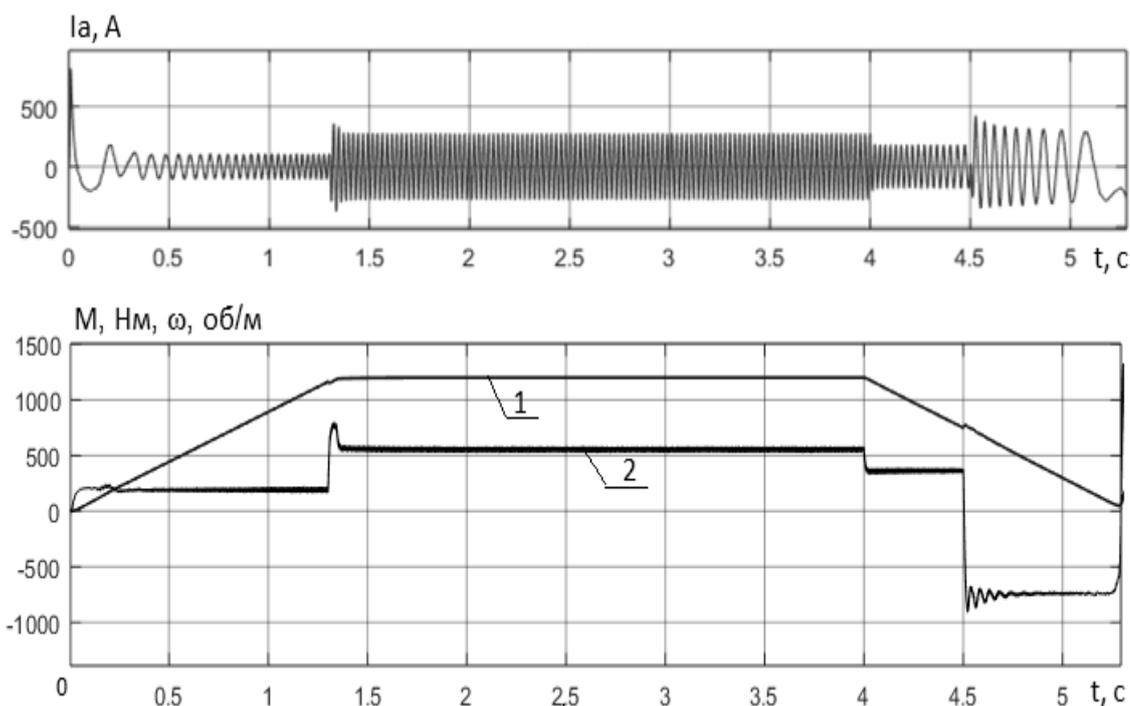


Рисунок 2.26 – График работы ЭП АД первого конвейера: 1 – скорости, 2 – момент

На рисунке 2.27 показан связанный с первым конвейерным двигателем, второй конвейерный двигатель имеет стабильные характеристики электромагнитного момента и стабильную скорость при пуске, стабильно работает на заданной скорости $\omega_2 = 1300(\text{об/м})$ и в процессе снижения скорости. Момент нагрузки на второй двигатель составляет $M_{c2} = 590(\text{Нм})$ в момент времени $t = 1,3(\text{с})$ и $M_{c2} = -590(\text{Нм})$ в момент времени $t = 4,5(\text{с})$. Максимальное значение тока при запуске $I_{a2} = 816(\text{А})$, который уменьшается до номинальных значений тока $I_{a2} = 100(\text{А})$. Во время запуска системы и при стабильной работе двигателя, соответствующей заданным значениям, а также, когда скорость вращения двигателя снижается, ток статора всегда стабилен и имеет синусоидальную форму.

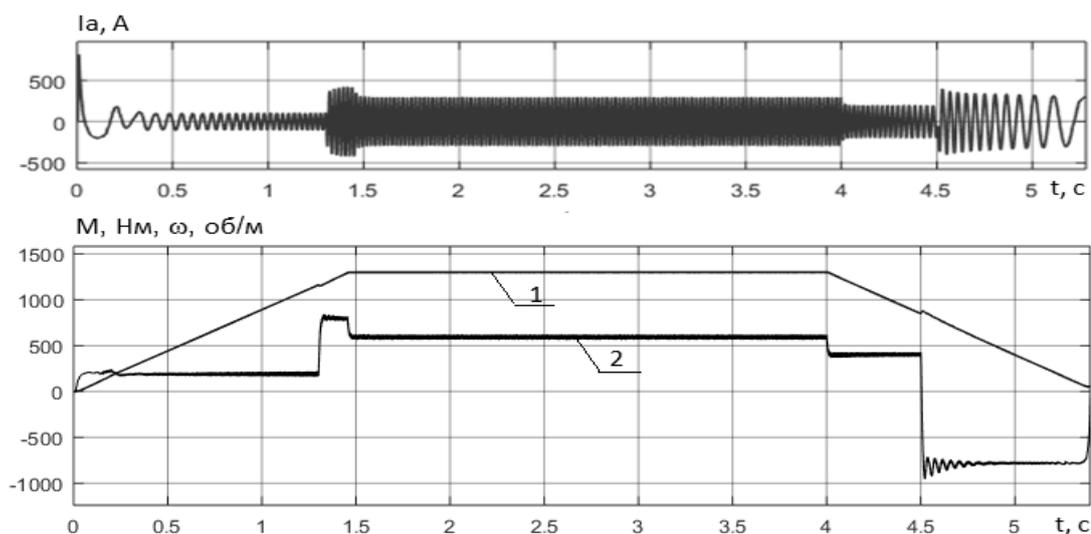


Рисунок 2.27 – График работы ЭП АД второго конвейера: 1 – скорости, 2 – момент

На рисунке 2.28 показан третий конвейерный двигатель работает со скоростью $\omega_3 \leq 1400$ (об/м). Это – конвейер, транспортирующий уголь из подземли на поверхность. На рисунке 2.28 показан процесс запуска. Время снижения скорости плавное, скорость не превышена. Во время запуска электромагнитный момент двигателя всегда поддерживается равным $M_{АДЗ} = 300$ (Нм), чтобы обеспечить плавный пуск и отсутствие вибраций.

В момент времени $t = 1,5$ (с) появляется момент нагрузки $M_{с3} = 800$ (Нм), электромагнитный момент двигателя увеличивается в ответ на изменение момента нагрузки и обеспечивает равенство $M_{с3} = M_{АДЗ}$. Скорость двигателя стабильна при значении $\omega_3 = 1400$ (об /м). В момент времени $t = 3$ (с) скорость двигателя 3-го конвейера начинает уменьшаться до 0, а электромагнитный момент уменьшается до постоянного значения $M_{АДЗ} = 500$ (Нм), обеспечивая плавный, неуклонный процесс остановки. В момент времени $t = 4$ (с), когда скорость уменьшается, момент нагрузки составит $M_{с3} = -800$ (Нм), что вызовет небольшие колебания скорости и электромагнитного момента двигателя $M_{АДЗ} < 0$. Двигатель переключается на новый рабочий режим с моментом нагрузки $M_{с3} = -800$ (Нм).

Во время пуска ток фазы (а) увеличивается до $I_{а3} = 1305$ (А), но быстро уменьшается до небольших значений $I_{а3} = 160$ (А), стабильных и синусоидальных. При наличии крутящего момента от нагрузки, когда двигатель работает стабильно с заданной скоростью, скорость снижается, а крутящий момент нагрузки инвертируется, ток фазы (а) двигателя всегда синусоидален, и не имеет перерегулирования.

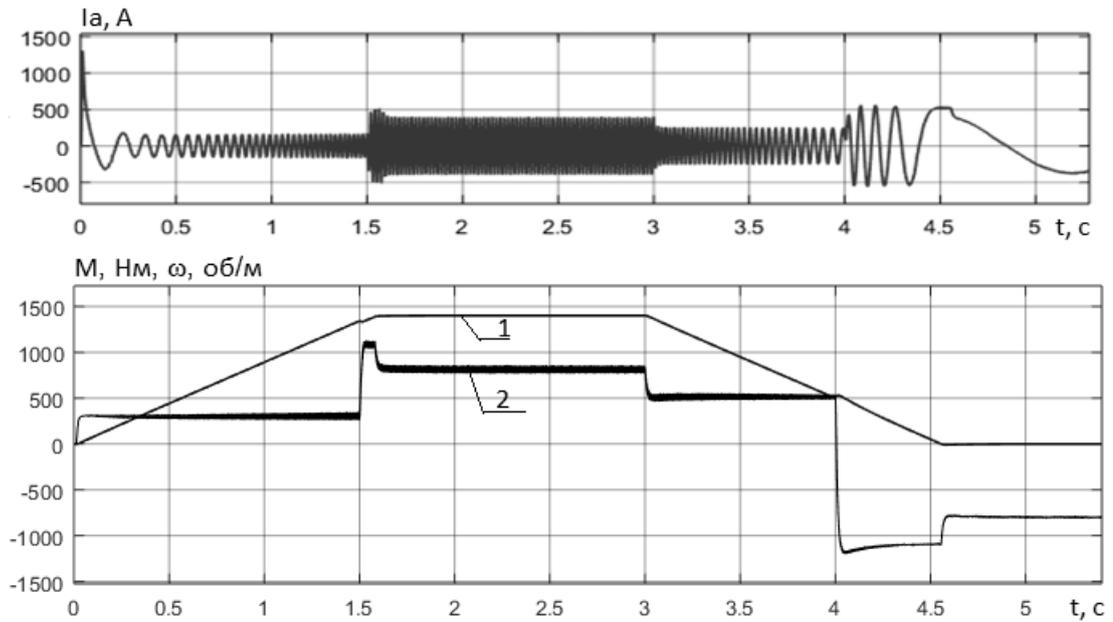


Рисунок 2.28 – График работы ЭП АД третьего конвейера: 1 – скорости, 2 – момент

Из рисунка 2.29 видно, когда двигатель работает с заданной скоростью, ток сети близок к синусоидальной форме, но он все еще имеет искажения на высокой частоте. Результаты моделирования системы прямого управления моментом двигателей обеспечения таких качественных параметров, как скорости вращений и моменты двигателей всегда стабильны во время работы, ток статора имеет форму синуса. Из характеристик электромагнитного момента и скорости трех конвейерных двигателей видно, что прямое управление крутящим моментом двигателя обеспечивает высокое качество управления без перерегулирования скорости и крутящего момента. Система многодвигательного электропривода конвейера обеспечивает электромагнитную совместимость (ЭМС).

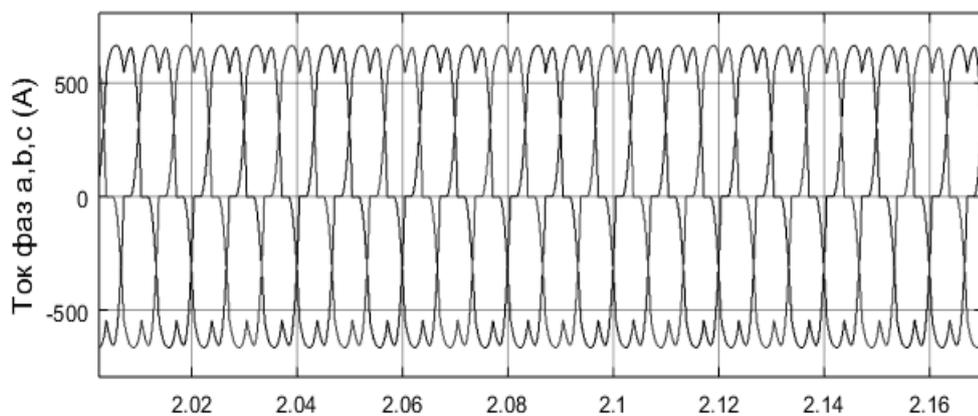


Рисунок 2.29 – График тока сети

Рисунок 2.30 и рисунок 2.31 приводят спектр гармоник и значение коэффициента искажения тока сети, при работе двигателей с заданной скоростью и показывает

искажения тока ($\text{THD}_I = 17,7\%$).

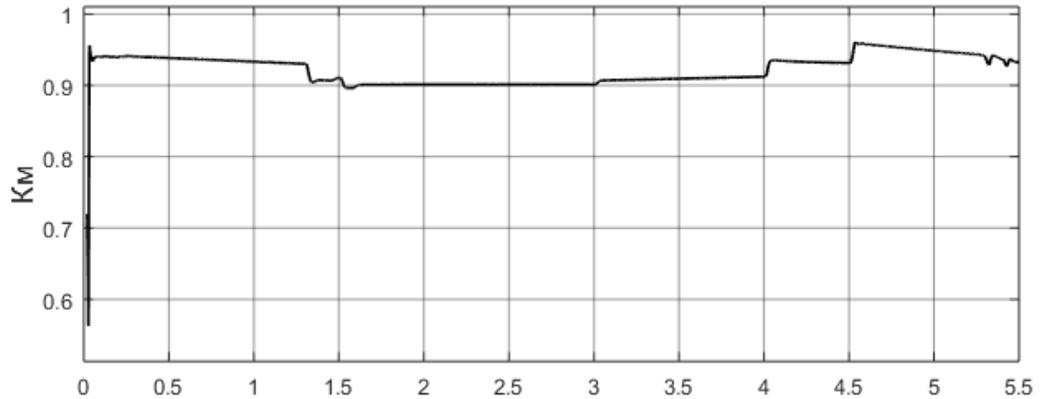


Рисунок 2.30 – Характеристики коэффициента мощности K_M

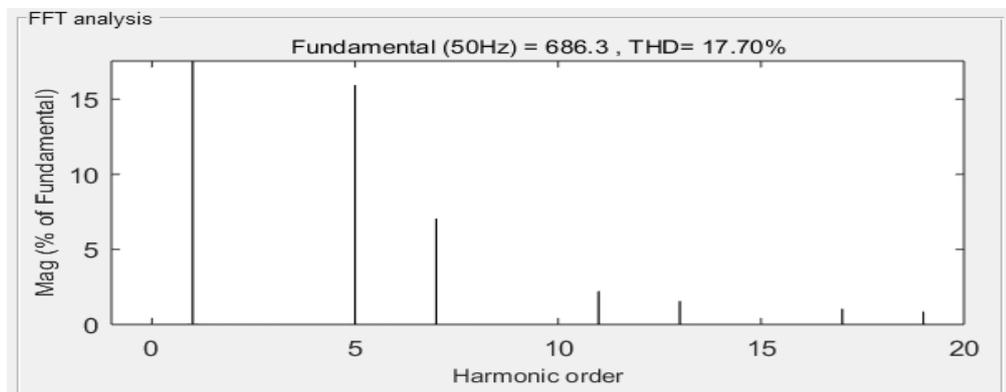


Рисунок 2.31 – Коэффициент искажения тока сети, при работе двигателей с заданной скоростью ($\text{THD}_I = 17,7\%$)

В настоящее время в системе электропривода конвейеров во Вьетнаме широко используются преобразователи частоты в сочетании с реакторами на входе для уменьшения высших гармоник тока в сети. Этот метод прост и дешев по сравнению с активным фильтром и многоимпульсным выпрямителем, но не дает необходимого уровня качества входного тока сети. Для повышения качества питающей сети на входе преобразователей частоты можно использовать многоимпульсные выпрямительные схемы и активные фильтры.

2.6.2. Использование преобразования частоты с 12-импульсным выпрямителем

На рисунке 2.32 представлена имитационная модель преобразователя частоты с использованием 12-импульсного выпрямителя. На рисунке 2.32 приняты следующие обозначения: 1 – трехфазный источник; 2, 12, 13, 14 – датчики тока и напряжения; 3, 4, 5 – трансформаторы; 6, 7, 8 – схемы 12-импульсного выпрямителя; 9, 10, 11 – инверторы.

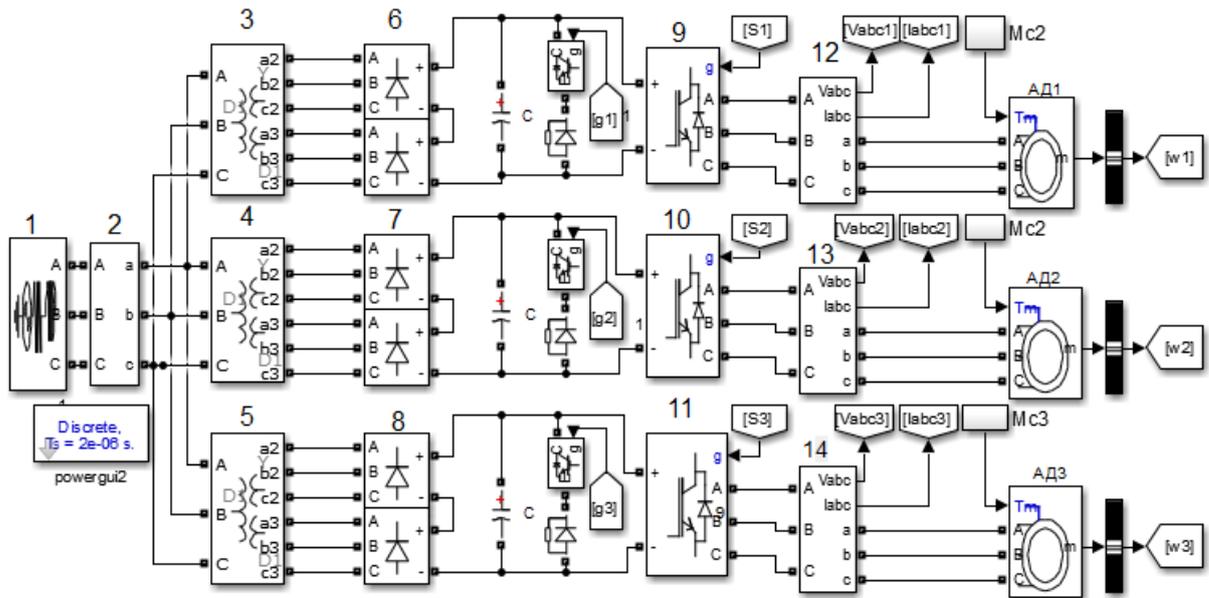


Рисунок 2.32 – Имитационная модель преобразователя частоты с использованием 12-импульсного выпрямителя

Из рисунка 2.33 представлен график тока сети, на котором видно, что, когда двигатели работают с заданной скоростью, ток сети близок к синусоидальной форме. Этот метод является лучшим для снижения гармонических искажений тока, чем метод включения входного реактора, однако применение многоимпульсных преобразователей не устраняют искажения тока при высокой частоте.

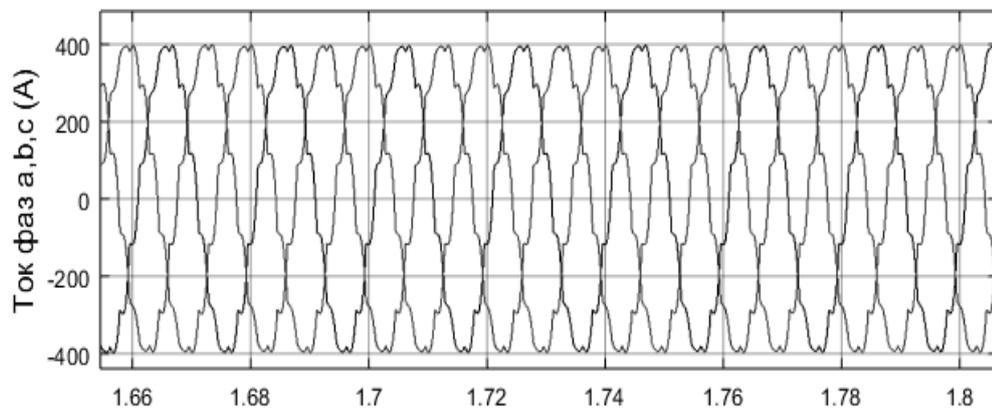


Рисунок 2.33 – График тока сети

Рисунок 2.34 показывает характеристики коэффициента мощности K_M от момента времени работы привода. Видно, что коэффициент мощности K_M имеет лучшее значение, чем при применение входного реактора. В момент времени $t = 4,5(c)$ в двигателе происходит рекуперативное торможение, но коэффициент $K_M > 0$, поэтому энергия не возвращается в сеть, а расходуется на тормозном резисторе.

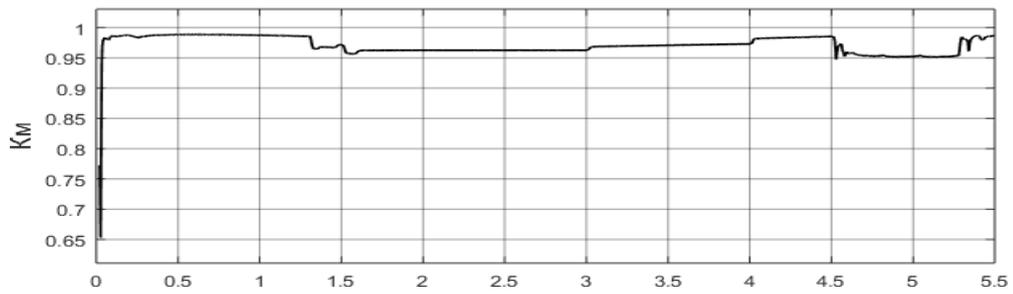


Рисунок 2.34 – Характеристики коэффициента мощности K_M

Рисунок 2.35 приводит спектр гармоник и значение коэффициента искажения тока сети, при работе двигателей с заданной скоростью и показывает заметное уменьшение искажения тока ($THD_I = 6,86\%$). Качество тока сети более продвинутое.

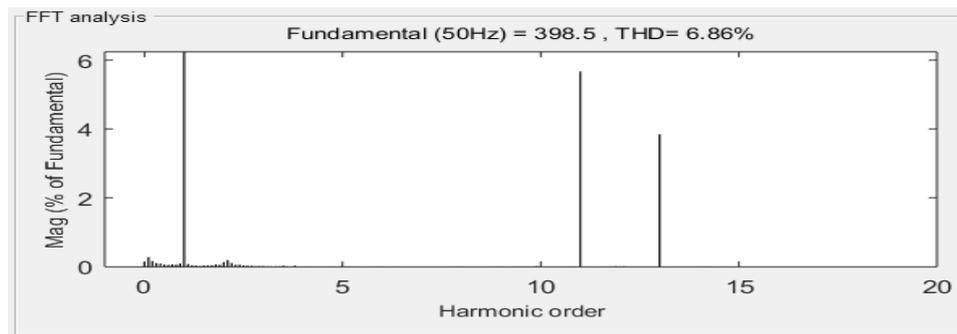


Рисунок 2.35 – Искажения тока сети, при работе двигателей с заданной скоростью

2.6.3. Преобразователь частоты с активным фильтром

На рисунке 2.36, приняты следующие обозначения: 1 – измеритель тока; 2 – расчет тока компенсации; 3 – индуктор связи; 4 – измерение тока компенсации; 5 – 3-х фазный IGBT мост; 6 – расчет потери активной мощности.

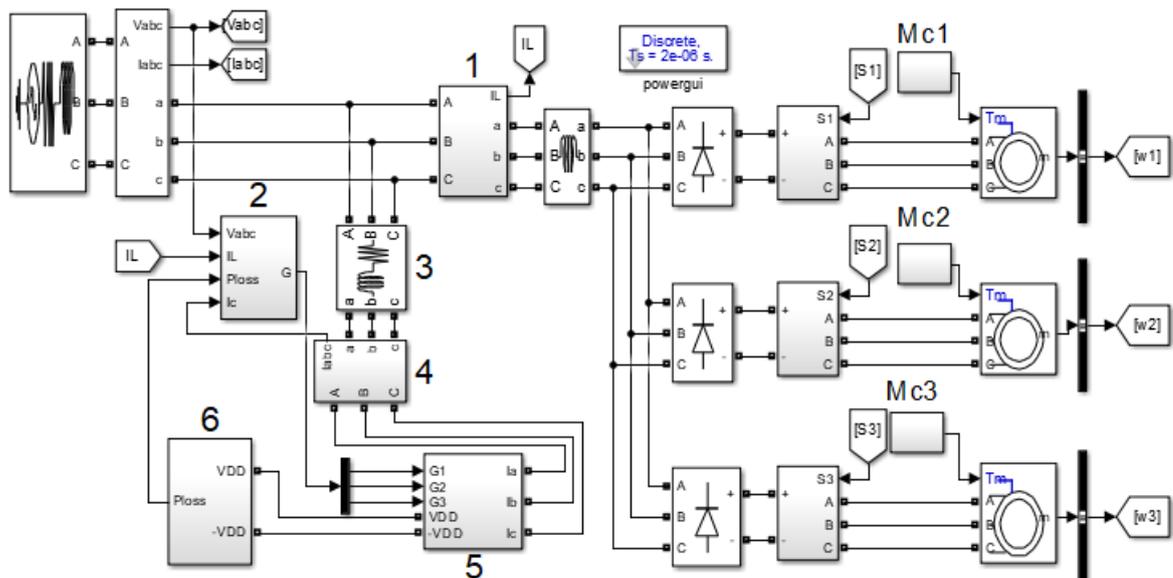


Рисунок 2.36 – Моделирование электропривода с использованием активного фильтра

Из рисунка 2.37 видно, когда двигатели работают с заданной скоростью, ток сети

близок к синусоидальной форме с фундаментальной частотой.

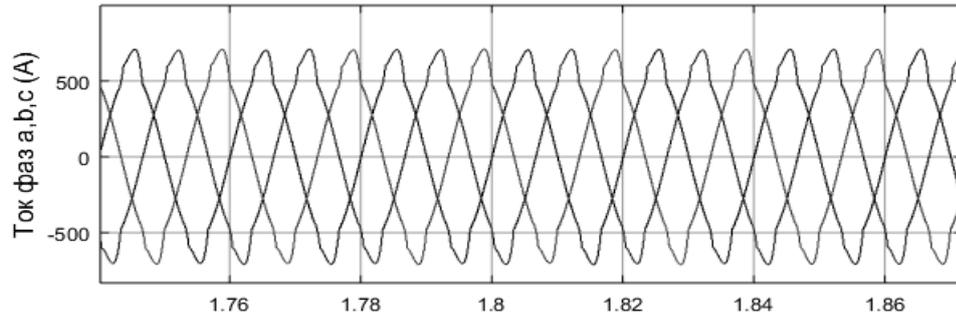


Рисунок 2.37 – График тока сети

Рисунок 2.38 показывает, что активный фильтр не только фильтрует высшие гармоники тока, но и компенсирует реактивную мощность сети, потребляемую двигателями. Следовательно, коэффициент мощности $K_M \approx 0,997$.

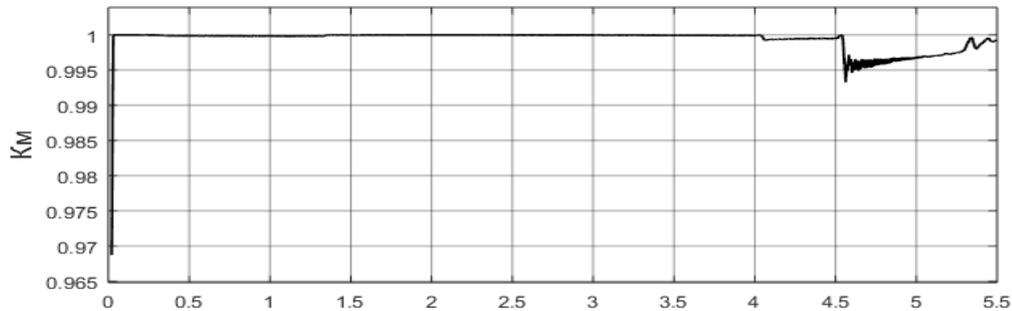


Рисунок 2.38 – Коэффициент мощности K_M

На рисунке 2.39 показано искажение тока сети $THD_I = 4,25\%$. Это значительно меньше чем при использовании реакторов ($THD_I = 4,25\%$) и 12-импульсных выпрямителей ($THD_I = 6,86\%$).

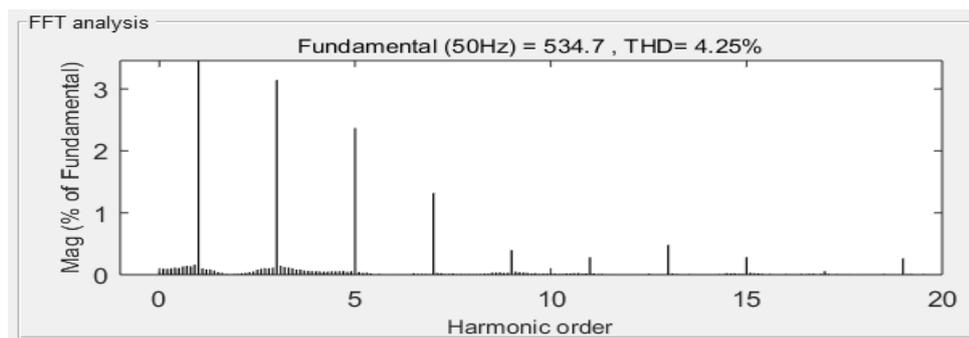


Рисунок 2.39 – Искажения тока сети, при работе двигателей с заданной скоростью

2.7 Выводы по Главе 2

Разработана имитационная модель системы электропривода с использованием метода прямого управления моментом для конвейерных двигателей. Ток статора двигателей имеет синусоидальную форму. Характеристики электромагнитного момента менее подвержены колебаниям тесно связаны с моментом нагрузки. Скорость

конвейерных двигателей плавная и соответствует заданному значению, снижает рывки и динамические нагрузки в ленте конвейера.

Проанализированы и сравнены характеристики тока, коэффициента мощности, гармонических искажений тока сети в имитационной модели системы электропривода конвейеров с использованием преобразователя частоты с диодным выпрямителем, 12-пульсным выпрямителем и активным фильтром на входе выпрямителя. Результаты показали, что в методе с активным фильтром ток близок к синусоидальной форме, коэффициент мощности $K_m \approx 1$, искажение тока сети $THD_1\% = 4,25\%$.

ГЛАВА 3 СТРУКТУРА И СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ ВЫПРЯМИТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

3.1 Обзор метода управления активным выпрямителем напряжения

3.1.1 Математическое описание активного выпрямителя

В методе используются активные выпрямители в структуре ПЧ с системой многодвигательного электропривода, что обеспечивает электромагнитную совместимость между электроприводом и источником питания, а также повышает энергоэффективность системы электропривода. Важной особенностью активных выпрямителей является возможность передачи энергии в обратном направлении посредством управления полупроводниковыми ключами. Процесс рекуперации энергии от ПЧ к сети с коэффициентом мощности, близким к единице в разных режимах работы описывается в [70].

Преобразователь с активным выпрямителем имеет такие преимущества, как:

- коэффициент мощности близкий к единице;
- потребляет ток, близкий к синусоидальному;
- имеет регулировку напряжения постоянного тока на выходе выпрямителя;
- емкость конденсатора в звене постоянного тока меньше, чем ПЧ с неуправляемым выпрямителем.

Однако, недостатком активного выпрямителя является то, что потери при коммутации ключей выше, чем у диодного выпрямителя [71].

Принципиальная схема активного выпрямителя приведена на рисунке 3.1.

Активный выпрямитель делится на две основные структуры: активный выпрямитель напряжения и тока. Другие названия для этих двух типов на английском языке - *Boots* и *Buck* [69, 75].

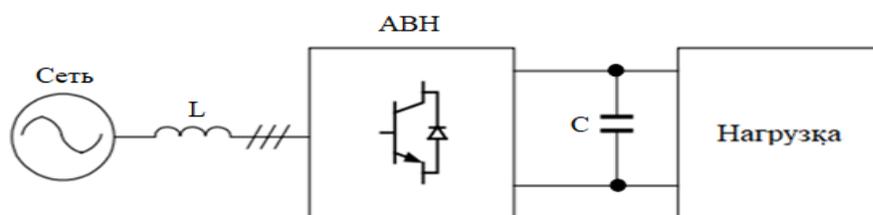


Рисунок 3.1 – Функциональная схема активного выпрямителя

В настоящее время активные выпрямители напряжения более применимы, чем выпрямители тока, поскольку процесс рекуперации энергии не требует наличия

дополнительных рекуперировующих модулей [49, 80, 87]. Структурная схема активных выпрямителей приведены на рисунке 3.2 и рисунке 3.3.

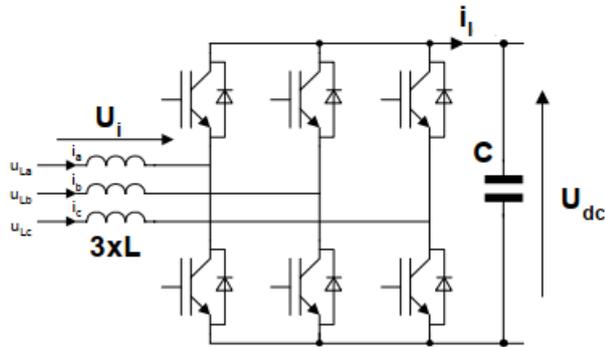


Рисунок 3.2 – Схема активного выпрямителя напряжения (boost)

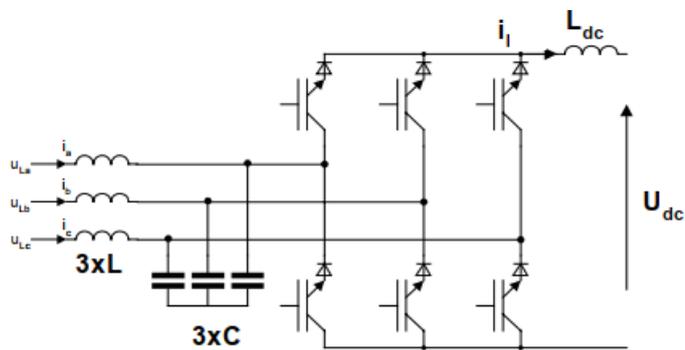


Рисунок 3.3 – Схема активного выпрямителя тока (buck)

В данной диссертации изучается активный выпрямитель напряжения, поскольку он позволяет выполнить процесс рекуперации энергии [91]. Реализация преобразователя частоты с активным выпрямителем напряжения имеет несколько вариантов, один из которых показан на рисунке 3.4. В схему активного выпрямителя для уменьшения искажения формы тока сети и увеличения выходного напряжения включают входные реакторы, а для сглаживания пульсаций выходного напряжения – конденсаторные установки.

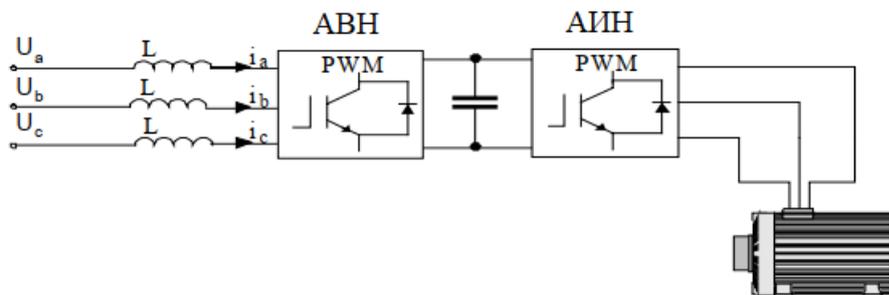


Рисунок 3.4 – Структура ПЧ с активным выпрямителем

Для повышения энергоэффективности систем электропривода с несколькими двигателями используется группа инверторов (рисунок 3.5) [94].

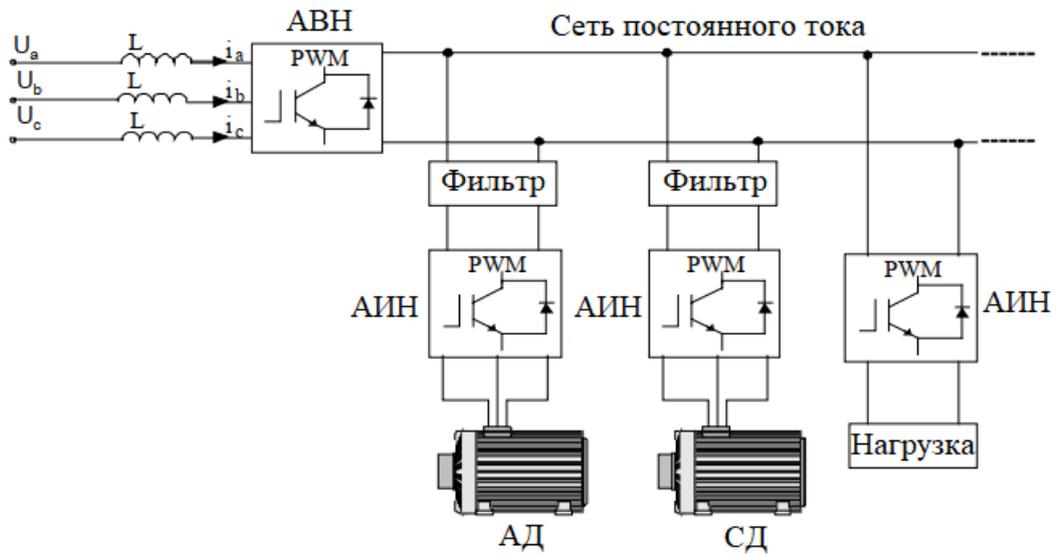


Рисунок 3.5 – Группа автономных инверторов с активным выпрямителем
Базовая структурная схема АВН показана на рисунке 3.6 [107, 109].

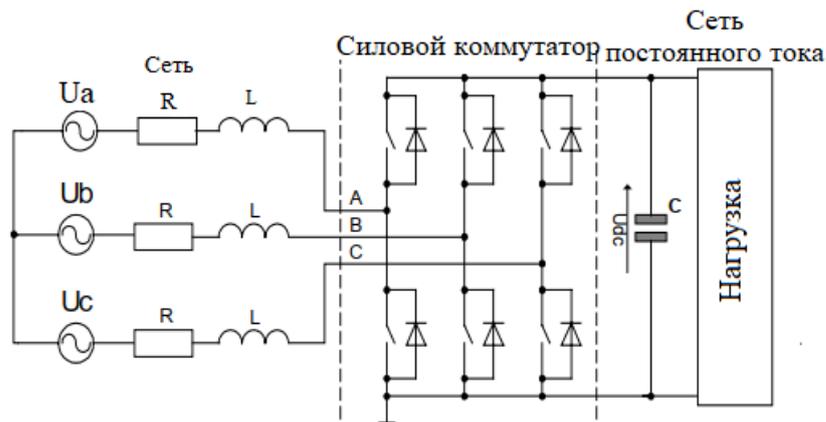


Рисунок 3.6 – Силовая схема АВН

Для анализа режима работы АВН, необходимо описать принцип работы одной фазы АВН. Эквивалентная схема одной фазы АВН показана на рисунке 3.7.

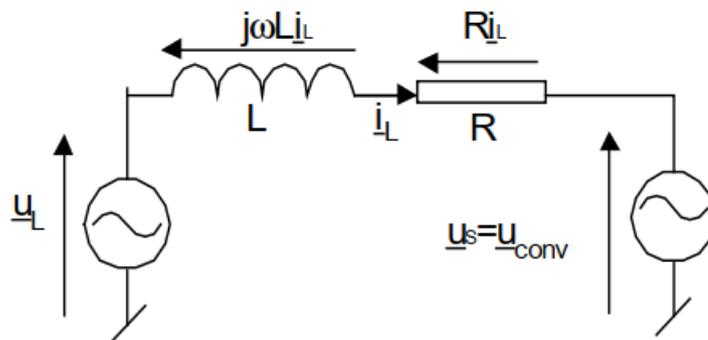


Рисунок 3.7 – Схема одной фазы АВН

Ток сети i_L управляется падением напряжения на индуктивности L , соединяющей два источника напряжения (сеть и преобразователь). Это означает, что напряжение

индуктивности u_L равно разности между напряжением сети L и напряжением преобразователя u_s . Когда происходит управление фазовым углом ε и амплитудой напряжения преобразователя u_s , косвенно контролируется фаза и амплитуда тока в сети. Таким образом, среднее значение и знак постоянного тока должны регулироваться пропорционально активной мощности, передаваемой через преобразователь. Реактивная мощность может регулироваться с увеличением смещения основной гармоники тока I_L относительно напряжения U_L [96].

Активный выпрямитель может работать в выпрямительном и рекуперационном режимах. На рисунке 3.8 приведены диаграммы тока и напряжения для этих режимов работы активного выпрямителя [93].

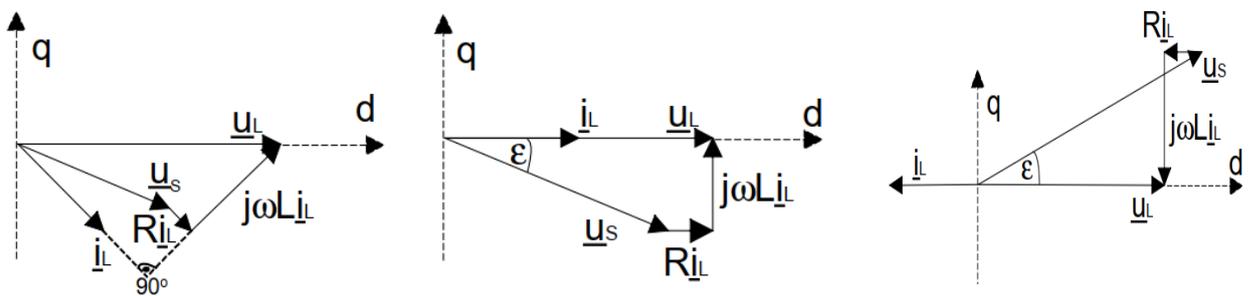


Рисунок 3.8 – Диаграмма тока и напряжения при работе АВН: а) АВН в режиме выпрямления; б) АВН в режиме выпрямителя; в) АВН работе в режиме рекуперации энергии

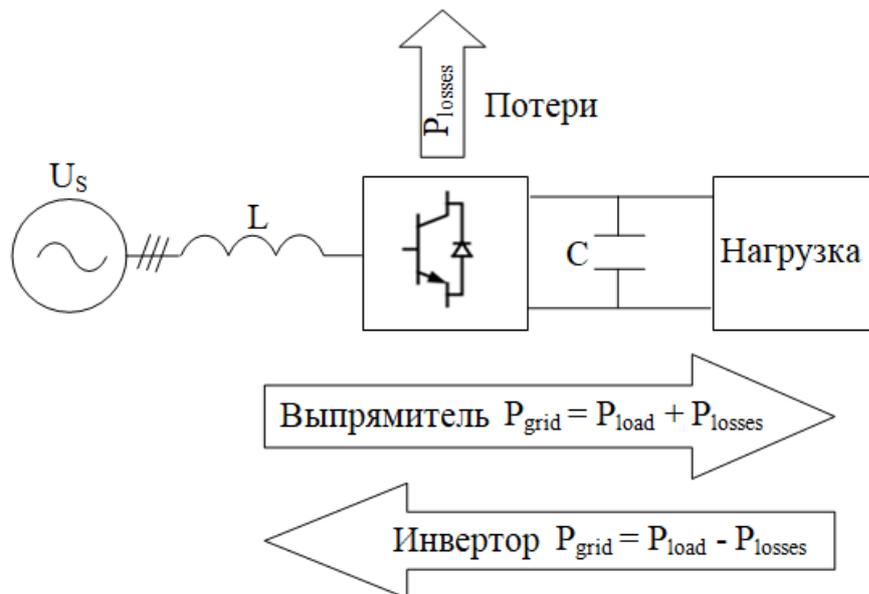


Рисунок 3.9 – Принцип баланса мощности АВН

В АВН присутствуют потери мощности при коммутации силовых ключей, на сопротивлениях полупроводниковых ключей, реакторов и на других элементах [54, 113].

В таком случае, баланса мощности в АВН можно представить по схеме, показанной на рисунке 3.9. При управлении коммутацией силовых ключей будет формироваться потребляемый ток. На управляющие входы силовой схемы подается сигнал, модулирующий ток заданной формы [20]. На базовой структурной схеме выпрямителя имеется шесть управляемых коммутационных ключей. В каждый момент времени ключи силового коммутатора будут иметь одно из восьми состояний, показанных на рисунке 3.10 [101].

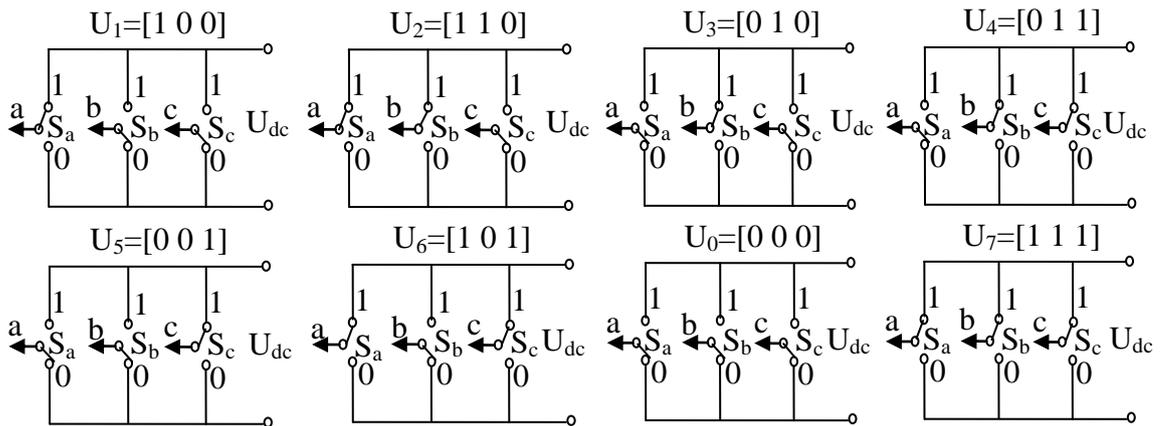


Рисунок 3.10 – Состояния переключения полупроводниковых ключей в АВН

Каждое, из представленных на рисунке 3.10, состояний соответствует одному из положений вектора напряжения АВН (рисунок 3.11) [97].

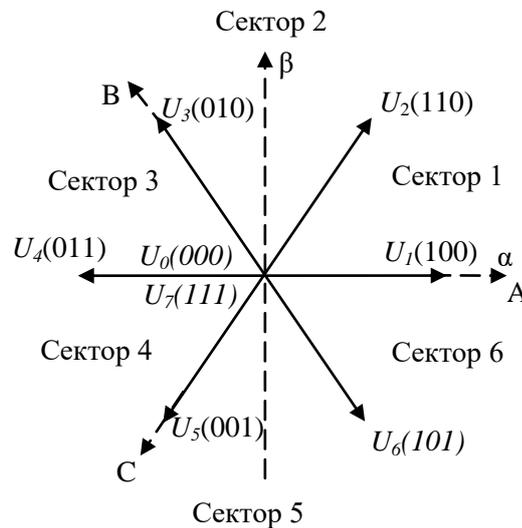


Рисунок 3.11 – Схема вектора напряжения на входе АВН

Основные соотношения между векторами активного выпрямителя представлены на рисунке 3.12 [110]. Напряжение сети на входе АВН описывается в соответствии со следующими уравнениями (3.1) – (3.3):

$$u_a = E_m \cos \omega t \quad (3.1)$$

$$u_b = E_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.2)$$

$$u_c = E_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.3)$$

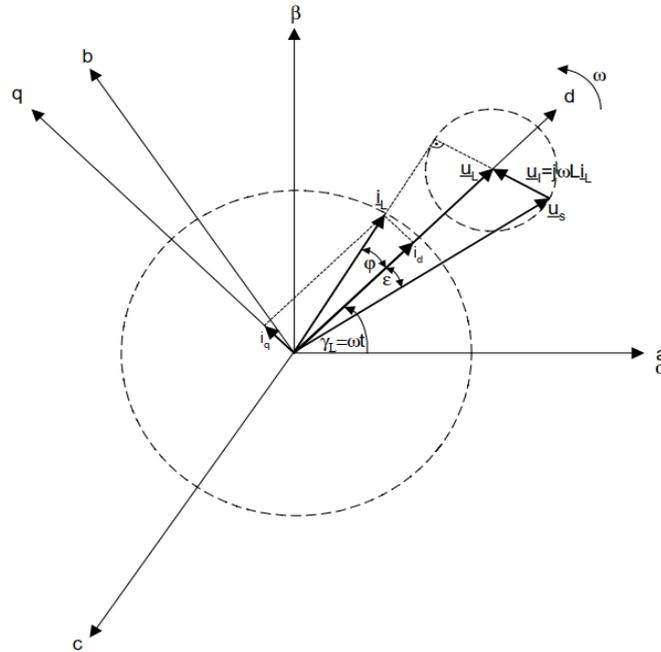


Рисунок 3.12 – Связь между векторами в активном выпрямителе

Ток, полученный на входе АВН, описывается в соответствии со следующими уравнениями (3.4) – (3.6):

$$i_a = I_m \cos(\omega t + \varphi); \quad (3.4)$$

$$i_b = I_m \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \varphi\right); \quad (3.5)$$

$$i_c = I_m \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \varphi\right), \quad (3.6)$$

где u_a, u_b, u_c – мгновенные значения фазного напряжения сети; i_a, i_b, i_c – мгновенные значения фазового тока, потребляемого из сети; E_m – ЭДС сети; I_m – амплитудное значение тока, потребляемого из сети; ω – частота сети в радианах в секунду; t – время.

При переходе от неподвижной системы координат к вращающейся с частотой сети (ω) и ориентации оси d по вектору напряжения, уравнение напряжения примет вид, представленный приведенными ниже формулами (3.7) – (3.9):

$$u_{L\alpha} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} E_m \cos(\omega t); \quad (3.7)$$

$$u_{L\beta} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} E_m \sin(\omega t); \quad (3.8)$$

$$\begin{bmatrix} U_{Ld} \\ U_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} E_m \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{u_{L\alpha}^2 + u_{L\beta}^2} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где $u_{L\alpha}$ – вектор напряжения сети на ось α ;

$u_{L\beta}$ – вектор напряжения сети на ось β ;

u_{Ld} – вектор напряжения сети на ось d , в системе координат вращающейся (d-q);

u_{Lq} – вектор напряжения сети на ось q , в системе координат вращающейся (d-q).

Таким образом, на входе инвертора линейные напряжения описываются следующими формулами (3.10) – (3.12) [104]:

$$u_{Sab} = (S_a - S_b) \cdot u_{dc}; \quad (3.10)$$

$$u_{Sbc} = (S_b - S_c) \cdot u_{dc}; \quad (3.11)$$

$$u_{Sca} = (S_c - S_a) \cdot u_{dc}, \quad (3.12)$$

где $S_{a,b,c}$ – функция описывающая состояние коммутатора и принимающая значение 0 и 1;

$u_{ab,bc,ca}$ – линейное напряжение сети;

u_{dc} – напряжение в звене постоянного тока.

Фазовые напряжения описываются по следующим формулам (3.13) – (3.18):

$$u_{Sa} = f_a \cdot u_{dc}; \quad (3.13)$$

$$u_{Sb} = f_b \cdot u_{dc}; \quad (3.14)$$

$$u_{Sc} = f_c \cdot u_{dc}, \quad (3.15)$$

где:

$$f_a = \frac{2S_a - (S_b + S_c)}{3}; \quad (3.16)$$

$$f_b = \frac{2S_b - (S_a + S_c)}{3}; \quad (3.17)$$

$$f_c = \frac{2S_c - (S_b + S_a)}{3}. \quad (3.18)$$

Исходя из возможных значений S_a , S_b , S_c , получаем, что u_{Sn} может принимать значения: $0u_{dc}$, $\pm 1/3 u_{dc}$, $\pm 2/3 u_{dc}$.

Исходя из баланса напряжений, можно написать следующие выражения (3.19) – (3.21) [79]:

$$u_L = u_I + u_S; \quad (3.19)$$

$$u_L = Ri_L + \frac{di_L}{dt}L + u_S; \quad (3.20)$$

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{Sa} \\ u_{Sb} \\ u_{Sc} \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

где u_L , $u_{a,b,c}$ – фазное напряжение сети;

u_I – падение напряжения на входных дросселях;

i_L , $i_{a,b,c}$ – ток, потребляемый активным выпрямителем;

u_S , $u_{Sa,b,c}$ – коммутлируемое напряжение в звене постоянного тока;

R – активное сопротивление входных дросселей;

L – индуктивность входных дросселей.

Также, исходя из суммы токов, можно написать уравнение для токов (3.22).

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{dc} \quad (3.22)$$

На основании вышеприведенных уравнений можно составить линейризованную блок схему АВН (рисунок 3.13) [28].

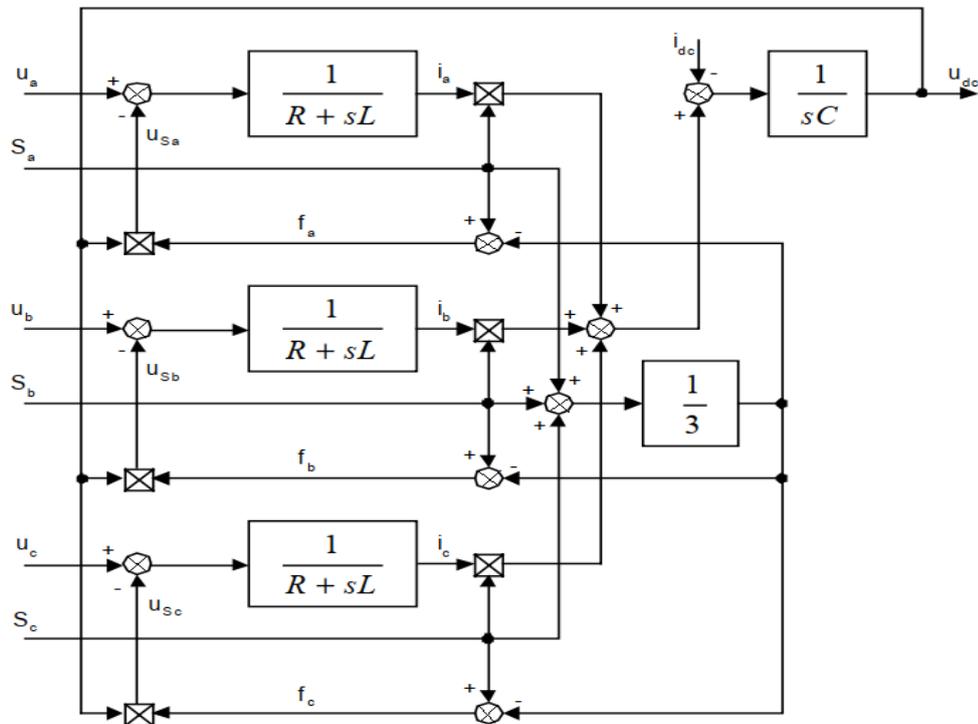


Рисунок 3.13 – Блок-схема АВН

3.1.2. Метод управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения

Управление активным выпрямителем можно рассматривать как двойственную проблему для векторного управления асинхронным двигателем [88, 89]. В последних работах [93] по этому типу преобразователя с активным выпрямителем были предложены различные стратегии управления. Эти стратегии управления достигают основных целей, таких как высокий коэффициент мощности и форма волны тока почти синусоидальной формы. В последнее время стал применяться метод управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения (VOC – Voltage Oriented Control), который гарантирует высокие динамические и статические характеристики благодаря наличию внутренних контуров управления током [89, 92, 99, 105, 106].

Управляющая структура VOC использует токовый контур управления, основанный на преобразовании между фиксированной системой координат α - β и вращающейся системой координат d-q. Измерение тока и напряжения в системе координат abc, сначала преобразуется в статическую систему координат α - β , затем преобразуется во вращающуюся систему координат d-q, как показано на рисунке 3.14 а.

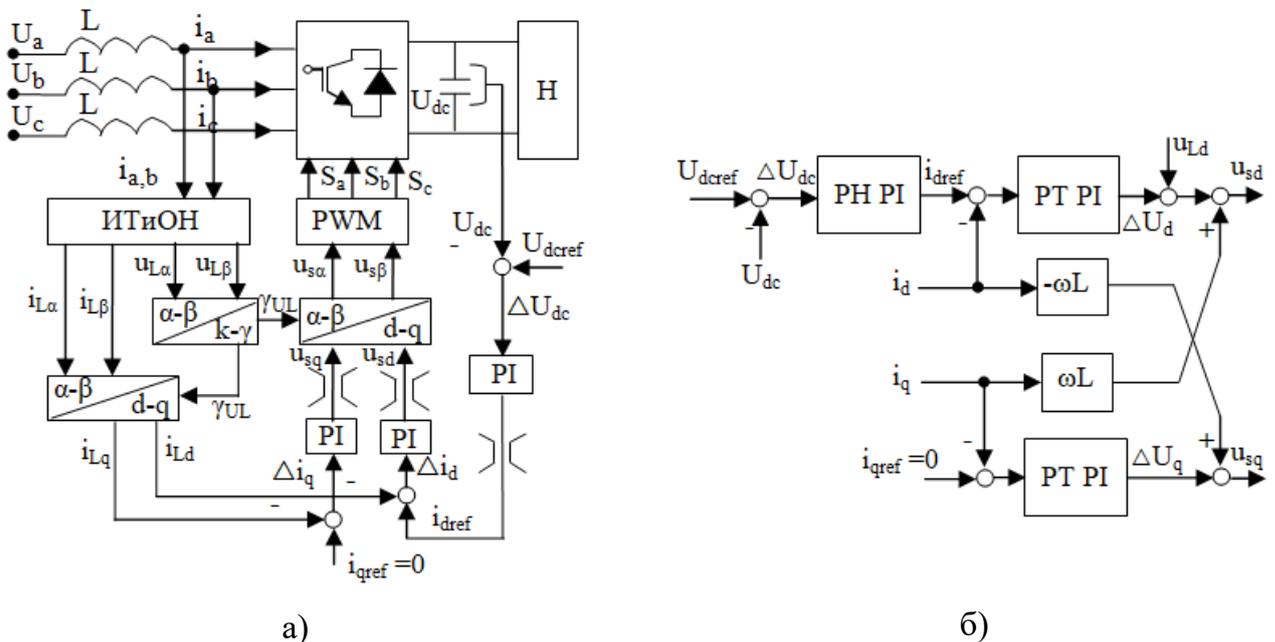


Рисунок 3.14 – Схема управления активным выпрямителем: а – метод управления активным выпрямителем по вектору напряжения, б – Схема управления раздельным током активного выпрямителя

где n – нагрузка; PI – ток регулятора по оси d-q и регулятор постоянного тока; PWM – генератор импульсов управления IGBT; L – индуктивное сопротивление катушки;

ИТиОН – измерение тока и оценка напряжения; РН PI – регулятор напряжения PI; РТ PI – регулятор тока PI.

В системе координат d-q (рисунок 3.15) напряжение сети рассчитывается следующим образом по выражениям (3.23) – (3.24):

$$u_{Ld} = Ri_{Ld} + L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{sd} - \omega Li_{Lq} \quad (3.23)$$

$$u_{Lq} = Ri_{Lq} + L \frac{di_{Lq}}{dt} + u_{sq} + \omega Li_{Ld} \quad (3.24)$$

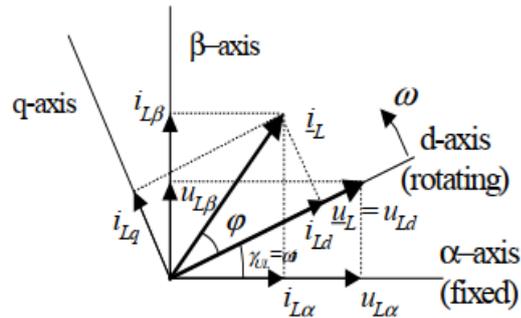


Рисунок 3.15 – Схема векторов тока и напряжения в системе координат α - β и вращающейся системой координат d-q

Предполагая, что входное сопротивление очень мало по сравнению с входной индуктивностью, формула сокращается до следующих выражений (3.25) – (3.26):

$$u_{Ld} = L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{sd} - \omega Li_{Lq} \quad (3.25)$$

$$u_{Lq} = L \frac{di_{Lq}}{dt} + u_{sq} + \omega Li_{Ld} \quad (3.26)$$

Ток i_{qref} установлен на 0, чтобы всегда гарантировать, что коэффициент мощности на входе всегда равен 1, и в результате получится формулам (3.27) – (3.28):

$$u_{Ld} = L \frac{di_{Ld}}{dt} + u_{sd} \quad (3.27)$$

$$0 = u_{sq} + \omega Li_{Ld} \quad (3.28)$$

В структурной схеме управления активным выпрямителем, тока i_{qref} является постоянным значением, цель состоит в том, что регулятор тока требуется интегральный элемент для устранения статических отклонений. Поэтому выберите регулятор тока с структурой PI, чтобы устранить шум и устранить статическое отклонение. При преобразовании тока в системе координаты abc в двум осям d-q между осями будет генерировать индуктивное напряжение. Чтобы устранить эти перекрестные компоненты, мы используем разделитель каналов, как показано на рисунке 3.14 б.

Для исследования энергоэффективности системы электропривода конвейера с активным выпрямителем был рассмотрен электропривод с системой векторного управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения. При этом предложенная структура системы электропривода конвейера, включает один активный выпрямитель и несколько инверторов (на рисунке 3.16).

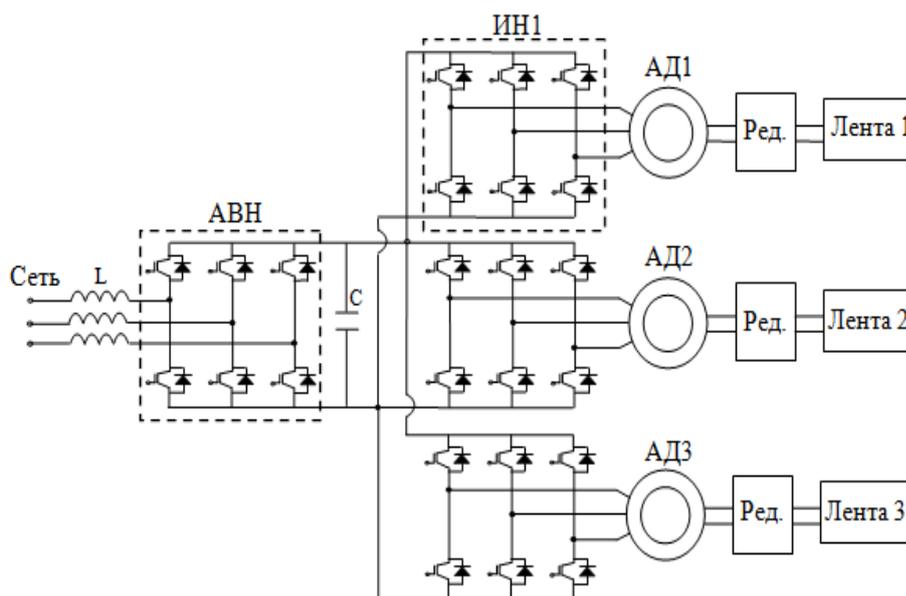


Рисунок 3.16 – Схема системы электропривода конвейера с АВН

3.2. Моделирование системы электропривода конвейера с активным выпрямителем

Имитационная модель системы электропривода конвейера, состоящей из трех конвейерных двигателей, использующих активные выпрямители с прямым управлением моментом, представлена на рисунке 3.17.

Параметры схемы выпрямителя:

1. Номинальное напряжение сети 660 В, частота 50 Гц;
2. Номинальная мощность трех двигателей 110 кВт, 110 кВт и 150 кВт соответственно, частота 50 Гц, $p = 2$, $U = 660/380$ В;
3. Частота коммутации IGBT равна 5 кГц;
4. Индуктивность на входе активного выпрямителя IGBT рассчитывается в соответствии с требуемым уровнем напряжения на выходе активного выпрямителя и параметрами инвертора с двигателем и равна $L = 0,001$ Н.
5. Емкость конденсатора на выходе активного выпрямителя равна $C = 10000$ мкФ;
6. Постоянное напряжение на выходе активного выпрямителя равно 1200 В.

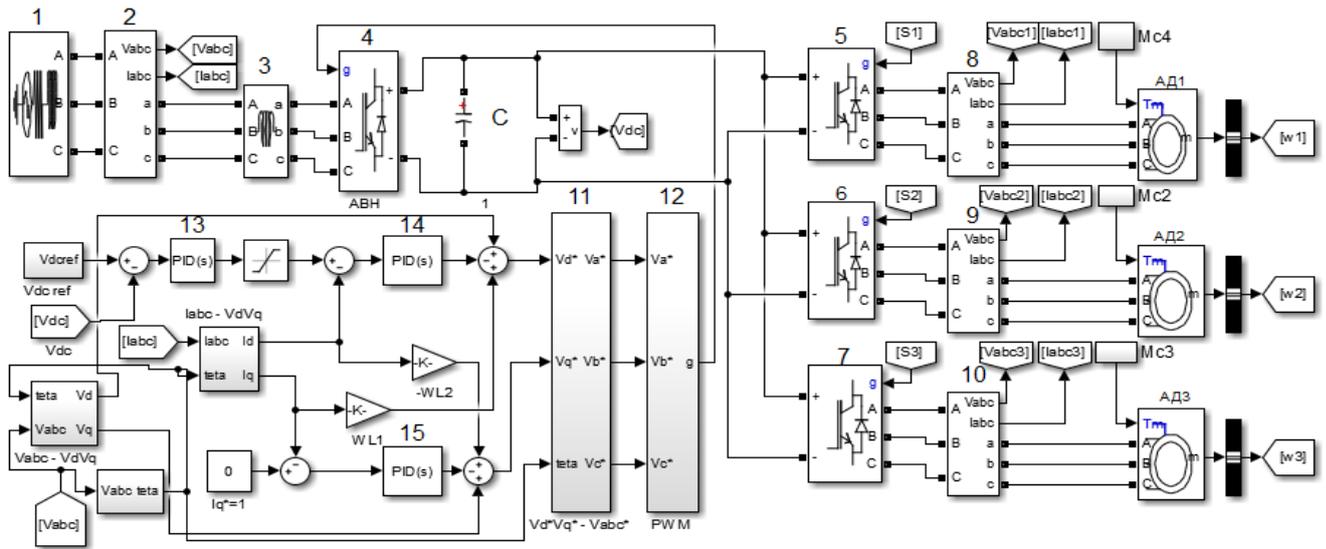


Рисунок 3.17 – Модель моделирования системы электропривода с активным выпрямителем напряжения с ориентацией по вектору напряжения

На рисунке 3.17, приняты следующие обозначения: 1 – трехфазный источник; 2, 8, 9, 10 – датчик тока и напряжения; 3 – индуктивность реакторов; 4 – активный выпрямитель; 5, 6, 7 – инвертор; 11 – расчёт напряжения в системе координат abc от системы координат d-q; 12 – блок управления активным выпрямителем (ШИМ), 13 – регулятор напряжения; 14 – регулятор тока I_d ; 15 – регулятор тока I_q ; M_c – момент загрузки; C – конденсатор.

Пересчёт напряжения из системы координат d-q в систему координат abc и описание сигналов управления IGBT представлены на рисунке 3.18 и 3.19.

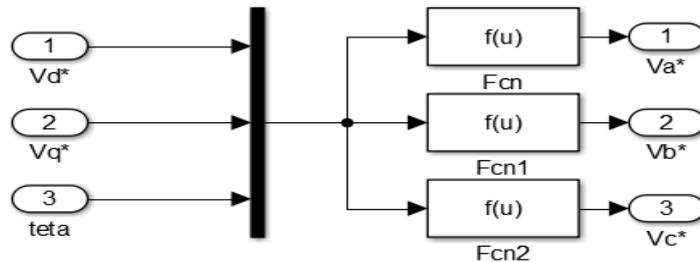


Рисунок 3.18 – Расчёт напряжения в системе координат abc

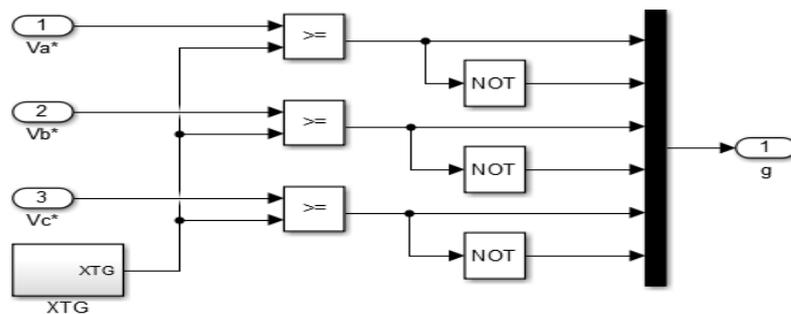


Рисунок 3.19 – Описание сигналов управления IGBT (ШИМ)

Для оценки качества прямого управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения системы электропривода конвейера, рассмотрено изменение момента нагрузки и заданной скорости показано в таблице 2.6.

Результаты работы системы электропривода приведены на рисунках 3.20 – 3.22.

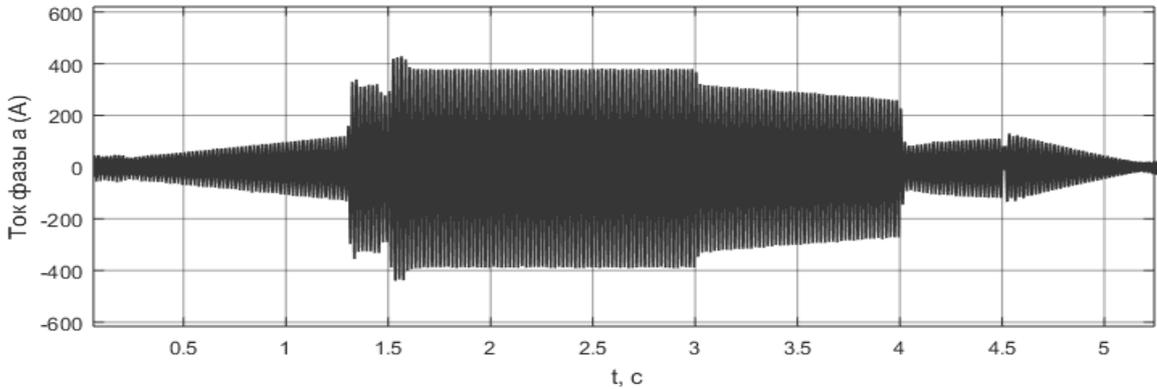


Рисунок 3.20 – График фазных токов сети

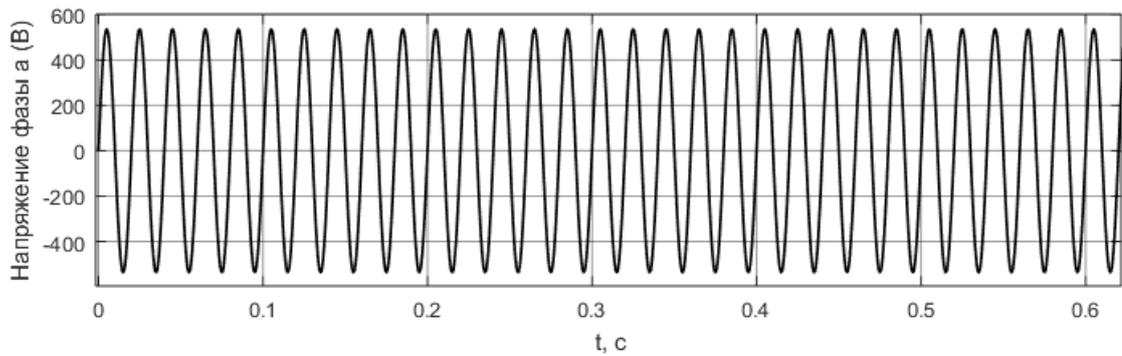


Рисунок 3.21 – График фазного напряжения сети

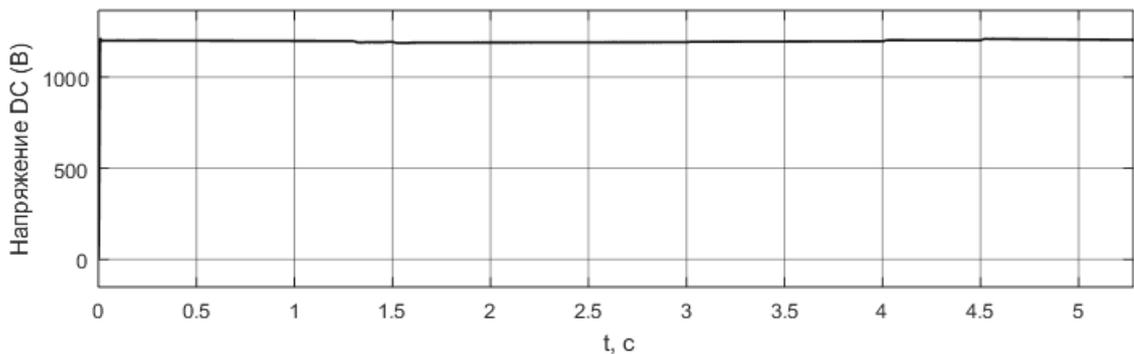


Рисунок 3.22 – График постоянного напряжения на выходе активного выпрямителя

В моменты времени $t = 1,3(c)$ и $t = 4,5(c)$ происходит значительное изменение момента нагрузки и скорости двигателей, однако на графике постоянного напряжения на выходе активного выпрямителя (см рисунок 3.22) видно, что постоянное напряжение всегда стабильно при значении $U_{dc} = 1200$ В при любом изменении момента нагрузки.

Таким образом, всегда обеспечивается качественное значение постоянного

напряжения на входе схемы инвертора, управляющий двигателем конвейера. Ток и напряжение сети имеют синусоидальную форму и совпадают их фазовые углы ($K_m \approx 1$).

Рассмотрим технологический процесс, в результате которого был получен график тока и напряжения сети, представленный на рисунке 3.23. В момент времени $t \leq 1,3(c)$ три двигателя запускают процесс, когда на конвейерах нет угля, и ток сети имеет небольшое значение ($I_a \leq 120A$). В момент времени $t = 1,3(c)$ показан максимальный момент нагрузки двигателя конвейера 1 ($M_{c1} = 550Nm$) и двигателя конвейера 2 ($M_{c2} = 590Nm$). В этот момент времени пусковой ток увеличивается ($I_a = 330A$), ток сети остается стабильным, не имеет пульсаций. В момент времени $t=1,5(c)$ появляется максимальный момент нагрузки двигателя конвейера 3 ($M_{c3}=800Nm$). Теперь ток сети увеличивается ($I_a = 430A$), к моменту времени $t = 1,6(c)$ ток быстро уменьшается до стабильного значения ($I_a = 378A$).

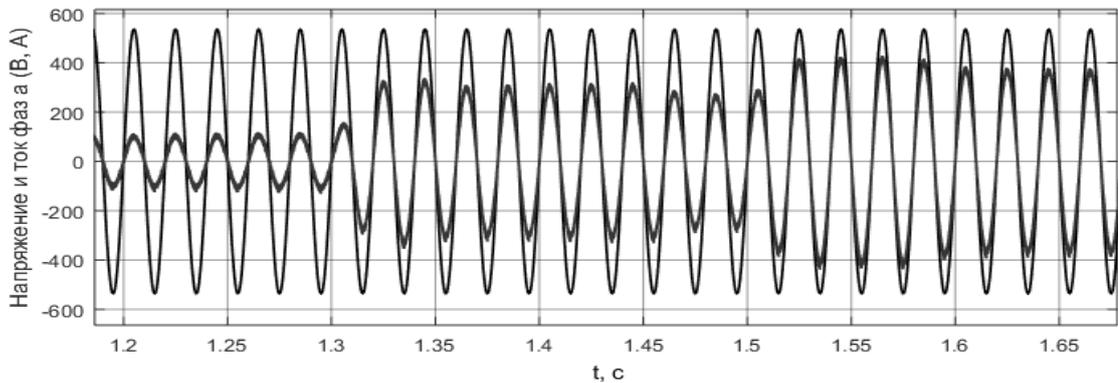


Рисунок 3.23 – График тока и напряжения сети при запуске двигателя и при внезапном моменте нагрузки

Когда электропривод конвейерной ленты работает в нормальном режиме на значении заданной скорости, ток всегда поддерживается на стабильном уровне ($I_a = 378A$, $U = 380\sqrt{2} В$) и перерегулирование отсутствует (рисунок 3.24).

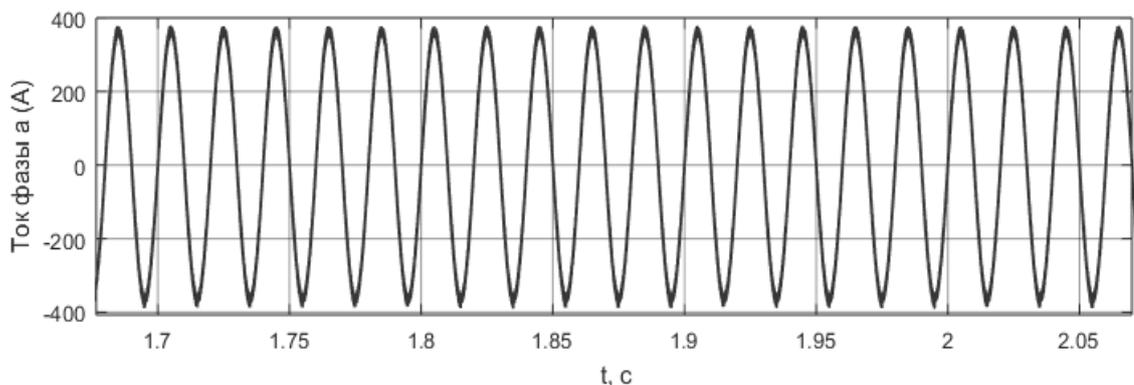


Рисунок 3.24 – График тока сети, когда двигатель работает на заданной скорости

В момент времени $t = 3(c)$ (рисунок 3.25), третий двигатель конвейера имеет пониженную скорость, на этот раз ток сети также уменьшается от $I_a = 378A$ до $I_a = 256A$ при $t = 3,9(c)$. В момент времени $t = 4(c)$, когда скорость двигателей 1 и 2 изменяется пониженного состояния до 0, происходит изменение крутящего момента нагрузки с $M_{c3} = 800 (Нм)$ до $M_{c3} = -800 (Нм)$. В это время ток сети сразу же изменяется обратно с отсутствием перерегулирования, и он имеет значение $I_a = 110A$ в момент времени $t = 4,49(c)$.

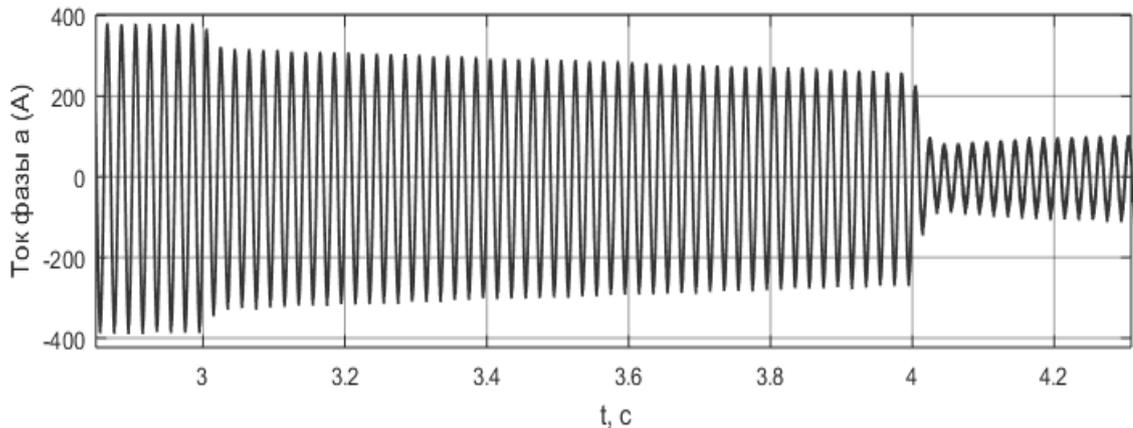


Рисунок 3.25 – График тока сети, когда двигатели уменьшают скорость и направление изменения момента нагрузки (M_{c3}) в третьем двигателе

В момент времени $t = 4,5c$ (рисунок 3.26), когда скорость двигателей 1 и 2 уменьшается до 0, момент нагрузки изменяется ($M_{c1} = -550Нм$, $M_{c2} = -590Нм$) сразу же, как ток сетки меняет направление но без перерегулирования.

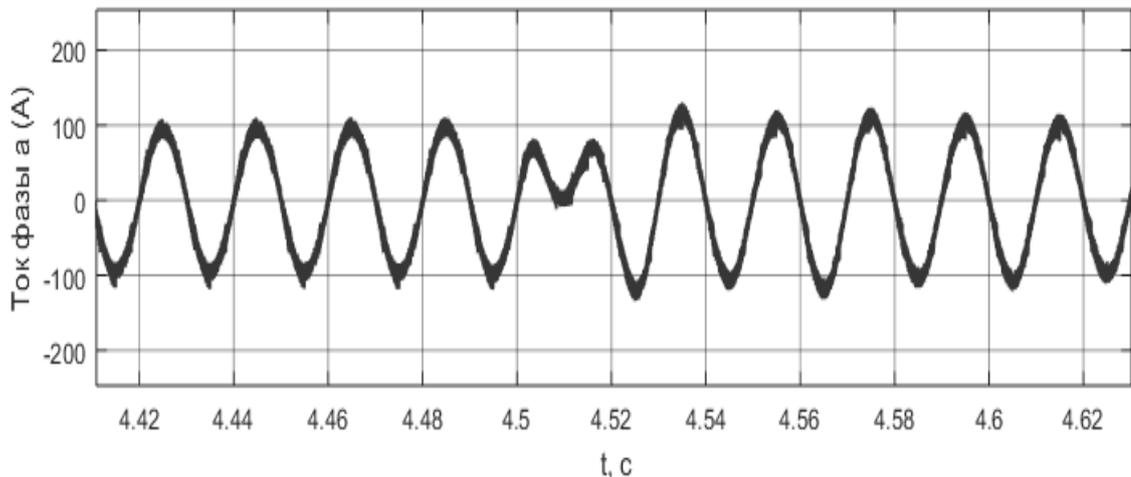


Рисунок 3.26 – График тока сети, когда 1-й и 2-й двигатели имеют обратный момент загрузки M_{c1} , M_{c2}

Процесс запуска - самый сложный рабочий процесс для системы электроприводов конвейеров, особенно с появлением очень больших противоположных моментов на валу

двигателя. Это увеличивает пусковой ток, что снижает напряжение сети. Используется инструмент FFT анализа в Matlab и Simulink для оценки степени искажения тока сети в рассматриваемой иммитационной модели (рисунок 3.27).

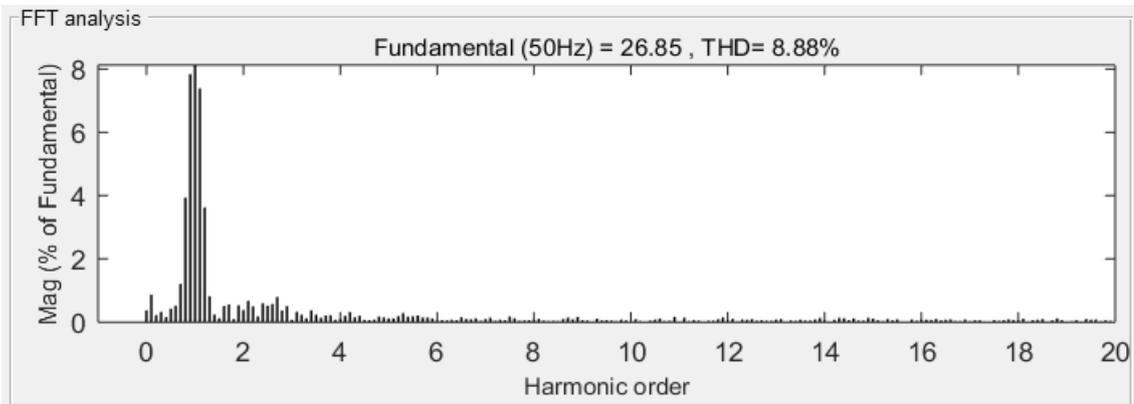


Рисунок 3.27 – Искажения тока сети, когда двигатели работают в режиме пуска

При использовании частотно-регулируемой системы электропривода с активным выпрямителем, уменьшающей гармонический состав тока сети, уровень скажений тока сети при запуске не превышает $THD_1 = 8,88\%$ (рисунок 3.27).

Когда система многодвигательного привода конвейерной ленты работает на стабильной скорости в нормальном режиме, уровень искажения тока сети всегда меньше значения равного $THD_1 = 3,13\%$ (рисунок 3.28). Когда нагрузка изменяется, то это не приводит к значительному искажению тока, потребляемого активным выпрямителем.

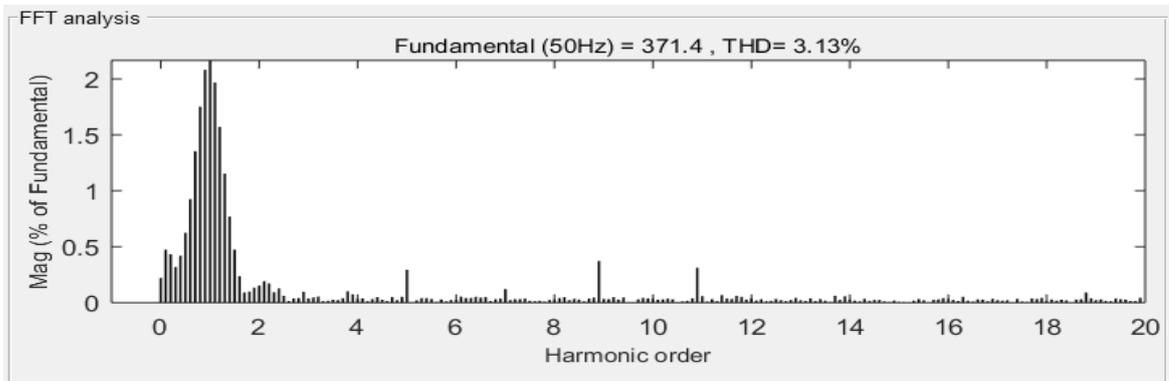


Рисунок 3.28 – Коэффициент искажения тока сети, когда двигатели работают на заданной скорости

Когда скорость вращения двигателей уменьшается, а момент нагрузки изменяется, динамические характеристики тока, электромагнитного момента и напряжения в сети значительно ухудшаются.

Однако при использовании управления активным выпрямителем по вектору напряжения система электропривода конвейера имеет небольшое искажение тока сети

($\text{THD}_I = 3,66\%$), система работает плавно и надежно (рисунок 3.29).

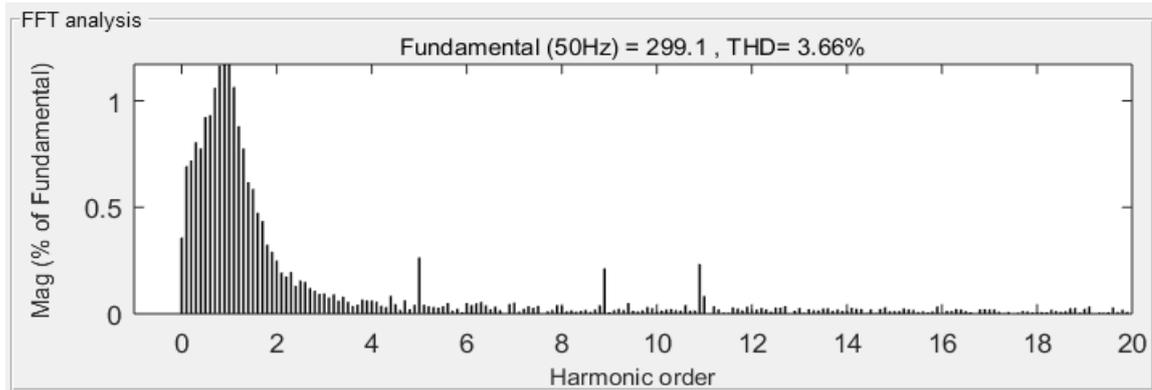


Рисунок 3.29 – Коэффициент искажения тока на сети, когда двигатели снижают скорость, а момент нагрузки меняет направление

Рассмотрим систему электропривода конвейера с двумя режимами работы активного выпрямителя (рисунок. 3.30).

В момент времени $t = 0 \div 4,5(\text{с})$ блок активного выпрямителя работает по принципу выпрямителя. Энергия передается от сети через активный выпрямитель на инвертор и электродвигатели. Применение активного выпрямителя позволило повысить коэффициент мощности K_M в системе конвейера, по сравнению с его значением при применении диодного выпрямителя. В результате $K_M \approx 1$;

В момент времени $t \geq 4,5(\text{с})$ активный выпрямитель работает по принципу инвертора. Энергия передается от двигателя через инвертор на активный выпрямитель и далее в сеть.

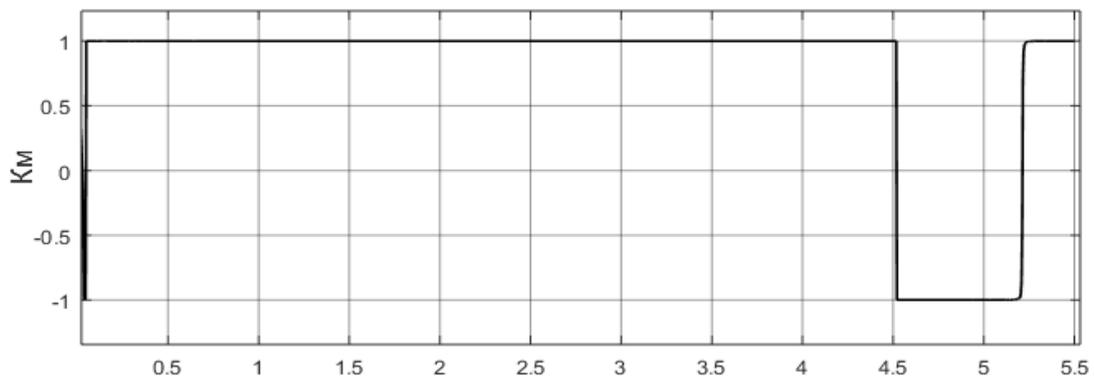


Рисунок 3.30 – Характеристика коэффициента мощности K_M

Зависимость коэффициента мощности от времени приведена на рисунке 3.31. Из графика видно, что в течение периода запуска ($t \leq 1,3\text{с}$), активная мощность увеличивается, но колеблется. В момент времени $t = 1,3(\text{с})$ момент нагрузки $M_{c1} = 550(\text{Нм})$, $M_{c2} = 590(\text{Нм})$ и при $t = 1,5(\text{с})$ момент нагрузки $M_{c3} = 800(\text{Нм})$ и активная

мощность в этот интервал времени остается неизменной.

В моменты времени $t = 3(c)$ и $t = 4(c)$ происходит сильное изменение момента нагрузки и частоты вращения двигателя, но характеристики активной мощности имеют незначительные колебания. В момент времени $t = 4,5 (c)$ M_{c1} и M_{c2} внезапно меняют направление, активный выпрямитель работает в режиме инвертора. Активная мощность имеет значение $p < 0$, что означает, что энергия будет возвращена в сеть через активный выпрямитель и индуктор L.

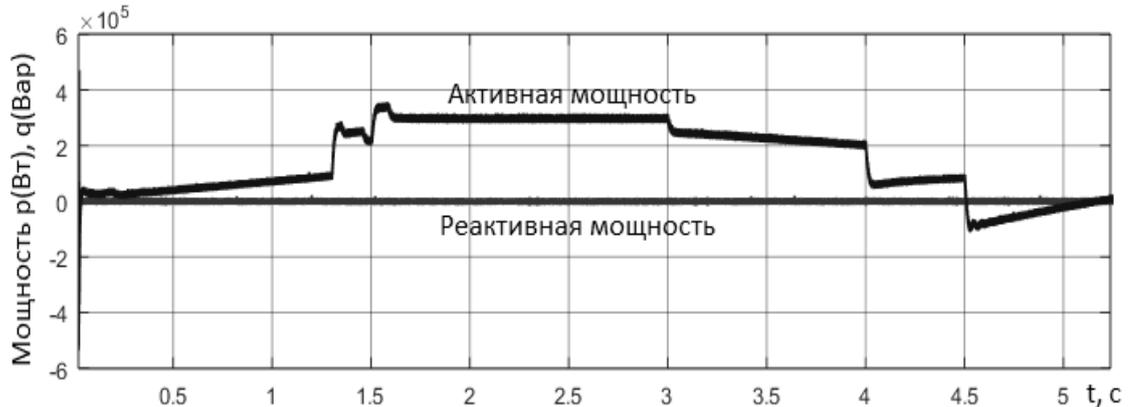


Рисунок 3.31 – Характеристики мгновенной активной и реактивной мощности, когда активный выпрямитель работает в режиме выпрямителя и режиме инвертора

Двусторонняя передача энергии является большим преимуществом метода прямого управления мощностью активного выпрямителя. Это энергосберегающее решение для системы при работе с частыми остановами, процессами торможения при одновременном устранении промежуточной цепи торможения при проектировании.

Значения коэффициента искажения тока сети в зависимости от применяемого метода компенсации высших гармоник в рассматриваемой системе электропривода приведены в таблице 3.1. Видно, что метод управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения имеет наименьшее искажение по току. Когда двигатели работают в режиме рекуперативного торможения, энергия возвращается в сеть через активный выпрямитель. Из графика на рисунке 3.30 и таблицы 3.1 видно преимущества электропривода конвейеров с активным выпрямлением в ПЧ: происходит снижение гармонических искажений сетевого тока ($THD_1 = 3,13\%$), а коэффициент мощности становится близким к единице, значение тока потребляемого электроприводом меньше, чем в методах активного фильтра и 12-пульсного выпрямителя.

Таблица 3.1 – Результаты оценки гармонических искажений тока сети с помощью моделирования в Matlab и Simulink

Метод	ТНД _I (ном)%
Активный выпрямитель	3,13
Активный фильтр	4,25
Схема 12-пульсного выпрямителя	6,86
Неуправляемый выпрямитель	17,7

где ТНД_I(ном) – коэффициент общегармонических искажений тока сети при стабильной работе двигателя на заданной скорости.

3.3 Выводы по Главе 3

В третьей главе описываются математические модели, структуры и режимы работы активных выпрямителей. Проведен анализ метода системы управления активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения.

Разработана имитационная модель системы электропривода с использованием метода управления активным выпрямителем по вектору напряжения с несколькими инверторами и метода прямого управления моментом для конвейерных двигателей.

Создана имитационная модель системы электропривода с преобразователем частоты и с активным выпрямителем. Результаты показали, что в методе с активным выпрямителем ток близок к синусоидальной форме, коэффициент мощности $K_m \approx 1$, искажение тока сети $ТНД_I\% = 3,13\%$.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА МЕТОДА ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ АКТИВНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ ЧЕРЕЗ НЕСКОЛЬКО ТАБЛИЦ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ КЛЮЧЕЙ

4.1 Анализ системы управления активным выпрямителем напряжения

Структура управления VOC использует токовый контур управления, основанный на преобразовании между фиксированной системой координат α - β и вращающейся системой координат d-q. Следовательно, окончательная конфигурация и эксплуатационные характеристики системы управления напряжением (VOC) в значительной степени зависят от качества применяемой стратегии управления током [48, 88]. Другая стратегия управления, называемая прямым управлением мощностью (DPC – Direct Power Control), основана на мгновенных контурах управления активной и реактивной мощностью показано на рисунке 4.1 [46, 100, 103].

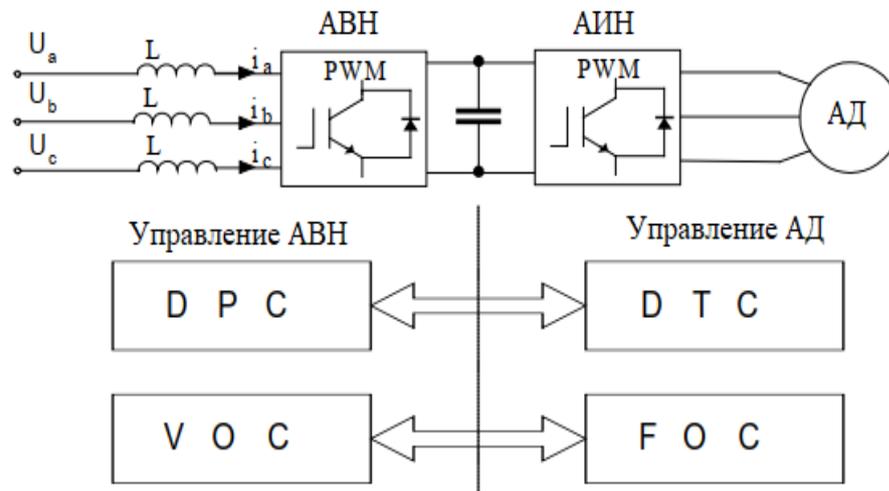


Рисунок 4.1 – Взаимосвязь между управлением АВН и ШИМ инвертор – АД [46]

В DPC нет внутренних контуров управления током и блока модуляции ШИМ, потому что состояния переключения преобразователя выбираются таблицей переключения на основе мгновенных ошибок между заданными и расчетными значениями активной и реактивной мощности. Поэтому ключевым моментом реализации DPC является правильная и быстрая оценка активной и реактивной мощности линии. Методы управления для активного выпрямителя могут быть в целом классифицированы как основанные на напряжении и виртуальном потоке, как показано на рисунке 4.2.

где VF-VOC – управление потребляемым током из сети на основе виртуального потока;

VF-DPC – прямое управление мощностью на основе виртуального потока.

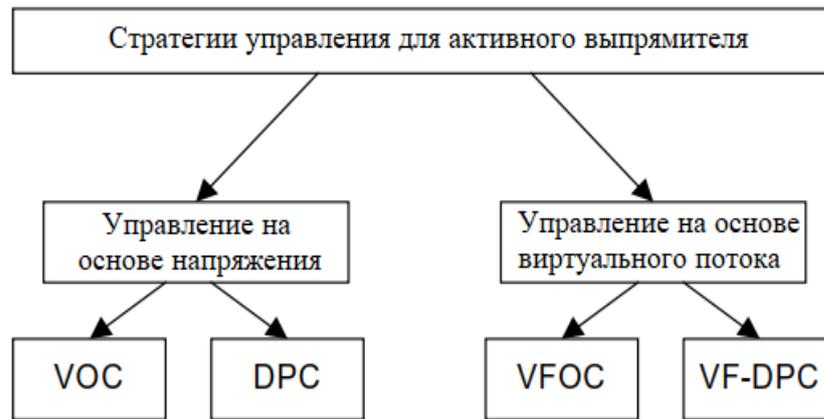


Рисунок 4.2 – Классификация методов управления активным выпрямителем

Так же, как в FOC асинхронного двигателя [88], применяются управление на основе напряжения (VOC) и управление на основе потока (VFOC – Virtual Flux Oriented Control) для активного выпрямителя на основе преобразования статической системы координат α - β в возвращающуюся систему координат d-q. Обе стратегии гарантируют быстрый переходный процесс и высокие статические характеристики благодаря внутренним контурам управления током. Следовательно, окончательная конфигурация и производительность системы во многом зависят от качества применяемой текущей стратегии управления. Самое простое решение основано на вычислении разницы между измеренным значением тока и требуемым током для обеспечения точного управления, стабильного напряжения постоянного тока и надежной системы управления. Однако недостаток управления по отклонению тока заключается в том, что его средняя частота коммутации изменяется в зависимости от тока нагрузки, что приводит к неравномерной и случайной схеме переключения. Поэтому, это влияет на эффективность работы выпрямителя и сложно проектировать систему коммутации имея LC-фильтр на входе ПЧ.

Можно отметить, что метод прямого управления мощностью АВН имеет много общего с методом прямого управления моментом асинхронного двигателя и имеет те же преимущества, что и метод векторного управления: превосходная динамика, работа на постоянной частоте коммутации [4, 96].

4.2 Метод прямого управления мощностью активного выпрямителя

Основная идея метода DPC аналогична известному методу прямого управления крутящим моментом для асинхронного двигателя. Метод DPC был предложен в [103, 115], а затем разработан в [100]. Метод DPC контролирует мгновенную активную

мощность (p) и реактивную мощность (q) вместо управления крутящим моментом и потоком статора в DTC.

Структурная схема системы прямого управления мощностью активного выпрямителя приведена на рисунке 4.3.

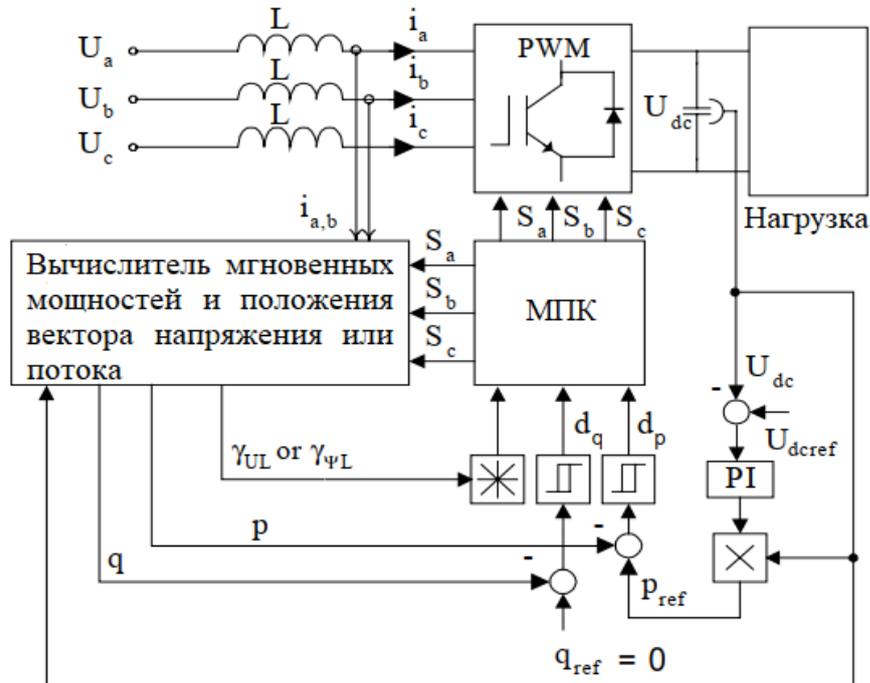


Рисунок 4.3 – Структурная схема системы управления DPC [46]

Где МПК – матрица переключения ключей;

γ_{UL} – положение метода управления DPC;

$\gamma_{\Psi L}$ – положение метода управления VF-DPC.

Требуемое значение реактивной мощности q_{ref} (устанавливается в ноль для коэффициента мощности единица) и активной мощности p_{ref} (поступающей от внешнего регулятора напряжения PI-DC) сравниваются с оценочными значениями q и p в регуляторах реактивной и активной мощности гистерезиса соответственно выражениям (4.1) – (4.2).

$$d_q = 1 \text{ если } q < q_{ref} - H_q; \quad (4.1)$$

$$d_q = 0 \text{ если } q > q_{ref} + H_q, \quad (4.2)$$

и так же регулятора активной мощности, по выражениям (4.3) – (4.4):

$$d_p = 1 \text{ если } p < p_{ref} - H_p; \quad (4.3)$$

$$d_p = 0 \text{ если } p > p_{ref} + H_p, \quad (4.4)$$

где H_q & H_p – гистерезис мощности.

Оцифрованные переменные d_r , d_q и положение вектора напряжения $\gamma_{UL} = \arctg(u_{L\alpha}/u_{L\beta})$ или положение вектора потока $\gamma_{\Psi L} = \arctg(\Psi_{L\alpha}/\Psi_{L\beta})$ образуют цифровое слово, которое путем доступа к адресу справочной таблицы выбирает соответствующий вектор напряжения в соответствии с таблицей переключения (описано на рисунке 4.4).

Область положения вектора напряжения или потока делится на двенадцать секторов, как показано на рисунке 4.4, и сектора могут быть численно выражены по формуле (4.5):

$$(n - 2)\frac{\pi}{6} \leq \gamma_n < (n - 1)\frac{\pi}{6}, \quad (4.5)$$

где $n = 1, 2, \dots, 12$

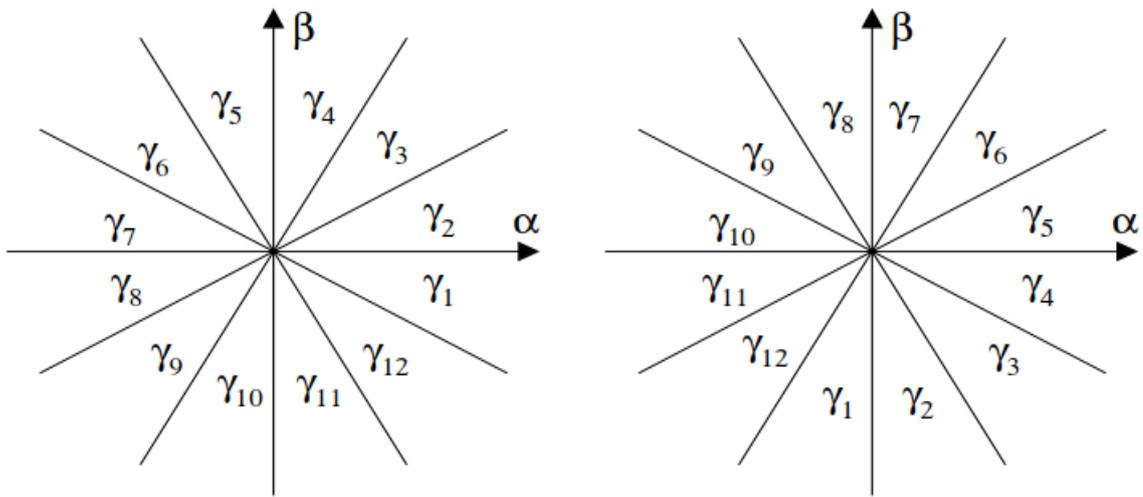


Рисунок 4.4 – Выбор сектора для DPC и VF-DPC [46]

Обратите внимание, что частота дискретизации должна быть примерно в несколько раз выше средней частоты переключения. Это очень простое решение позволяет точно управлять мгновенной активной и реактивной мощностью, а ошибки ограничиваются только диапазоном гистерезиса. Преобразование во вращающиеся координаты не требуется, и уравнения легко реализуются. Этот метод имеет дело с мгновенными переменными, поэтому оценочные значения содержат не только единичные компоненты, но и гармонические компоненты. Эта особенность также улучшает общий коэффициент мощности и эффективность [100].

На входе АВН мгновенное значение активной и реактивной мощности рассчитывается по следующим формулам (4.6) – (4.7) [103]:

$$p = u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta} \quad (4.6)$$

$$q = u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta} \quad (4.7)$$

Для метода управления активным выпрямителем VF-DPC, активная и реактивная мощность рассчитывается по следующим формулам (4.8) – (4.9):

$$p = \omega \cdot (\Psi_{L\alpha} i_{L\beta} - \Psi_{L\beta} i_{L\alpha}) \quad (4.8)$$

$$p = \omega \cdot (\Psi_{L\alpha} i_{L\alpha} + \Psi_{L\beta} i_{L\beta}) \quad (4.9)$$

На рисунке 4.5 показано, что пространственное положение вектора напряжения определяет мгновенную активную и реактивную мощность преобразователя, а также оказывает косвенное влияние на индуктивное напряжение, на фазовый угол и амплитуду тока в линии. Следовательно, схемы различия таблиц переключения могут применяться для управления DTC и DPC. Поэтому на условия управления влияют следующие факторы: мгновенная мощность и пульсации тока, частота переключения и динамические характеристики.

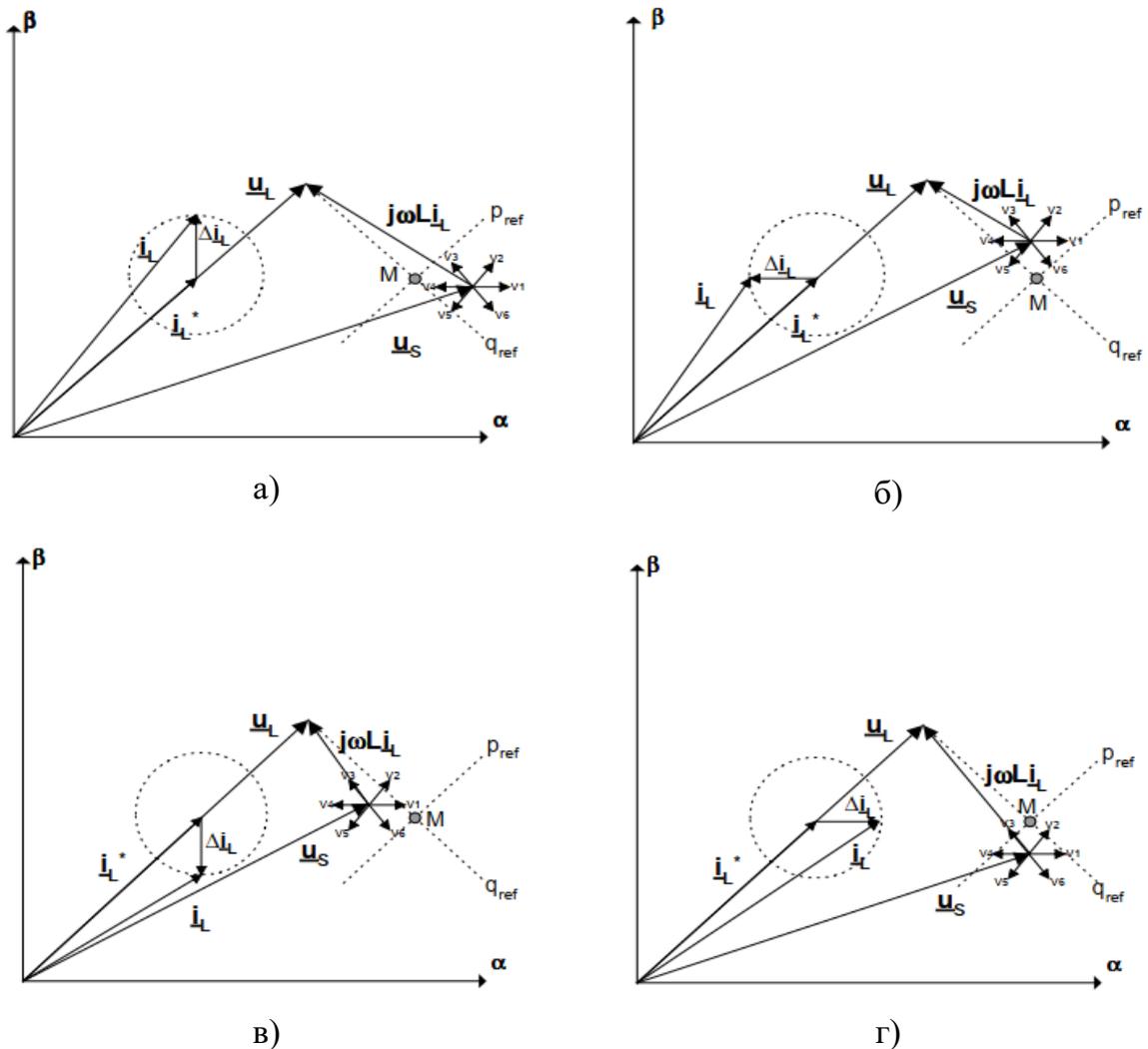


Рисунок 4.5 – Мгновенное изменение мощности: а) $p_{ref} < p, q_{ref} > q$ (0,1); б) $p_{ref} > p, q_{ref} > q$ (1,1); в) $p_{ref} > p, q_{ref} < q$ (1,0); г) $p_{ref} < p, q_{ref} < q$ (0,0)

Для активного выпрямителя мы имеем постоянную частоту сети и изменяется только мгновенная мощность. На рисунке 4.5 представлены четыре различные ситуации, которые иллюстрируют изменения мгновенной мощности. Точка М представляет требуемые значения активной и реактивной мощности. Выбор вектора сделан таким образом, чтобы погрешность между q и q_{ref} была в пределах (уравнения (4.6) – (4.9)). Это зависит не только от погрешности амплитуды, но и от направления q , как показано на рисунке 4.6.

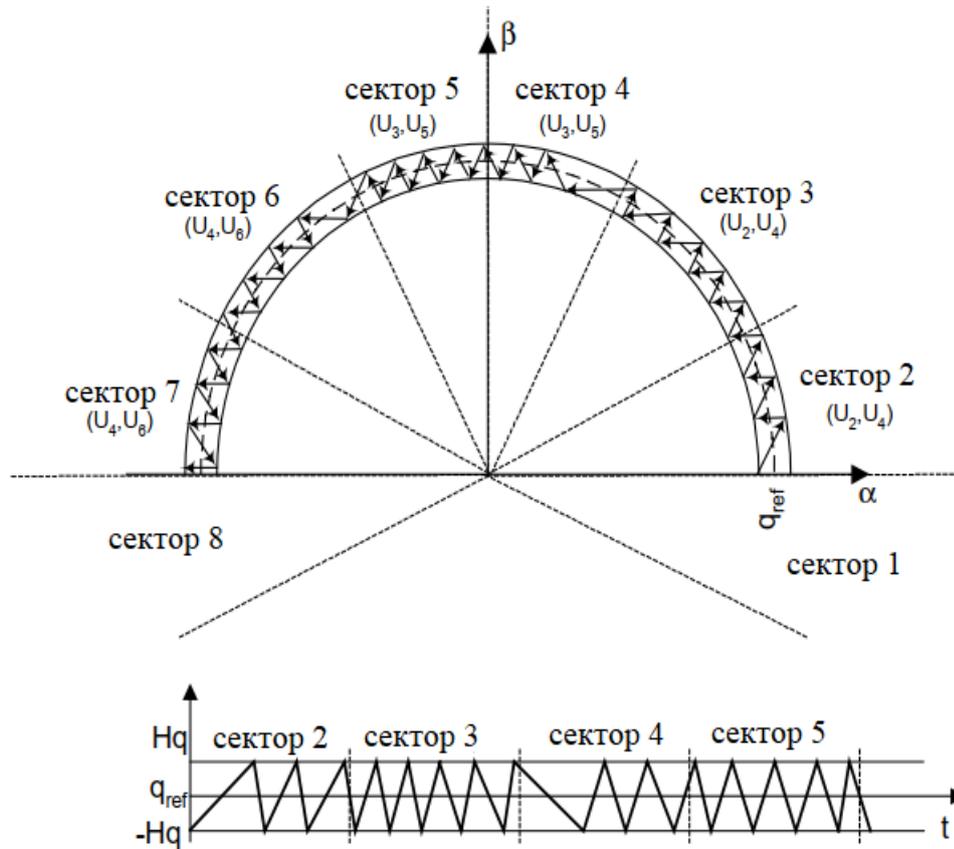


Рисунок 4.6 – Выбор векторов напряжения для реактивной мощности q

Некоторое поведение DPC не является удовлетворительным. Например, когда мгновенный вектор реактивной мощности близок к границе сектора, два из четырех возможных активных векторов ошибочны. Эти неправильные векторы могут изменять только мгновенную активную мощность без коррекции ошибки реактивной мощности.

Это хорошо видно по току. Несколько методов улучшения поведения DPC в секторе связей хорошо известны. Одним из них является добавление большего количества секторов или уровней гистерезиса. Поэтому таблица переключения обычно строится с разницей в [59]:

– количество секторов;

- динамические характеристики;
- двух- и трехуровневые гистерезисные регуляторы.

Обычно плоскость векторов делится на 6 (формула 4.10) или 12 (формула 4.11) секторов (рисунок 4.7). Он влияет на построение таблицы переключения (таблица 4.1).

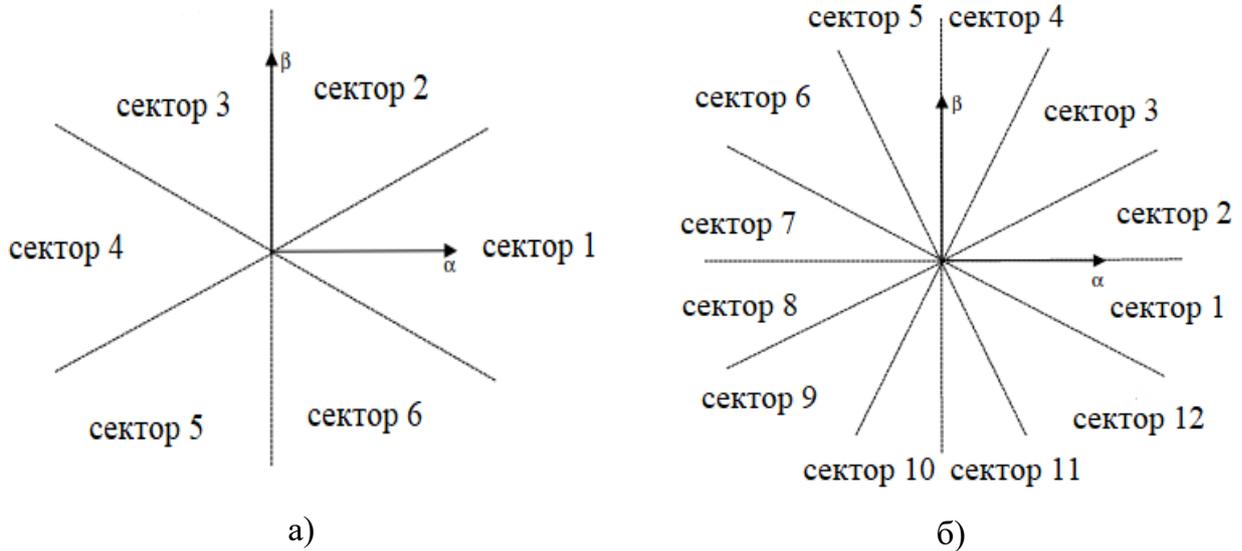


Рисунок 4.7 – Напряжение плоскости с а) 6 секторами б) 12 секторами

$$(2n - 3) \frac{\pi}{6} \leq \gamma_n < (2n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.10)$$

$$(n - 2) \frac{\pi}{6} \leq \gamma_n < (n - 1) \frac{\pi}{6} \quad n = 1, 2, \dots, 12 \quad (4.11)$$

Таблица переключения ключей называется ТПК.

Таблица 4.1 – Таблица переключения для 6 секторов [93]

d_p	d_q	Сектор А
1	0	U_A
	1	U_0
0	0	U_B
	1	U_A
$U_A=U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001), U_6(101)$ $U_B=U_6(101), U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001)$ $U_0=U_0(000), U_7(111)$		

Таблица 4.2 – Таблица переключения для 12 секторов [88]

d_p	d_q	Сектор А	Сектор В
1	0	U_A	U_7
	1	U_0	U_7
0	0	U_B	
	1	U_A	
$U_A=U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001), U_6(101)$ $U_B=U_6(101), U_1(100), U_2(110), U_3(010), U_4(011), U_5(001)$ $U_0=U_0(000), U_7(111)$			

Таблицу 4.2 можно переписать следующим образом (таблица 4.3):

Таблица 4.3 – ТПК1

d_p	d_q	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	U_7	U_1	U_7	U_2	U_7	U_3	U_7	U_4	U_7	U_5	U_7	U_6
	1	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0	U_7	U_0
0	0	U_6	Γ_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

Когда область положения вектора напряжения делится на двенадцать секторов, область между соседними векторами содержит два сектора. Сектор А расположен ближе к U_A , а сектор В ближе к U_B .

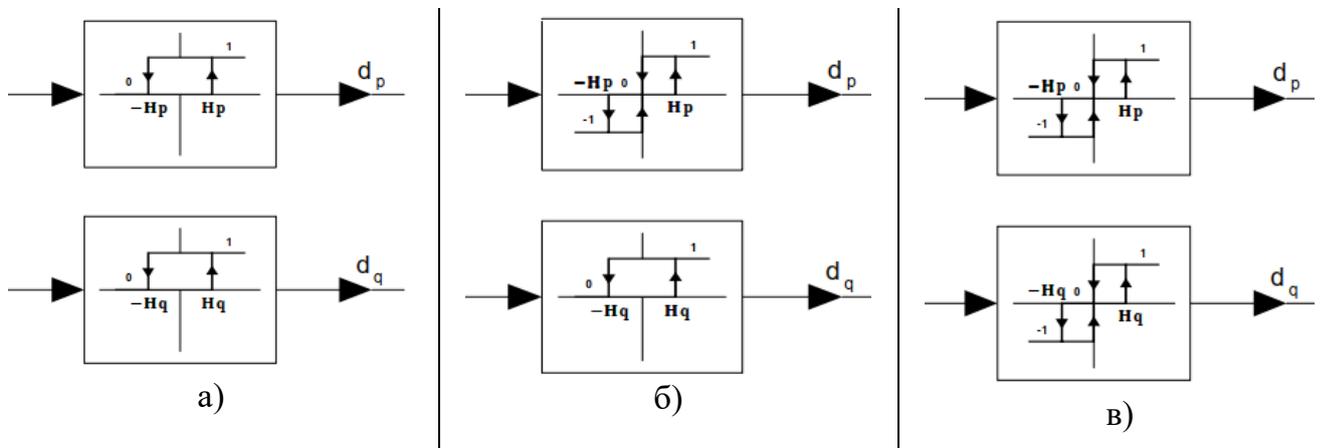


Рисунок 4.8 – Гистерезисные контроллеры: а) двухуровневые; б) смешанные два и три уровня; в) три уровня

Регуляторы, предложенные в [100] в классическом ЦОД, представляют собой двухуровневые компараторы для мгновенной активной и реактивной мощности (рисунок 4.8а). Трехуровневые компараторы могут обеспечить дальнейшие улучшения.

Возможные комбинации гистерезисных контроллеров для активной и реактивной мощности представлены на рисунке 4.8.

Двухуровневые гистерезисные регуляторы для мгновенной реактивной мощности могут быть описаны как:

если $\Delta q > H_q$, то $d_q = 1$;

если $-H_q \leq \Delta q \leq H_q$ и $d\Delta q/dt > 0$, то $d_q = 0$;

если $-H_q \leq \Delta q \leq H_q$ и $d\Delta q/dt < 0$, то $d_q = 1$;

если $\Delta q < -H_q$, то $d_q = 0$.

Трехуровневые регуляторы гистерезиса для мгновенной активной мощности могут быть описаны как сумма двухуровневого гистерезиса:

если $\Delta p > H_p$, то $d_p = 1$;

если $0 \leq \Delta p \leq H_p$ и $d\Delta p/dt > 0$, то $d_p = 0$;

если $0 \leq \Delta p \leq H_p$ и $d\Delta p/dt < 0$, то $d_p = 1$;

если $-H_p \leq \Delta p \leq 0$ и $d\Delta p/dt > 0$, то $d_p = -1$;

если $-H_p \leq \Delta p \leq 0$ и $d\Delta p/dt < 0$, то $d_p = 0$;

если $\Delta p < -H_p$, то $d_p = -1$.

В системе прямого управления мощностью активного выпрямителя влияние таблиц переключения очень велико на характеристики тока на входе выпрямителя. В процессе выбора состояния вектора напряжения это приведет к изменению активной и реактивной мощности непосредственно на входе выпрямителя. Посредством выбора отклонений активной мощности, реактивной мощности (d_p , d_q) и положения сектора (N) напряжения сети, можно разделить плоскость напряжения сети на 6 или 12 секторов. Однако, согласно опубликованным исследованиям, использование таблицы переключения шести секторов имеет много недостатков, поэтому оно не рассматривается в диссертации [93]. В этой диссертации метод прямого управления мощностью активного выпрямителя будет только рассматривать использование таблицы переключения для 12 секторов напряжения (ТПК1).

4.3 Оценка метода прямого управления мощностью активного выпрямителя через несколько таблиц переключения ключей

Метод управления DPC имеет частоту переключения в зависимости величины зоны нечувствительности регулятора реактивной и активной мощности в таблице переключения. Нулевые векторы таблицы переключения будут выбираться последовательно, так как это влияет на частоту переключения [102]. Когда активный выпрямитель работает, если имеется большое отклонение вектора реактивной мощности, это приводит к ошибке вектора активного напряжения. Эти неправильные векторы изменяют активную мощность, но не стабилизируют значение реактивной мощности. Это вызывает искажение тока на входе активного выпрямителя.

Классическая таблица переключения (ТПК1) вызывает пульсации и периодические колебания реактивной мощности, которые искажают ток на входе. Один из подходов основан на знаке и величине изменения мгновенной активной и реактивной мощности для выбора оптимального вектора напряжения в каждом секторе с помощью новой таблицы. Это улучшит пульсации мощности, уменьшит гармоники тока, стабилизирует характеристики мощности при изменении мощности нагрузки. Соответствующие таблицы переключений (ТПК1-ТПК5) представлены в литературе [4, 59, 73, 74, 85, 88, 102, 103].

Большинство таблиц формируются с помощью эксперимента на модели. Экспериментальное построение таблиц заключается в том, что для определённых положений вектора фазного напряжения сети с помощью компьютерного моделирования рассчитываются изменения активной и реактивной составляющей мгновенной мощности при различных состояниях ключей АВН (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Мгновенные активные и реактивные изменения из-за приложенных векторов напряжении

Состояния АВН		Фаза вектора напряжения сети [ωt]				
		-30^0	-15^0	0^0	15^0	30^0
111	p					
	q					
101	p					
	q					

Продолжение таблицы 4.4

100	p					
	q					
110	p					
	q					

Для изучения прямого управления мощностью активного выпрямителя, в диссертации рассматривается таблица переключения ТПК1 и следующая таблица 4.5 (ТПК2) [103], которые моделируются и анализируются с помощью систем Matlab и Simulink.

Таблица 4.5 – ТПК2

d_p	d_q	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5
	1	U_2	U_7	U_3	U_0	U_4	U_7	U_5	U_0	U_6	U_7	U_1	U_0
0	0	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

Далее была предложена таблица переключения ТПК3 (таблица 4.6) [101]. Моделирование и экспериментальные исследования показывают, что использование таблицы 4.4 (ТПК3) позволяет снизить потери, повысить коэффициент полезного действия преобразователя до 95.8%.

Таблица 4.6 – ТПК3

d_p	d_q	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	U_6	U_7	U_1	U_0	U_2	U_7	U_3	U_0	U_4	U_7	U_5	U_0
	1	U_7	U_7	U_0	U_0	U_7	U_7	U_0	U_0	U_7	U_7	U_0	U_0
0	0	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

Другая таблица (таблица 4.7), предложенная в [85]. Будем называть её ТПК4. Экспериментальные исследования показали, что при применении этой таблицы АВН имеет на 0,3% больший коэффициент мощности и на 1,1% больший КПД по сравнению с АВН, в котором применяется ТПК2 [4, 101].

Таблица 4.7 – ТПК4

d_p	d_q	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5
	1	U_7	U_7	U_0	U_0	U_7	U_7	U_0	U_0	U_7	U_7	U_0	U_0
0	0	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

Другая таблица (таблица 4.8), предложенная в [4]. Будем называть её ТПК5.

Таблица 4.8 – ТПК5

d_p	d_q	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5
	1	U_0	U_7	U_7	U_0	U_0	U_7	U_7	U_0	U_0	U_7	U_7	U_0
0	0	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6
	1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

Таблицы переключений (ТПК1-ТПК5) имеют функцию уменьшения количества включений/выключений полупроводниковых вентилях для уменьшения коммутационных потерь, но время отклика мощности остается низкой. Другим решением для улучшения динамики активной и реактивной мощности и уменьшения гармоник тока является рассмотрение выбора вектора напряжения не только в предыдущий момент, но и в последующие моменты времени [73, 102, 103].

По формуле (3.17) рассчитаем ток сети в системе координат $0\alpha\beta$ следующим образом (4.12) – (4.13):

$$\frac{di_{\alpha}}{dt} = \frac{1}{L}(u_{\alpha} - u_{s\alpha} - Ri_{\alpha}) \quad (4.12)$$

$$\frac{di_{\beta}}{dt} = \frac{1}{L}(u_{\beta} - u_{s\beta} - Ri_{\beta}) \quad (4.13)$$

Из формул (4.12) и (4.13) видно, что ток i_{α} , i_{β} регулируется соответствующим вектором напряжения. Следующее мгновенное изменение тока рассчитывается по формулам (4.14) – (4.15):

$$\Delta i_{\alpha} = i_{\alpha}(k+1) - i_{\alpha}(k) = \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}(k) - u_{s\alpha}(k)) \quad (4.14)$$

$$\Delta i_{\beta} = i_{\beta}(k+1) - i_{\beta}(k) = \frac{T_s}{L}(u_{\beta}(k) - u_{s\beta}(k)) \quad (4.15)$$

Из формул (4.6) и (4.7) рассчитайте изменение мгновенной активной и реактивной мощности следующим образом (4.16) – (4.17):

$$\Delta p = u_{\alpha}(k) \cdot \Delta i_{\alpha} + u_{\beta}(k) \cdot \Delta i_{\beta} \quad (4.16)$$

$$\Delta q = u_{\beta}(k) \cdot \Delta i_{\alpha} - u_{\alpha}(k) \cdot \Delta i_{\beta} \quad (4.17)$$

Из формул (4.16) и (4.17) получим выражения (4.18) и (4.19):

$$\Delta p = \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}^2(k) + u_{\beta}^2(k)) - \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}(k) \cdot u_{s\alpha}(k) + u_{\beta}(k) \cdot u_{s\beta}(k)) \quad (4.18)$$

$$\Delta q = \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}(k) \cdot u_{s\beta}(k) - u_{\beta}(k) \cdot u_{s\alpha}(k)) \quad (4.19)$$

Основной метод управления DPC имеет 6 векторов напряжения с ненулевой величиной ($U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6$) и два вектора напряжения с нулевой величиной (U_0, U_7). В методе улучшения DPC для выпрямителя будут использоваться 7 векторов напряжения для увеличения отклика мгновенной активной и реактивной мощности. Изменения активной и реактивной мощности, соответствующие $i = 0, 1, 2 \dots, 6$, следующие выражения (4.20) – (4.21):

$$\Delta p = \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}^2(k) + u_{\beta}^2(k)) - \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}(k) \cdot u_{s\alpha i} + u_{\beta}(k) \cdot u_{s\beta i}) \quad (4.20)$$

$$\Delta q = \frac{T_s}{L}(u_{\alpha}(k) \cdot u_{s\beta i} - u_{\beta}(k) \cdot u_{s\alpha i}) \quad (4.21)$$

Вектор напряжения источника в системе координат $0\alpha\beta$ описывается следующим образом (4.22):

$$u_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

где $\|u_{\alpha\beta}\| = E$, $u_\alpha = E \cos(\gamma)$, $u_\beta = E \sin(\gamma)$, $\gamma = \omega t = \arctg(u_\beta/u_\alpha)$ и $\pi/6 \leq \gamma \leq 11\pi/6$.

Для вектора напряжения выпрямителя u_s компоненты пространственного вектора напряжения $u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$ в состояниях переключения показаны в следующей таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Пространственные векторы напряжения выпрямителя

u_{si}	u_a	u_b	u_c	u_{sai}	$u_{s\beta i}$
0	0	0	0	0	0
1	$2/3U_{dc}$	$-1/3U_{dc}$	$-1/3U_{dc}$	$\sqrt{2/3}U_{dc}$	0
2	$1/3U_{dc}$	$1/3U_{dc}$	$-2/3U_{dc}$	$1/\sqrt{6}U_{dc}$	$1/\sqrt{2}U_{dc}$
3	$-1/3U_{dc}$	$2/3U_{dc}$	$-1/3U_{dc}$	$-1/\sqrt{6}U_{dc}$	$1/\sqrt{2}U_{dc}$
4	$-2/3U_{dc}$	$1/3U_{dc}$	$1/3U_{dc}$	$-\sqrt{2/3}U_{dc}$	0
5	$-1/3U_{dc}$	$-1/3U_{dc}$	$2/3U_{dc}$	$-1/\sqrt{6}U_{dc}$	$-1/\sqrt{2}U_{dc}$
6	$1/3U_{dc}$	$-2/3U_{dc}$	$1/3U_{dc}$	$1/\sqrt{6}U_{dc}$	$-1/\sqrt{2}U_{dc}$

Вектор напряжения выпрямителя в системе координат $0\alpha\beta$ описывается следующим образом (4.23):

$$u_{s\alpha\beta} = [u_{s\alpha} \quad u_{s\beta}]^T, \quad \|u_{s\alpha\beta}\| = \sqrt{2/3} \cdot U_{dc} \quad (4.23)$$

Среднее изменение активной и реактивной мощности показано следующим образом (4.24) – (4.25):

$$\overline{\Delta p_i} = \frac{\Delta p_i}{\frac{T_s}{L} \|u_{\alpha\beta}\| \cdot \|u_{s\alpha\beta}\|} = \frac{\|u_{\alpha\beta}\|}{\|u_{s\alpha\beta}\|} - (\cos(\gamma) \cdot \bar{u}_{sai} + \sin(\gamma) \cdot \bar{u}_{s\beta i}) \quad (4.24)$$

$$\overline{\Delta q_i} = \frac{\Delta q_i}{\frac{T_s}{L} \|u_{\alpha\beta}\| \cdot \|u_{s\alpha\beta}\|} = \cos(\gamma) \cdot \bar{u}_{s\beta i} - \sin(\gamma) \cdot \bar{u}_{sai} \quad (4.25)$$

Из уравнений (4.24) и (4.25) видно, что изменение реактивной мощности во всех секторах имеет синусоидальную форму для всех напряжений выпрямителя u_s . Изменение активной мощности в виде синусоиды смещения показано на рисунках 4.9 и 4.10.

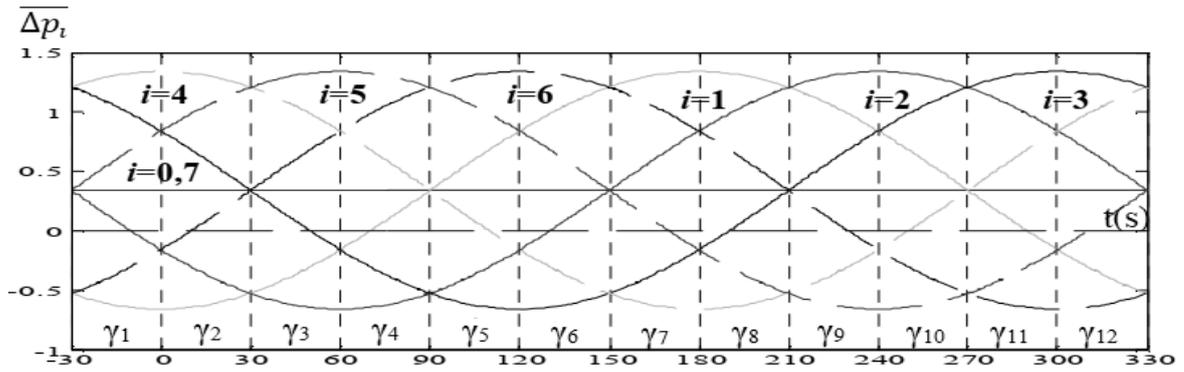


Рисунок 4.9 – Векторы напряжения изменяют мгновенную активную мощность $\overline{\Delta p_i}$

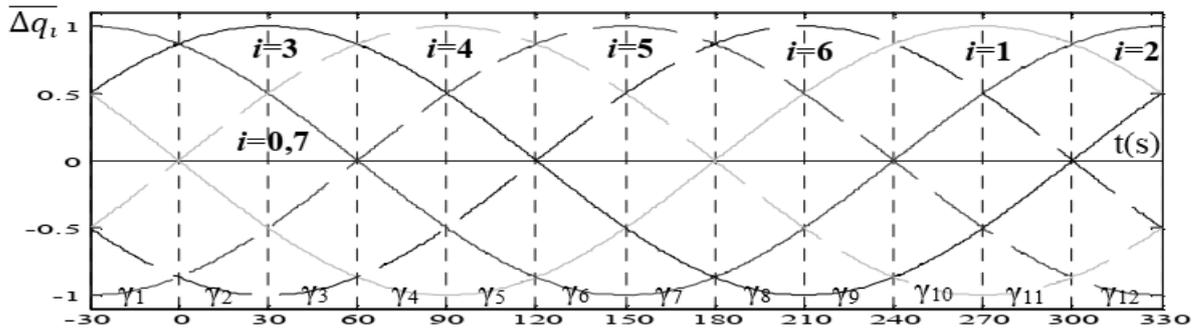


Рисунок 4.10 – Векторы напряжения изменяют мгновенную реактивную мощность Δq_i

Синтез новой таблицы переключения, основанный на знаке и величине изменения активной и реактивной мощности для каждого сектора, показан на рисунках 4.9 и 4.10. Например, для первого сектора знак изменения активной и реактивной мощности показан в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Знак изменения мгновенной мощности в секторе 1

$\overline{\Delta p_1}$		$\overline{\Delta q_1}$		
$>0 \leftrightarrow d_p=1$	$<0 \leftrightarrow d_p=0$	$>0 \leftrightarrow d_q=1$	$=0$	$<0 \leftrightarrow d_q=0$
U_4, U_3, U_5, U_0	U_1, U_6	U_2, U_3, U_1	U_0	U_5, U_6, U_4

Комбинация выходного сигнала регулятора мощности (d_p, d_q) и вектора напряжения выпрямителя в первом секторе показана в таблице 4.11:

Таблица 4.11 – Выбор векторы напряжения выпрямителя в секторе 1

Сектор 1		$\overline{\Delta q_1}$	
		$>0 \leftrightarrow d_q=1$	$<0 \leftrightarrow d_q=0$
$\overline{\Delta p_1}$	$>0 \leftrightarrow d_p=1$	U_3	U_4, U_5
	$<0 \leftrightarrow d_p=0$	U_1	U_6

где напряжение выпрямителя $u_{si} \equiv U_i$.

Применяется ко всем секторам, которые получают таблицу переключения как показано в таблице 4.12:

Таблица 4.12 – ТПК6

d_p	d_q	Векторы напряжения переключения											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5
	1	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3
0	0	U_6	U_1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6
	1	U_1	U_2	U_2	U_3	U_3	U_4	U_4	U_5	U_5	U_6	U_6	U_1

Таблица ТПК6 показывает, что при переключении ключей не будет вектора напряжения U_0 .

В рамках данной диссертации работы будет выполнено моделирование всех таблиц переключений вектора напряжения, предложенных выше. Из результатов моделирования, уровень электромагнитной совместимости (ЭМС) выберет оптимальная таблица для системы многодвигательного электропривода конвейерной ленты.

4.4. Имитационного моделирования системы электропривода конвейера с активным выпрямителем с прямым управлением мощностью

На рисунке 4.11, приняты следующие обозначения: 1 – трехфазный источник; 2, 8, 9, 10 – датчик тока и напряжения; 3 – индуктивность реакторов; 4 – активный выпрямитель; 5, 6, 7 – инвертор; 11 – алгоритм расчёта мгновенной активной и реактивной мощности (p , q); 12 – выбор секторов напряжения, 13 – регулятор реактивной мощности; 14 – регулятор активной мощности; 15 – регулятор постоянного напряжения; 16 – таблица выбора секторов напряжения; 17 – выбор сигналов управления АВН; M_s – момент загрузки; C – конденсатор.

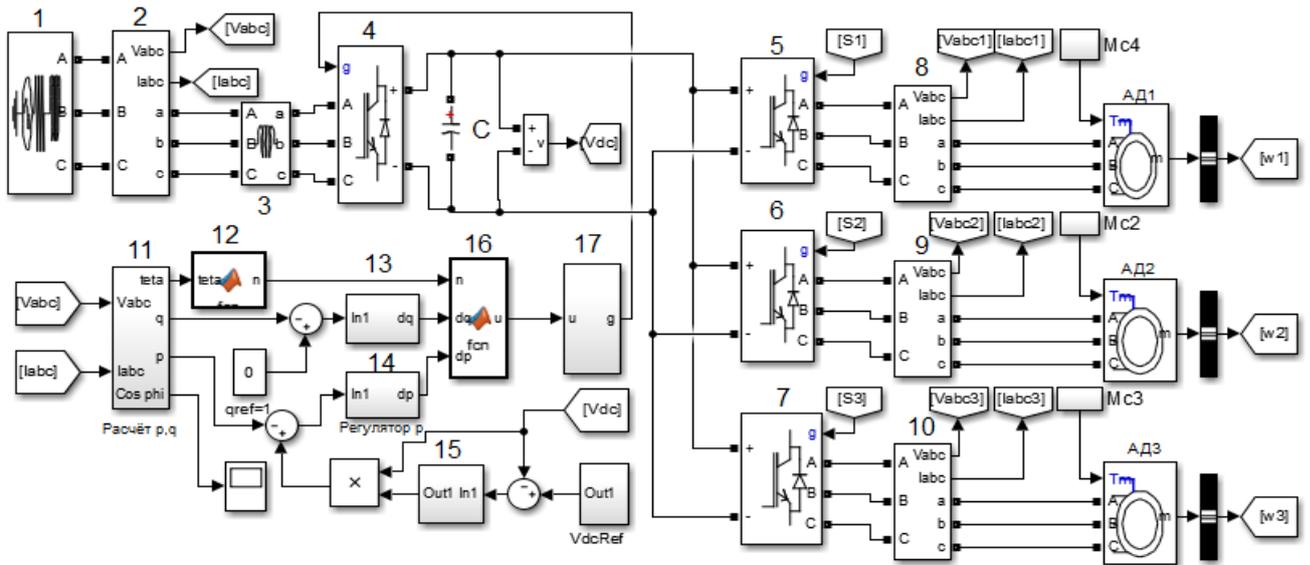


Рисунок 4.11 – Моделирование метода управления активным выпрямителем

Блок расчета мощности является важной частью системы. Его задача состоит в том, чтобы вычислитель реальную мощность для сравнения с установленной мощностью, а затем дать соответствующий сигнал системе управления.

Активная и реактивная мощность на входе АВН рассчитываются по формулам (4.6 и 4.7):

$$p = u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta}$$

$$q = u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta}$$

На рисунках 4.12 и 4.13, регулятор PI имеет функцию доведения отклонения системы $e(t)$ до нуля. Также, он следит, что постоянное напряжение на выходе (V_{dc}) всегда равно заданному значению. Регулятор постоянного напряжения (PI) с параметрами $K_p = 19$, $K_i = 3$. Ширина зоны задержки регулятора реактивной мощности и активной мощности составляет ± 1 . Существует много методов выбора вектора управляющего напряжения (U) для активных выпрямителей.

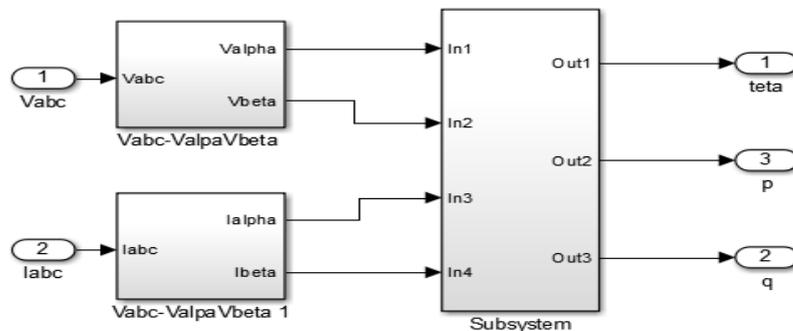


Рисунок 4.12 – Блок расчёта мгновенной активной (p), реактивной мощности (q) и угла напряжения (γ)

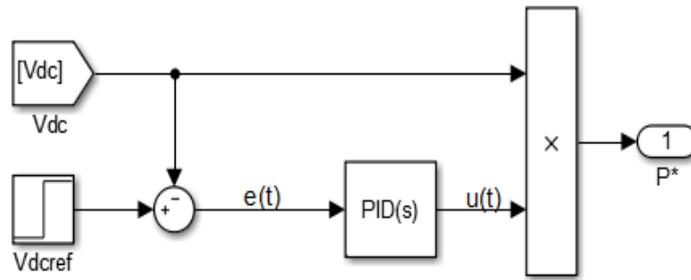


Рисунок 4.13 – Блок расчёта требуемой активной мощности

В данной диссертации используется текст программы выбора векторов напряжения управления. На основании количества секторов и комбинации выходных сигналов соответствующего релейного регулятора будет выбрано требуемое значение вектора напряжения. Это сигнал для управления активным выпрямителем (IGBT) на рисунке 4.14.

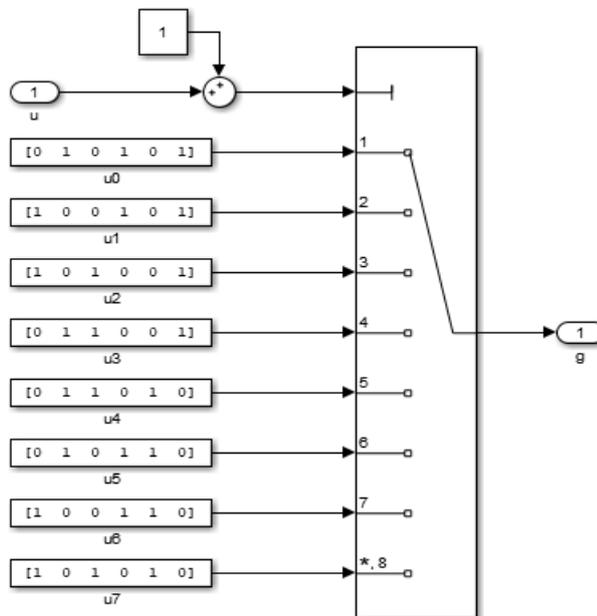


Рисунок 4.14 – Описание сигналов управления IGBT

В плоскости вектор напряжения делится на 12 различных областей напряжения, в зависимости от алгоритма управления мгновенной мощностью. Выбор количества секторов вектора напряжения для построения таблиц переключения ключей создает вектор управления напряжением для активного выпрямителя.

Каждый ключ имеет два состояния «1» и «0», создавая шесть векторов напряжения управления: $U_1(100)$, $U_2(110)$, $U_3(010)$, $U_4(101)$, $U_5(001)$, $U_6(101)$ и два нулевых состояния $U_0(000)$ и $U_7(111)$. Результат моделирования метода прямого управления мощностью для системы электропривода конвейера согласно таблицам ТПК1 – ТПК6, результаты приведены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Результаты оценки коэффициента искажения тока сети в Matlab и Simulink

Методы	$THD_I(\text{пуск})\%$	$THD_I(\text{ном})\%$	$THD_I(\text{тор})\%$
ТПК1	7,48	1,81	3,48
ТПК2	5,99	0,46	2,52
ТПК3	7,62	0,84	2,65
ТПК4	6,31	1,94	3,37
ТПК5	7,56	3,86	3,64
ТПК6	6,54	0,83	2,64
УАПВ	8,88	3,13	3,66

где: $THD_I(\text{пуск})$ – гармоническое искажение тока сети при запуске системы; $THD_I(\text{ном})$ – гармоническое искажение тока сети при стабильной работе двигателя на заданной скорости; $THD_I(\text{тор})$ – гармоническое искажение тока сети, когда двигатель имеет пониженную скорость и в процессе торможения; УАПВ – управление активным выпрямителем с ориентацией по вектору напряжения.

По результатам моделирования в Matlab и Simulink при использовании таблиц коммутации ТПК1 – ТПК6 для прямого управления мощностью активного выпрямителя с системой прямого управления моментом двигателя, таблицы переключения ТПК2 и ТПК6 обеспечивают высокое качество коэффициента мощности, ток имеет наименьшее гармоническое искажение (рисунок 4.15).

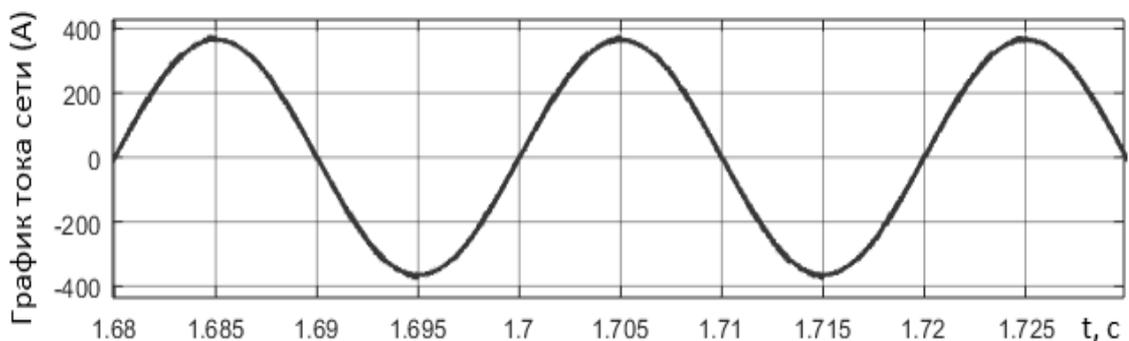


Рисунок 4.15 – График фазного тока сети (ТПК2)

При запуске система обладает большим противодействующим моментом, двигателю требуется большой электромагнитный момент, поэтому токи двигателя и сети очень быстро увеличиваются. Однако, использование прямого управления крутящим моментом двигателя с прямым управлением мощностью активного

выпрямителя значительно уменьшает гармонические искажения тока сети ($\text{THD}_1 = 5,99\%$) вместе с небольшим перерегулированием (рисунок 4.16).

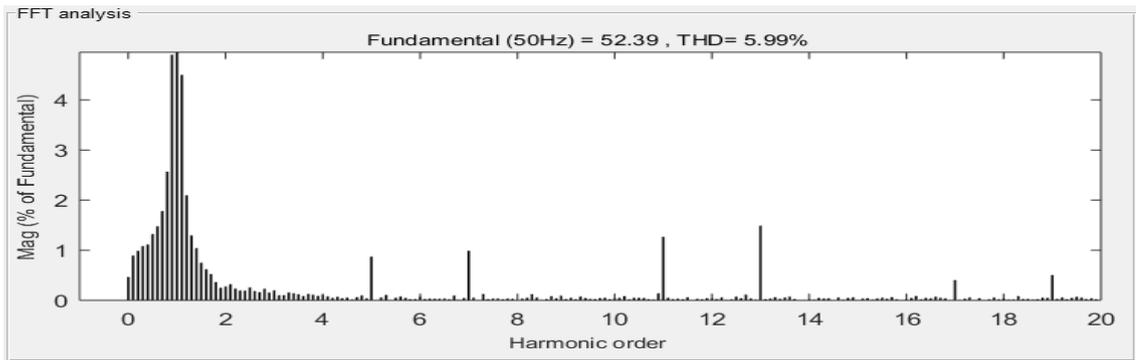


Рисунок 4.16 – Искажения тока в сети, когда двигатели работают в режиме пуска (ТПК2)

Когда двигатели работают стабильно с заданной скоростью, искажение тока очень мало ($\text{THD}_1 = 0,46\%$) и коэффициент мощности $\text{K}_m \approx 1$. Это обеспечивает стабильное качество управления электроприводом конвейерных лент (рисунок 4.17).

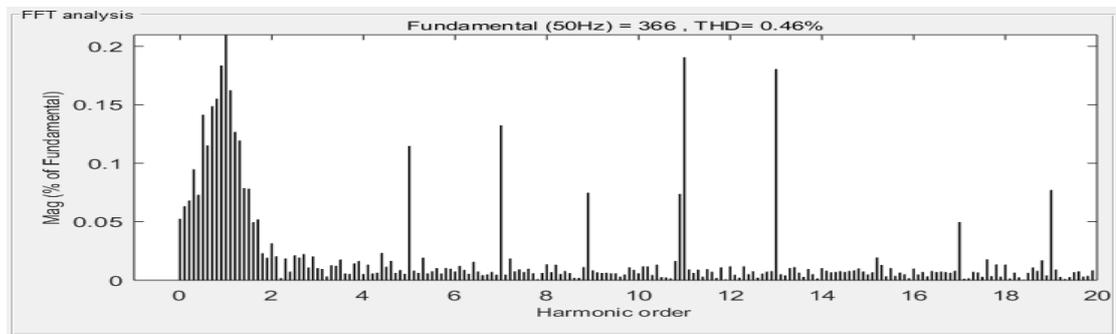


Рисунок 4.17 – Искажения тока сети, при работе двигателей на заданной скорости (ТПК2)

Когда у двигателей понижается скорость с большим изменением момента нагрузки, это сильно влияет на динамические характеристики электрического тока, электромагнитного момента и напряжения сети. Однако при использовании таблицы ТПВ2 система имеет небольшое искажение тока сети ($\text{THD}_1 = 2,52\%$), система работает плавно и надежно (рисунок 4.18).

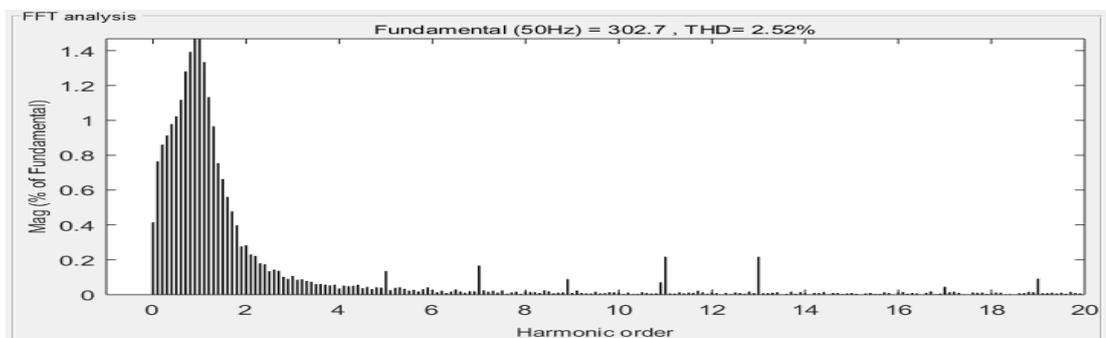


Рисунок 4.18 – Коэффициент искажения тока на сети, когда двигатели снижают скорость, а момент нагрузки меняет направление (ТПК3)

Когда система запускается, коэффициент мощности в сети уменьшается, но очень быстро система прямого управления мощностью активного выпрямителя восстанавливает его, чтобы гарантировать, что коэффициент K_m соответствует значению 1. Во время нагрузки ток сети всегда синусоидальный. Когда двигатели конвейера стабильно работают на заданной скорости, коэффициент K_m достигает значения 1, чтобы обеспечить энергетическую эффективность способа управления выпрямителем (рисунок 4.19).

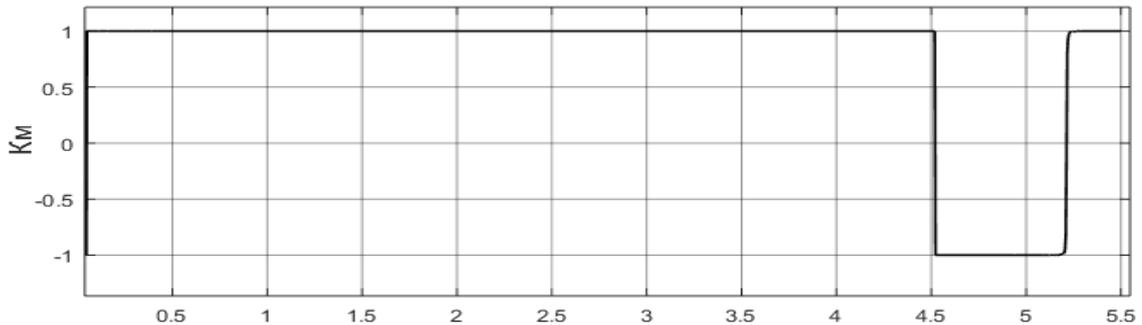


Рисунок 4.19 – Коэффициент мощности (K_m) сети (ТПК2)

Когда скорость двигателей уменьшается в сочетании с появлением обратного момента нагрузки, происходит небольшое колебание тока и напряжения сети, что приводит к изменению коэффициента мощности, но в очень малом диапазоне. В то время, когда двигатель работает как генератор, коэффициент мощности $K_m \approx 1$. Это доказывает, что энергия передается обратно от двигателя к сети.

Характеристика активной мощности имеет постоянное значение, когда система электропривода работает с заданной скоростью. Когда происходит изменение момента нагрузки, происходит очень небольшое изменение активной мощности. Когда момент нагрузки изменяется обратно, характеристики активной мощности также меняют направление и показывают, что энергия возвращается в сеть (рисунок 4.20).



Рисунок 4.20 – Характеристики мгновенной активной и реактивной мощности, когда АВН работает в режиме выпрямителя и в режиме инвертора

Когда система электропривода работает, характеристика реактивной мощности всегда следует значению 0, чтобы обеспечить $K_M \approx 1$.

Изучение таблиц коммутации при прямом управлением мощностью активного выпрямителя обеспечивает строгий характер при выборе векторов управляющего напряжения. Выбор таблицы переключения имеет больше преимуществ для построения электропривода конвейеров. Повышение коэффициента мощности, уменьшение гармонических искажений тока в сети.

4.4 Выводы по Главе 4

В методе прямого управления мощностью активного выпрямителя влияние таблиц переключения очень велико на характеристики тока на входе выпрямителя. В процессе выбора состояния вектора напряжения это приведет к изменению активной и реактивной мощности непосредственно на входе выпрямителя. Перспективным подходом к улучшению режима работы метода прямого управления мощностью является использование таблиц переключения ключей для выбора оптимального вектора управляющего напряжения.

Повышена эффективность метода прямого управления мощностью активного выпрямителя путем анализа нескольких таблиц коммутации напряжения для выбора оптимального управляющего напряжения. В результате гармоническое искажение тока на входе выпрямителя уменьшается ($\text{THD}_1\% = 0,46$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научную работу, основанную на теоретических исследованиях и имитационном моделировании.

Основные результаты диссертации следующие:

1. Выполнен анализ и проведена оценка систем электроприводов конвейера на горнодобывающих предприятиях. Предложены варианты выбора структуры, оборудования и алгоритмов управления для системы электропривода.

2. Предложена новая структурная схема, которая представляет собой многодвигательную систему электропривода конвейера с частотным преобразователем, состоящим из активного выпрямителя и нескольких инверторов напряжения.

3. Использован алгоритм прямого управления моментом асинхронных двигателей. Результатом является обеспечение высокого качества управления скоростью и моментом с перерегулированием (не более 5%), процесс плавного пуска и плавного торможения, снижение высших гармонических составляющих тока, потребляемого источником питания. Система электропривода конвейера обеспечивает высокий уровень электромагнитной совместимости.

4. Выполнено моделирование системы многодвигательного электропривода с активным выпрямителем и алгоритмом векторного управления. Проанализированы результаты моделирования и выполнено сравнение электромагнитной совместимости систем электропривода конвейера с использованием активных выпрямителей и систем электропривода с диодными выпрямителями, такими как многоимпульсные выпрямители с установленными активными фильтрами и реакторами на входе выпрямителя.

5. Выполнено моделирование системы многодвигательного электропривода конвейера с активным выпрямителем с алгоритмом прямого управления мощностью выпрямителя. Разработано решение выбора таблиц переключения ключей (ТПК2) для оптимизации метода прямого управления мощностью выпрямителя для обеспечения высокого коэффициента мощности и низких гармонических искажений тока сети в системе электропривода конвейеров.

6. Результаты разработок будут рекомендованы не только для транспортных систем в угольной шахте Маохе, но и для других систем электропривода на горнодобывающих предприятиях Социалистической Республике Вьетнам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, Б. А. Активные фильтры высших гармоник / Б. А. Алексеев // Электрооборудование. – 2007. – № 3. – С. 28-32.
2. Барвинский, Н. А. Канонические гармоники и интергармоники сетевого тока преобразователя частоты со звеном постоянного тока / Н. А. Барвинский // КДПУ. – 2007. – № 1. – С. 30-32.
3. Башарин, А.В. Управление электроприводами / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский // Л.: Энергоатомиздат. – 1982. – 392 с.
4. Безносенко, Д. М. Математическая модель системы прямого управления моментом частотно-регулируемого асинхронного электропривода / Д. М. Безносенко, А. Е. Козярук, В. В. Рудаков // Известия ВУЗов Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 11.
5. Белов, Г. А. Влияние входного фильтра на динамику импульсного преобразователя / Г. А. Белов, И. В. Ильин // Электричество. – 2005. № 12. – С. 59-67.
6. Беляев, В. Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией / В. Л. Беляев, С. Н. Радимов // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2012. № 3. – С. 469-471.
7. Боярская, Н. П. Адаптивная система формирования управляющих сигналов для активных фильтров гармоник / Н. П. Боярская, А. М. Дербенев, В. П. Довгун // Ползуновский вестник. – 2011. № 2. – С. 25-29.
8. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронным электроприводом / А. А. Булгаков // М.: Наука. – 1966. – 296 с.
9. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А. А. Булгаков // М.: Энергоиздат. – 1982.
10. Бурлака, В. В. Обзор методов управления активными фильтрами / В. В. Бурлака, С. К. Поднебенная, М. Д. Дьяченко // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2011. № 1. – С. 51-54.
11. Васильев, Б. Ю. Автоматизированный электропривод объектов минерально сырьевого комплекса (применение, моделирование, исследование) / Б. Ю. Васильев // СПб. – 2014.
12. Васильев, Б. Ю. Косвенные системы модуляции матричных преобразователей частоты / Б. Ю. Васильев, В. Т. Ле // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15, № 2. – С. 26-33.

13. Васильев, Б. Ю. Повышение эффективности работы силовых полупроводниковых преобразователей на основе векторных алгоритмов управления / Б. Ю. Васильев // Электричество. – 2014. № 9. – С. 44-51.
14. Васильев, Б. Ю. Электропривод. Энергетика электропривода / Б. Ю. Васильев // Солон-пресс. – 2015.
15. Васильев, Б. Ю. Энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость преобразователей частоты электроприводов насосных агрегатов / Б. Ю. Васильев // Нефтяное хозяйство. – 2014. № 9. – С. 118-121.
16. Васильев, Б. Ю. Эффективные алгоритмы управления полупроводниковыми преобразователями в асинхронных электроприводах / Б. Ю. Васильев, В. С. Добуш // Электричество. – 2014. № 4. – С. 54-60.
17. Волков, Д. П. Динамика электромеханических систем экскаваторов / Д. П. Волков, Д. А. Каминская // М.: Машиностроение. – 1971.
18. Галкин, В. И. Методы расчета и оценка показателей надежности ленточных конвейеров горных предприятий: дис...докто. техн. наук: 05.05.06 / В. И. Галкин. – Москва. – 2000. – 421 с.
19. Галкин, В. И. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, В. П. Дьяченко, И. В. Запенин, Е. Е. Шешко // М.: Изд. МГГУ. – 2005. – 543 с.
20. Герман-Галкин, С. Г. Исследование активного выпрямителя в пакете SIM Power System / С. Г. Герман-Галкин // Известия ВУЗов Приборостроение. – 2004. – Т. 47, № 11. – С. 64-67.
21. Гливанский, А. А. Методы управления шахтным подземным конвейерным транспортом / А. А. Гливанский, И. П. Коновалова, В. М. Ротенберг, Е. К. Травкин // Гипроуглеавтоматизация. – Москва. – 1978. № 29. – С. 38-44.
22. Горюнов, В. Н. Активный фильтр как техническое средство обеспечения качества электроэнергии / В. Н. Горюнов, А. Г. Лютаревич // Омский научный вестник. – 2008. – Т. 1, № 64. – С. 78-80.
23. Дмитриев, С. М. Алгоритмы управления активными фильтрами гармоник / С. М. Дмитриев, А. С. Плехов, В. Г. Титов, Д. Ю. Титов, С. Н. Яшин // Труды Нижегородского государственного технического университета. – 2012. – Т. 95, № 2. – С. 206-214.

24. Дмитриева, В. В. Автоматическая стабилизация величины тягового фактора магистрального ленточного конвейера с двухдвигательным приводом / В. В. Дмитриева, С. В. Гершун // ГИАБ. – 2010. № 3. – С. 246-255.
25. Дмитриева, В. В. Математическая модель магистрального конвейера как объекта управления и автоматизации / В. В. Дмитриева // Горные машины и автоматика. – 2001. № 7.
26. Душин, С. Е. Теория автоматического управления: учеб. для вузов / С. Е. Душин, Н. С. Зотов, Д. Х. Имаев и др // М.: Высшая школа. – 567 с.
27. Ефименко П. Ю. Способ управления ленточным конвейером / П. Ю. Ефименко, В. М. Назаренко, Д. М. Савицкий // Криворожский горнорудный институт. – 1988.
28. Ефимов, А. А. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока / А. А. Ефимов, Р. Т. Шрейнер // Новоуральск: Изд-во НГТИ. – 2001. – 412 с.
29. Жежеленко, И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко // – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 160 с.
30. Жуков, П. В. Использование двухосевого частотного преобразователя Siemens Simodrive 611U на подъёмно-накопительной секции сварочного конвейера сборочно-кузовного производства ОАО «АВТОВАЗ» / П. В. Жуков, В. А. Медведев // Сборник трудов четвёртой международной конференции «Проблемы электротехники электроэнергетики и электротехнологии». – 2012. № 1. – С. 192-196.
31. Запенин, И. В. Исследование нестационарных процессов в мощных ленточных конвейерах. Диссертация, представленная на соискание ученой степени канд. тех. наук / И. В. Запенин // М. – 1966.
32. Запенин, И. В. Моделирование переходных процессов ленточных конвейеров / И. В. Запенин, В. Е. Бельфор, Ю. А. Селищев // М.: Недра. – 1969.
33. Зарецкий, О. М. Исследование неравномерности грузопотоков из очистных забоев угольных шахт и разработка методики расчета и выборки параметров привода выравнивающих бункер конвейеров. Дис...канд. тех. наук / О. М. Зарецкий. – М. – 1979.
34. Зиновьев, Г. С. Силовая электроника: учебное пособие для бакалавров / Г. С. Зиновьев // 5-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во Юрайт. – 2012. – 667 с.

35. Изосимов, Б.Д. Алгоритмы векторной широтно-импульсной модуляции трехфазного автономного инвертора напряжения / Б. Д. Изосимов, С. В. Байда // Электротехника. – 2004. № 4. – С. 21-31.
36. Карташов, Р. П. Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией / Р. П. Карташов, А. К. Кулиш, Э. М. Чехет // К.: Изд-во Техника. – 1979. №. – 152 с.
37. Климов, В. П. Проблемы высших гармоник в современных системах электропитания / В. П. Климов, А. Д. Москалев // Практическая силовая электроника. – 2002. – С. 8-15.
38. Козярук, А. Е. Вентильные преобразователи в судовых электромеханических системах / А. Е. Козярук, Е. Г. Плахтына // Ленинград: Судостроение. – 1987. – 192 с.
39. Козярук, А. Е. Системы прямого управления моментом в частотно-регулируемых электроприводах переменного тока / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков // Санкт-Петербург: СПЭЖ. – 2005. – 100 с.
40. Козярук, А. Е. Современное и перспективное алгоритмическое обеспечение частотно-регулируемых электроприводов / А. Е. Козярук, В. В. Рудаков // Санкт-Петербург: СПЭЖ. – 2004. – 128 с.
41. Колб, А. А. Системы группового питания приводов с емкостными накопителями и параллельными активными фильтра / А. А. Колб // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. № 3. – С. 404-407.
42. Костин В.Н. Качество напряжения питающей сети в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В. Н. Костин, В. А. Сериков, А. В. Кривенко // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2019. № 6. – С. 74-77.
43. Костин В.Н. К вопросу о компенсации реактивной мощности в системах электроснабжения с нелинейной нагрузкой / В. Н. Костин, В. А. Сериков, И .А. Шерстенникова // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2019. № 8. – С. 6-9.
44. Крутиков, К. К. Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода / К. К. Крутиков, В. В. Рожков // Электричество. – 2011. № 2. – С. 32-38.
45. Лазаренко, В.М. Режимы работы автоматизированных ленточных конвейеров рудоподготовительного производства: дис. док. тех. наук / В. М. Лазаренко. – Днепропетровск. – 1990.

46. **Ле, В. Т.** Исследование прямого управления мощностью преобразователя частоты со многими двигателями с использованием прямого управления моментом / В. Т. Ле, Ч. Т. До // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. № 2. – С. 10-18.
47. **Ле, В. Т.** Модуляционная система управления матричным преобразователем на основе прямого метода регулирования / В. Т. Ле, Б. Ю. Васильев, Т. Н. Буй // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2020. № 1. – С. 19-23.
48. **Ле, В. Т.** Прямое управление током активного выпрямителя с повышением эффективности метода непосредственного управления моментом асинхронных двигателей / В. Т. Ле, Ч. К. Буй // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2020. – Т. 16, № 1. – С. 54-61.
49. **Ле, В. Т.** Технология управления и эксплуатации конвейерных систем на угольных шахтах Вьетнама / В. Т. Ле // XVIII международной научно-практической конференции (IATS-2018). – Москва. – 2018. – Т. 18, № 6. – С. 64-66.
50. Лукьяненко, С.С. Повышение эксплуатационных свойств нерегулируемых электроприводов горных предприятий / С. С. Лукьяненко // Известия ВУЗов «Горный журнал». – 1995. № 3. – С. 87-89.
51. Лютаревич, А. Г. Анализ электромагнитной обстановки в системе «Сеть - активный фильтр гармоник» / А. Г. Лютаревич // Омский научный вестник. – 2009. – Т. 80, № 2. – С. 171-173.
52. Мамалыга, В.М. Взаимосвязанная система управления многодвигательными ленточными конвейерами. Дис. канд. тех. наук / В. М. Мамалыга. – Киев. – 1988.
53. Москаленко, В.В. Автоматизированный электропривод / В. В. Москаленко // М.: Энергоатомиздат. – 1986. – 416 с.
54. Овчинников, Д. А. Трехфазный выпрямитель с корректором коэффициента мощности / Д. А. Овчинников, М. Ю. Кастров, А. В. Лукин, Г. М. Малышков, А. А. Герасимов // Практическая силовая электроника. – 2002. № 6. – С. 8-15.
55. Плавинский, В.И. . Машины непрерывного транспорта / В. И. Плавинский // М.: Машиностроение. – 1969. – 480 с.
56. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк // М.: Издательский дом МЭИ. – 2007. – 632 с.

57. Сабинин, Ю.А. Частотно-регулируемые асинхронные электроприводы / Ю.А. Сабинин, В.Л. Грузов // Л.: Энергоатомиздат. – 1985.
58. Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями / А. С. Сандлер, Р. С. Сарбатов // М: Энергия. – 1974.
59. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. 2020616020. Программа для выбора оптимального вектора управляющего напряжения в методе прямого управления мощностью и прямого управления моментом двигателя на преобразователе частоты / Б. Ю. Васильев, В. Т. Ле // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 2020614438; заявл. 18.05.2020; опубл. 08.06.2020. – 154 КБ.
60. Свириденко, А. О. Энергосбережение в электроприводе переменного тока с активным выпрямителем для горного оборудования: дис. канд. тех. наук: 05.09.03 / А. О. Свириденко. – СПбУ. – 2011.
61. Слежановский, О. В. Промышленный объектно-ориентированный электропривод / О. В. Слежановский // Электротехника. – 2001. № 1. – С. 2-6.
62. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Г. Г. Соколовский // М.: Изд-во Академия. – 2006. – 272 с.
63. Солодовников, В. В. Введение в статистическую динамику систем автоматического управления / В. В. Солодовников // М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. – 1952.
64. Спиваковский, А.О. Карьерный конвейерный транспорт / А. О. Спиваковский, М. Г. Потапов, М. А. Котов. М.: Недра. – 1965.
65. Сухарев, И. А. Управление конвейерными линиями на базе асинхронного электропривода в рамках АСУ ТП: дис. канд. тех. наук / И. А. Сухарев. – Воронеж. – 2003.
66. Усольцев, А. А. Частотное управление асинхронными двигателями: учеб. пособие / А. А. Усольцев. – СПб: СПбГУ ИТМО. – 2006. – 94 с.
67. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике / Э. Хабигер // М.: Энергоатомиздат. – 1995. – 304 с.

68. Хачатрян, С. А. Обоснование методов повышения надежности эксплуатации конвейерных систем угольных шахт: дис. док. тех. наук: 05.05.06 / С. А. Хачатрян. – Санкт Петербург. – 2004. – 280 с.
69. Чаплыгин, Е. Е. Двухквadrантные преобразователи с активной коррекцией коэффициента мощности / Е. Е. Чаплыгин, А. Е. Стекленив // Практическая силовая электроника. – 2003. № 10. – С. 9-16.
70. Чаплыгин, Е. Е. Несимметричные режимы трехфазного преобразователя с коррекцией коэффициента мощности / Е. Е. Чаплыгин // Электричество. – 2005. № 9. – С. 55-63.
71. Чаплыгин, Е. Е. Спектральные модели импульсных преобразователей с переменной частотой коммутации / Е. Е. Чаплыгин, Нгуен Хоанг Ан // Электричество. – 2006. № 4. – С. 39-46.
72. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер // М.: Энергоиздат. – 1981. – 576 с.
73. Abdelouahab, B. Analysis and Design of New Switching Table for Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifier / B. Abdelouahab, G. Jean-Paul, K. Fateh // IEEE-IPEMC Conf. – 2008. – P. 251-257.
74. Amir, B. Improved Switching Table For Direct Power Control Of Three-Phase PWM Rectifier / B. Amir, V. Abolfazl, M. A. S. Masoum // IEEE-AUPEC Conf. – 2008. – P. 1-6.
75. Bhowmik, S. Sensorless current control for active rectifiers / S. Bhowmik, A. Van Zul, R. Spee, J.H.R. Enslin // IEEE-IAS Conf. – 1996. – P. 898-905.
76. Blaschke, F. The principle field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machines / F, Blaschke // Siemens Rev. – 1972.
77. Bogdan, V. Research methods of V/F control for matrix converter use direct space vector modulation / V. Bogdan, V. T. Le // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2019. – Vol. 9, no. 6. – P. 5115-5124.
78. Buja, G. Direct torque control of induction motor drives / G. Buja, D. Casadei, G. Serra // Proceeding of the 1997 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. – 1997. – Vol. 1. – P. 2-8.
79. Chen, C. L. A novel simplified space vector modulated control scheme for three-phase switch mode rectifier / C. L. Chen, C. M. Lee, R. J. Tu, G. K. Horng // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1999. – No. 46. – P. 512-516.

80. Dixon, J. W. Three-Phase Controlled Rectifiers / J. W. Dixon. – Handbook of Power Electronics Academic Press, 2001. – 599-627 c.
81. Driesen, J. The development of power quality markets / J. Driesen, T. Green, T. Van Graenenbroeck, R. Belmans // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. – 2002. No 1. – P. 262-267.
82. Fujita, H. A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems / H. Fujita, H. Akagi // Series Connection of Passive and Active Filters –IEEE Trans. Ind. App. – 1991. – No. 5. – P. 1020-1025.
83. Hableter, T.G. Direct torque control of induction machines using space vector modulation / T. G. Hableter, F. Profumo, M. Pastorelli, L. M. Tolbert //. – IEEE Trans. Ind. Applicat. – 1992. – Vol. 28. – P. 1045-1053.
84. Holzkirchen, D / Matsushita Automation Controls FP1/ D. Holzkirchen. – 2003.
85. Hung, N. Performance Improvement of Direct Power Controlled PWM Converter / N. Hung, T. Noguchi // IEEJ Trans, on Ind. Appl. – 1998. – Vol. 119, no. 2. – P. 232-239.
86. IEC 60079-0:2011. Explosive atmospheres - Part 0: Equipment – General requirements. – Russia. – 2012. – 90 p.
87. Iuliano, G. Voltage quality control in a industrial system by means of a three-phase four-wire boost rectifier / G. Iuliano, A. L. Schiavo, P. Marino, A. Testa // Proc. IEEE ICHQP. – 1998. – P. 107-113.
88. Kazmierkowski, M. P. Current control techniques for three-phase voltagesource PWM converters: a survey / M. P. Kazmierkowski, L. Malesani // IEEE Trans. on Ind. Electronics. – 1998. – Vol. 45, no. 5. – P. 691-703.
89. Kazmierkowski, M. P. The three phase current controlled transistor DC link PWM converter for bidirectional power flow / M. P. Kazmierkowski, M. A. Dzieciakowski, W. Sulkowski // PEMC Conf. – Budapest. – 1990. – P. 465-469.
90. Kenny, B. Stator and Rotor Flux Based Deadbeat Direct Torque Control of Induction Machines / B. Kenny, R. Lorenz // IEEE Industry Applications Society. – 2001.
91. Kozyaryk A.E. Improving the torque direct control method of the asynchronous motor in the converter using the active rectifier / A.E. Kozyaryk, **V.T. Le**, B. Y. Vasilev // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. Vol.1753(2021) 012025 – P. 1-8.
92. **Le V. T.** Compare the efficiency of the active filter and active rectifier to reduce harmonics and compensate the reactive power in frequency controlled electric drive systems / V. T. Le, T.

- L. Pham, V.A. Ngo, B. Y. Vasilev // *Lecture Notes in Networks and Systems*. – 2020. Vol. 178. – P. 242-253.
93. Malinowski, M. *Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers*. Ph.D. Thesis. Warsaw. / M. Malinowski. – 2001. – 128 p.
94. Mao, H. Novel reduced-order small signal model of a three-phase PWM rectifier and its application in control design and system analysis / H. Mao, D. Boroyevich, F.C. Lee // *IEEE Trans. Power Electron.* – 1998. – Vol. 13. – P. 511-531.
95. Md, Habibur Rahaman. *A Review of Multi-pulse AC-DC Power Converters* / Md. Habibur Rahaman, Md. Rafiqul Islam Sheikh // *2nd International Conference on Electrical & Electronic Engineering (ICEEE)*. – Rajshahi-6204, Bangladesh. – 27-29 December 2017.
96. Milijana, O. *PWM Boost Type Converter Connected to the Grid* / O. Milijana, S. Sladic, Z. Jakopovic // *UPEC*. – 2004. – P. 1-17.
97. Min, B. D. *SVM-based hysteresis current controller for three-phase PWM rectifier* / B. D. Min, J. H. Youm, B. H. Kwon // *Proc. IEE-Elect. Power Applicat.* – 1999. – Vol. 146. – P. 225-230.
98. *National standard TCVN 7079:2003 for Electrical equipment used in underground mines*. – Viet Nam. – 2017.
99. Niermeyer, O. *AC-Motor drive with regenerative braking and reduced supply line distortion* / O. Niermeyer, D. Schroder // *EPE Conf.* – Aachen. – 1989. – P. 1021-1026.
100. Noguchi, T. *Direct Power Control of PWM converter without power source voltage sensors* / T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takahashi // *IEEE Trans. on Ind. Applications*. – 1998. – Vol. 34, no. 3. – P. 473-479.
101. Noguchi, T. *Instantaneous Active and Reactive Power Control of PWM Converter Using Switching Table* / T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, I. Takanashi, I. Katsumata // *IEEJ Trans, on Ind. Appl.* – 1996. – Vol. 116, no. 2. – P. 222-223.
102. Norniella, J. G. *Optimization of Direct Power Control of Three-Phase Active Rectifiers by using Multiple Switching Tables* / J. G. Norniella, J. M. Cano, G. A. Orcajo, C. H. Rojas, J. F. Pedrayes, M. F. Cabanas, M. G. Melero // *RE&PQJ*. – 2010. – Vol. 1, no. 8. – P. 1147-1152.
103. Ohnishi, T. *Three-phase PWM converter/inverter by means of instantaneous active and reactive power control* / T. Ohnishi // *IEEE-IECON Conf.* – 1991. – P. 819-824.

104. Ohnuki, T A three-phase PWM rectifier without voltage sensors / T. Ohnuki, O. Miyashida, P. Lataire, G. Naggeto // EPE Conf., Trondheim. – 1997. – P. 2881-2886.
105. Ooi, B. T. A 3-phase controlled current PWM converter with leading power factor / B. T. Ooi, J. C. Salmon, J. W. Dixon, A. B. Kulkarni // IEEE-IAS Conf. – 1985. – P. 1008-1014.
106. Ooi, B. T. An integrated AC drive system using a controlled current PWM rectifier/inverter link / B. T. Ooi, J. W. Dixon, A. B. Kulkarni, M. Nishimoto // IEEE-PESC Conf. – 1986. – P. 494-501.
107. Pena, R. S. Asher Control strategies for voltage control of a boost type PWM converter / R. S. Pena, R. J. Cardenas, J. C. Clare, G. M. Asher // Proc. IEEE PESC'01. – 2001. – P. 730-735.
108. Pitel, I. A review of the effects and suppression of power converter harmonics / I. Pitel, S. Talukdar // IAS annual meeting. – 1977. – P. 119-127.
109. Rodriguez, J. PWM Regenerative Rectifiers: State of the Art / J. Rodriguez, J. Dixon, J. Espinoza, P. Lezana // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2003. – Vol. 18, no. 3. – P. 833-850.
110. Roux, A. D. Integrated active rectifier and power quality compensator / A. D. Roux and J. H. Enslin // Proc. IEEE ICHQP 98. – 1998. – P. 337-341.
111. Technical guide №1. Direct torque control. ABB 2003.
112. Technical guide. №4. Guide to variable speed drives. ABB 2003.
113. Tsai, M. T. Analysis and design of three-phase AC-to-DC converters with high power factor and near-optimum feed forward / M. T. Tsai, W. I. Tsai // IEEE Trans. Ind. Electron. – 1999. – Vol. 46. – P. 535-543.
114. Vasilev, B. Y. Research on the Switching Algorithm of Voltage Vectors in the Direct Torque Control System / B. Y. Vasilev, **V. T. Le**, I. Daysons // 2018 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), IEEE. – Sochi, Russia. – 2018. – P. 20-26.
115. Yonghao Gui. Improved Direct Power Control for Grid-Connected Voltage Source Converters / Gui Yonghao, Kim Chunghun // IEEE Transactions On Industrial Electronics. 2018. Vol. 65(10). P. 804–8051.

ПРИЛОЖЕНИЕ А Расчет механической части автоматизированного электропривода конвейерной установки

Кинематическая схема построена на рисунке 1. На рисунке 1 приняты следующие обозначения: АД – асинхронный двигатель (380/660В); PS – датчик частоты вращения; СМ (1 и 2) – соединительная муфта; Р – редуктор; Б – барабан; В – выгрузатель; П – приемник; ГП – горная порода; КЛ – конвейерная лента.

Напряжение сети электроснабжения 6000 В [51].

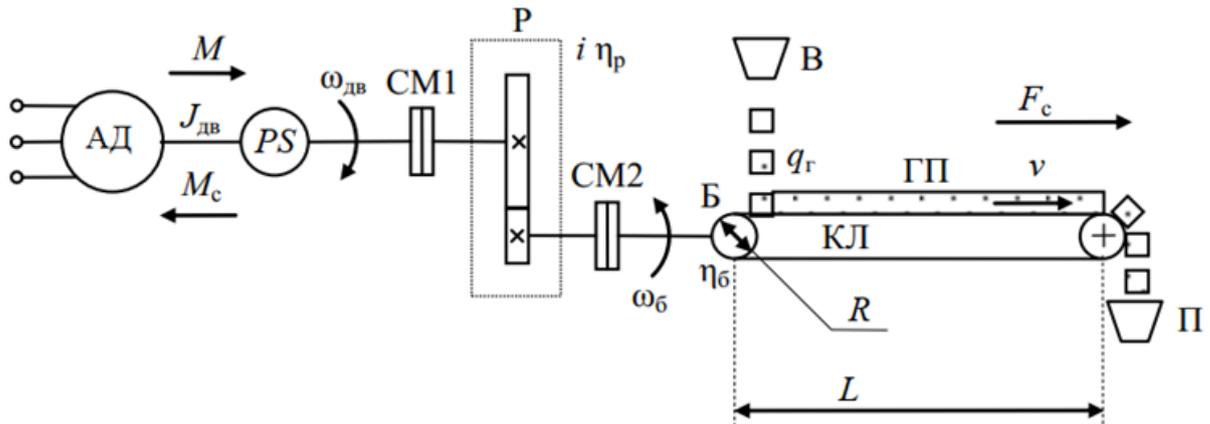


Рисунок А.1 – Кинематическая схема электропривода конвейерной установки

Таблица А.1 – Таблица параметров магистральной конвейерной линии на шахте Маохе

N_o	Q , т/час	v , м/с	$m_{л, кг/м}$ $^2/L, м$	$m'_p, кг/м^2$ $/l'_p, м$	$m''_p, кг/м^2$ $/l''_p, м$	w' , о.е.	K , о.е.	R , М	i , о.е.	$\eta_б$, о.е.	η_p , о.е.
1	250	1,5	24/550	22/1	25/2,2	0,04	1,1	0,4	40	0,98	0,97
2	250	1,5	24/600	22 /1	25/2,2	0,04	1,1	0,4	40	0,98	0,97
3	250	1,5	24/750	22/1	25/2,2	0,04	1,1	0,4	40	0,98	0,97

Методики расчёта нагрузок для первого конвейера:

Рассчитаем погонную массу груза

$$q_g = \frac{Q}{3,6v} = \frac{250}{3,6 \cdot 1,5} = 46,3 \text{ кг/м}$$

Рассчитаем погонную массу ленты

$$q_l = Bm_l = 1,24 = 24 \text{ кг/м}$$

Рассчитаем погонную массу вращающихся частей роликов грузовой ветви

$$q'_p = \frac{m'_p}{l'_p} = \frac{22}{1} = 22 \text{ кг/м}$$

Рассчитаем погонную массу вращающихся частей роликов порожняковой ветви

$$q_p'' = \frac{m_p''}{l_p''} = \frac{25}{2,2} = 11,36 \text{ кг/м}$$

Рассчитаем суммарное тяговое усилие (форма 1.8)

$$F_{\Sigma} = 9,81 \cdot K \cdot (q_z + 2 \cdot q_l + q_p' + q_p'') \cdot L \cdot w' \cdot \cos\beta + 9,81 \cdot q_z \cdot L \cdot \sin\beta =$$

$$= 9,81 \cdot 1,1(46,3 + 2 \cdot 24 + 22 + 11,36) \cdot 550 \cdot 0,04 \cdot \cos(5^0) + 9,81 \cdot 46,3 \cdot 550 \cdot \sin(5^0) =$$

$$51960 \text{ Н}$$

где $\beta = 5^0$ – угол наклона первого конвейера

Рассчитаем приведенный момент статического сопротивления

$$M_c = \frac{F_{\Sigma} R}{i \eta_{\delta} \eta_p} = \frac{51960 \cdot 0,4}{40 \cdot 0,98 \cdot 0,97} = 547 \text{ Нм}$$

Рассчитаем частоту вращения барабана

$$\omega_{\delta} = \frac{v}{R} = \frac{1,5}{0,4} = 3,75 \text{ рад/с}$$

Рассчитаем частоту вращения приводного двигателя

$$\omega_{\text{дв}} = \omega_{\delta} i = 3,75 \cdot 40 = 150 \text{ рад/с}$$

Рассчитаем мощность приводного двигателя

$$P = \frac{k_3 M_c \omega_{\text{дв}}}{1000} = \frac{1,2 \cdot 547 \cdot 150}{1000} = 98,4 \text{ кВт}$$

где $k_3 = 1,1 \div 1,25$ – коэффициент запаса, учитывающий неточности расчета коэффициентов сопротивления движению.

Таким образом, приводной двигатель АЭП конвейерной установки должен отвечать следующим требованиям

$$P_{\text{ном}} > P = 98,4 \text{ кВт}$$

$$\omega_{\text{ном}} > \omega_{\text{дв}} = 150 \text{ рад/с}$$

Номинальное напряжение приводного двигателя $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$

Расчет параметров для конвейеров 2 и 3 проводится как первый конвейер, а результаты приведены в таблице А.2.

Таблица А.2 – Параметры двигателей конвейерной установки

Конвейер	Р (кВт)	$\omega_{\text{дв}}$ (рад/с)	M_c (Нм)	β (градус)
1	98,4	150	547	5
2	105,6	150	586	4,8
3	143,2	150	795	7,8

Выбор мощности двигателя конвейерной установки в таблице А.3.

Таблица А.3 – Технические характеристики двигателей

Технические характеристики	Конвейер 1 и 2	Конвейер 3
	110 кВт	150 кВт
Номинальное напряжение статора	380/660 В	380/660 В
Номинальный ток статора	200/116 А	280/161 А
Номинальный КПД	93,5%	94,5%
Номинальный коэффициент мощности (Км)	0,89	0,92
Номинальная синхронная частота вращения	1500 об/м	1500 об/м
Частота вращения	1485 об/м	1490 об/м
Номинальное скольжение	0,01	0,0067
Кратность пускового тока	6,8	7
Кратность начального пускового момента	2,0	2,5
Перегрузочная способность по моменту	2,8	2,8
Момент инерции ротора	2,0 кгм ²	3,1 кгм ²
Номинальный момент (Мном)	707 Nm	962 Nm

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б Свидетельство о государственной регистрации программы для
ЭВМ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020616020

**ПРОГРАММА ДЛЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО ВЕКТОРА
УПРАВЛЯЮЩЕГО НАПРЯЖЕНИЯ В МЕТОДЕ ПРЯМОГО
УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ И ПРЯМОГО УПРАВЛЕНИЯ
МОМЕНТОМ ДВИГАТЕЛЯ НА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ ЧАСТОТЫ**

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

Авторы: *Васильев Богдан Юрьевич (RU),
Ле Ван Тунг (VN)*

Заявка № **2020614438**

Дата поступления **18 мая 2020 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **08 июня 2020 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ В АКТ о внедрении результатов работы

ГРУППА КОМПАНИЙ УГОЛЬНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ ВЬЕТНАМ «VINACOMIN»
УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ МАОХЕ
Mao Khe, Dong Trieu, Quang Ninh, Viet Nam
Tel: +84203.3871240 – Fax: +84203.3871375
Website: <https://thanmaokhe.vn>

**АКТ**

о внедрении результатов диссертации Ле Ван Тунга на тему «Структура и алгоритмы управления электроприводом конвейеров для повышения энергоэффективности их работы на горнодобывающих предприятиях», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящей справкой подтверждаем, что разработки диссертационной работы Ле Ван Тунга, выполненной в Санкт – Петербургском горном университете (Российская Федерация), не содержат секретных сведений и приняты к использованию в нашей компании. Разработана новая структурная схема электропривода конвейера с использованием преобразователя частоты с активным выпрямителем для компенсации высших гармоник тока в сети, повышения коэффициента мощности и экономии энергии.

После тестирования и модификации разработка будет принята к опытно-промышленному внедрению в угольной компании Маохе в бассейне Куангнинь Вьетнама.

Директор

Угольной компаний Маохе



Ле Ван Лап

ПРИЛОЖЕНИЕ Г АКТ о внедрении результатов работы в учебный процесс**QUANG NINH UNIVERSITY OF INDUSTRY**

Yen Tho, Dong Trieu, Quang Ninh, Viet Nam

Tel: +84.0203.3871292 – Fax: 0203.3871/292

Website: <http://qui.edu.vn> Email: dhcnqn@qui.edu.vn**АКТ**

о внедрении результатов диссертации Ле Ван Тунга на тему «Структура и алгоритмы управления электроприводом конвейеров для повышения энергоэффективности их работы на горнодобывающих предприятиях», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящим удостоверяем, что результаты диссертационной работы аспиранта Ле Ван Тунга на тему «Структура и алгоритмы управления электроприводом конвейеров для повышения энергоэффективности их работы на горнодобывающих предприятиях» внедрены в учебный процесс электрического факультета и используются в качестве учебных материалов. Разработанные аспирантом структурная схема электропривода конвейера, моделирование метода прямого управления мощностью для активного выпрямителя и алгоритма управления DTC для конвейерных двигателей включены в состав рабочих программ ряда дисциплин, которые преподаются студентам факультета «Электрический», в частности дисциплин: «Силовая электроника», «Система автоматизированного электропривода машин», «Интегрированные системы проектирования и управления».

ПРОРЕКТОР

К.т.н. Нгуен Тхе Винь