

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
Электротехнические комплексы и системы

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Пантелеев  
«\_\_\_\_\_» июня 2016 г.

## ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

140604.65 Электропривод и автоматика промышленных установок и  
технологических комплексов

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД БУРОВОЙ УСТАНОВКИ

Пояснительная записка

Руководитель \_\_\_\_\_ доцент, канд. техн. наук В.Б. Молодецкий

Выпускник \_\_\_\_\_ В.П. Кожедубов

Консультанты по  
разделам:

Безопасность проекта \_\_\_\_\_ В.В. Храмов

Экономическая часть \_\_\_\_\_ Е.В. Бочарова

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ А.А. Федоренко

Красноярск 2016

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Электротехнические комплексы и системы»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В. И. Пантелеев  
«\_\_\_» 2016 г.

**ЗАДАНИЕ  
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ  
в форме дипломного проекта**

Студенту Кожедубову В.П.

Группа ЗФЭ10-06 Направление (специальность) 140604.65

Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов

Тема выпускной квалификационной работы «Автоматизированный электропривод буровой установки»

Утверждена приказом по университету № 4041/С от 24.03.2016г.

Руководитель ВКР В.Б. Молодецкий, к.т.н., доцент кафедры «ЭТКиС»

Исходные данные для ВКР

Номинальная мощность, кВт	500
Номинальная частота вращения, об/мин	1485
Коэффициент полезного действия, %	95,0
Коэффициент мощности	0,89
Напряжение, кВ	6
Номинальный момент, Нм	1613
Индекс механической характеристики	V

Отношение пускового момента к номинальному моменту	1,2
Отношение пускового тока к номинальному току	6,0
Отношение максимального момента к номинальному моменту	2,5
Динамический момент инерции ротора, кг*м <sup>2</sup>	3,97

## Перечень разделов ВКР

- 1 Общая часть
- 2 Обзор и анализ систем электропривода и структур управления электроприводами
- 3 Расчетная часть
- 4 Разработка принципиальной схемы управления электроприводом
- 5 Экспериментальная часть
- 6 Безопасность проекта
- 7 Экономическая часть

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_

В.Б. Молодецкий

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_

В.П. Кожедубов

**КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК**  
**работы над проектом на весь период проектирования**  
**(с указанием сроков выполнения и трудоемкости отдельных этапов)**

25.03.16 - 30.04.16	а) концептуальная проработка темы, формулирование целей и задач ДП; формулирование требований к ЭП; определение исходных данных. б) описание основных механизмов предприятия.
30.04.16 - 10.05.16	а) 2-я глава ДП: выбор двигателя и преобразовательного устройства; б) 3-я глава ДП: составление расчетной схемы электропривода и приведение параметров; в) 4-я глава ДП: разработка принципиальной схемы управления электроприводом; г) экспериментальная часть.
14.05.16 - 11.05.16	Раздел БЖД и экономики.
11.06.16 - 17.06.16	Полный вариант пояснительной записки дипломного проекта.

## **РЕФЕРАТ**

Буровые вышки, автоматизированный электропривод, асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором, преобразователь частоты.

Объектом проектирования является автоматизированный электропривод с системой управления преобразователем частоты, векторным регулированием.

Цель работы – разработать автоматизированный электропривод буровой установки с системой управления преобразователем частоты посредством векторного регулирования.

В процессе работы был разработан автоматизированный электропривод с асинхронным двигателем, автоматизирована система управления двигателем.

Основные конструктивные и технико-экономические показатели: плавный пуск и торможение при спускоподъёмных операциях, обеспечение перехода на пониженную скорость при сохранении удерживающего момента двигателя, более долгий срок службы электрических узлов привода.

Эффективность установки определяется повышенным сроком службы узлов электрического привода, стабильной управляемостью и устойчивостью при повышенной статической нагрузке.

## Содержание

Введение.....	4
1 Общая часть.....	5
1.1 Механические буровые установки глубокого бурения.....	5
1.2 Буровые вышки и оборудование для спуска буровых колонн.....	7
1.2.1 Талевая система буровой лебедки.....	9
1.3 Выбор типа электропривода и схемы управления им.....	14
2 Обзор и анализ систем электропривода и структур управления электроприводами.....	17
3 Расчетная часть.....	22
3.1 Составление расчетной схемы электропривода и приведение параметров.....	22
3.2 Выполнение упрощений.....	25
3.3 Выбор двигателя и построение уточненной нагрузочной диаграммы.....	27
3.4 Составление уравнений движения системы определение передаточных функций механической части и построение ЛАЧХ и ЛФЧХ.....	31
3.5 Представление двигателя в виде обобщенной машины.....	41
3.6 Расчет переходных процессов обобщенной машины при пуске.....	49
3.7 Выбор силового преобразователя и построение механических характеристик в разомкнутой системе, оценка диапазона регулирования скорости.....	57
3.8 Выбор силового преобразователя.....	61
3.9 Выбор трансформатора и сглаживающего реактора.....	62
3.10 Механические характеристики в разомкнутой системе.....	63
3.11 Расчет переходных процессов в разомкнутой системе, оценка динамических показателей электропривода и возможностей демпфирования упругих колебаний.....	71
3.12 Расчет энергетических показателей.....	83
4 Разработка принципиальной схемы управления электроприводом.....	89
5 Экспериментальная часть.....	90
5.1 Анализ кинетического привода.....	90
5.2 Структурная схема системы адаптивно-векторного управления электроприводом.....	92
5.3 Наблюдатель состояния.....	93
6 Безопасность проекта.....	97
6.1 Анализ факторов производственной среды	
Вредные и опасные факторы.....	98
6.2 Пожарная безопасность.....	104
6.3 Электробезопасность.....	106
7 Экономическая часть.....	109

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП - 140604.65 ПЗ		
Разраб.	Кожедубов В.П.						
Провер.	Молодецкий В.Б						
Н. Контр.	Федоренко А.А.						
Утв.	Пантелеев В.И.						
<i>Автоматизированный электропривод буровой установки</i>					Lит.	Лист	Листов
						2	120
					ЭТКиС		

7.1 Экономическая характеристика месторождения.....	109
7.2 Анализ мероприятий по снижению себестоимости 1 тонны добычи нефти путем проведения закупочных процедур.....	111
Заключение.....	118
Список использованных источников.....	119

						Лист	
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		ДП-140604.65 ПЗ	3

## Введение

Нефть и газ являются одними из основных видов топлива, потребляемого человечеством. Нефть добывают и используют сравнительно давно, однако начало интенсивной промышленной разработки нефтяных месторождений приходится на конец XIX-начало XX веков.

Конец XX столетия характеризуется резким увеличением спроса на нефть и газ и их потребления. В настоящее время около 70 % энергетической потребности в мире покрывается за счет нефти и газа.

В последнее время добыча нефти с помощью фонтанирующих скважин фактически прекратилась. Многие скважины, пробуренные на нефтеносные пласты, сразу после окончания бурения вводятся в эксплуатацию насосным способом. Непрерывно растет фонд малодебитных скважин (до 3т/сутки)

Мощность насосного оборудования на них в 4-5 раз превышает необходимую. В настоящее время в стоимости нефти эксплуатационные расходы на электроэнергию и обслуживание энергетического комплекса доходят до 45-50%. Процесс добычи нефти после геологических работ и бурения скважин начинается с выбора оборудования. Средний срок эксплуатации нефтяных скважин около 20 лет. За это время оборудование меняется несколько раз. Это объясняется не столько его физическим износом, сколько изменением дебита нефти. Когда дебит скважины становится менее 100 т/сут, устанавливается штанговая глубинно-насосная установка (ШГНУ) - станок-качалка. Есть скважины, на которых сразу после бурения устанавливаются станки-качалки. 75% скважин в России оборудованы ими. Если производительность насоса станка-качалки превышает нефтеотдачу скважины, то в настоящее время или меняют станок-качалку, или переводят ее в периодический режим работы. Причем кажущаяся экономия электроэнергии и моточасов работы оборудования при периодической эксплуатации скважин на самом деле приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии на тонну добытой нефти и к усложнению условий эксплуатации оборудования [1].

Поэтому требования правильного выбора электрооборудования для нефтедобычи, автоматизация его работы, снижение затрат на эксплуатацию и ремонт оборудования являются весьма актуальными.

Интенсификация технологических процессов добычи, переработки и хранения нефти и нефтепродуктов вызывает необходимость дальнейшего совершенствования систем автоматизации нефтяных отраслей промышленности, что, в свою очередь, связано с обработкой большого объема измерительной информации. Этим объясняется широкое развитие измерительных информационных систем, предназначенных для сбора, преобразования, передачи, хранения, обработки на ЭВМ и представления в удобном для оператора виде различного рода технологической информации.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	4
					ДП-140604.65 ПЗ	

## **1 Общая часть**

### **1.1 Механические буровые установки глубокого бурения**

Скважину бурят при помощи буровой установки, представляющей собой сложный комплекс машин, механизмов, аппаратуры, металлоконструкций, средств контроля и управления, расположенных на поверхности [2].

В комплект буровой установки входят: вышка для подвешивания талевой системы и размещения бурильных труб, оборудование для спуска и подъема инструмента, оборудование для подачи и вращения инструмента, насосы для прокачивания промывочной жидкости, силовой привод, механизмы для приготовления и очистки промывочной жидкости, механизмы для автоматизации и механизации спускоподъемных операций (СПО), контрольно-измерительные приборы и вспомогательные устройства. В комплект установки входят также металлические основания, на которых монтируется и перевозится оборудование.

Различные условия и цели бурения при наличии большого разнообразия глубин и конструкций скважин не могут быть удовлетворены одним типоразмером буровой установки, поэтому отечественная промышленность (ОАО «Уралмаш» и ОАО «Волгоградский завод буровой техники») выпускает ряд буровых установок (БУ).

ОАО «Уралмаш» выпускает комплектные буровые установки и наборы бурового оборудования (НБО) для бурения нефтяных и газовых скважин глубиной 2500... 8000 м с дизельными(Д) и дизель-гидравлическим (ДГ) приводами, электрическим приводом переменного тока (Э) и регулируемым (тиристорным) электроприводом постоянного тока (ЭР) с питанием от промышленных сетей, а также от автономных дизель-электрических станций (ДЕ).

Волгоградский завод буровой техники (ВЗБТ) производит комплектные буровые установки для бурения нефтяных и газовых скважин глубиной 1000...3500 м с дизельным (Д) и дизель-гидравлическим (ДГ) приводами, электрическим приводом переменного тока (Э) и регулируемым (тиристорным) электроприводом постоянного тока (ЭП) с питанием от промышленных сетей, а также от автономных дизель-электрических станций (ДЭП).

Буровую установку для бурения конкретной скважины или группы скважин выбирают по допускаемой нагрузке на крюке, которую не должна превышать масса (в воздухе) наиболее тяжелой обсадной колонны.

Использование установок более высокого класса, чем это требуется по конструкции скважины, нерационально, так как, не давая существенного повышения скорости бурения, это приводит к увеличению стоимости работ. При выборе типоразмера и модели установки данного класса следует учитывать конкретные геологические, климатические, энергетические, дорожно-транспортные и другие условия бурения. В соответствии с этим выбирается тип

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

привода (дизельный, электрический и т.д.), а также схема монтажа и транспортировки буровой установки. Каждая буровая установка характеризуется схемами транспортирования, монтажа и монтажно-транспортной базой. Установки для бурения скважин на нефть и газ подразделяются на самоходные и несамоходные. В странах СНГ бурение на нефть и газ осуществляется в основном несамоходными буровыми установками.

Для несамоходных буровых установок характерны следующие три метода монтажа и транспортировки: агрегатный (индивидуальный), мелкоблочный и крупноблочный [2].

Агрегатный метод заключается в индивидуальной транспортировке и монтаже каждого агрегата установки и применяется, как правило, при ее первичном монтаже. Для повторного и последующего монтажа агрегатным способом установку разбирают на агрегаты и узлы и перевозят на универсальном транспорте на новую точку бурения, где вновь монтируют оборудование и сооружения. Этот метод связан с большим комплексом трудоемких работ (строительных, плотничных, слесарных, подсобно-вспомогательных и др.), выполняемых при разборке и монтаже буровых установок на новом месте, что вызывает увеличение сроков монтажа. Поэтому агрегатный метод в настоящее время применяется редко, в основном при бурении опорных скважин, монтаже буровых установок большой грузоподъемности и при перевозке установок на большие расстояния.

Мелкоблочный метод заключается в том, что агрегаты и узлы установки перевозят и монтируют на металлических основаниях. Такое основание со смонтированным на нем каким-либо узлом установки составляет мелкий блок (секцию-модуль). Число таких блоков определяется конструкцией установки, условиями разработки месторождения и географическими условиями. Обычно буровая установка расчленяется на 15...20 мелких блоков, габаритные размеры и масса которых позволяют перевозить их на универсальном транспорте, а в труднодоступных районах - на вертолетах. Этот метод монтажа буровых установок широко применяют в разведочном бурении, а в некоторых районах и в эксплуатационном бурении, когда из-за сложных природно-географических условий невозможно перевозить установки крупными блоками.

Крупноблочный метод заключается в перевозке агрегатов и узлов установки крупными блоками на специальном транспорте (тяжеловозах, подкатных тележках на гусеничном или пневмоколесном ходу), установке блоков на фундаменты и соединении коммуникаций между ними. При этом буровую установку расчленяют на два-три блока массой по 60... 120 т. Крупный блок состоит из металлического основания, перевозимого на специальных транспортных средствах, и смонтированных на нем агрегатов и узлов буровой установки, кинематически связанных между собой. При перевозке таких блоков практически не нарушаются кинематические связи узлов установки и коммуникаций, не демонтируются

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	6
					ДП-140604.65 ПЗ	

укрытия, что позволяет исключить трудоемкие работы, выполняемые при других методах монтажа, такие как строительные, плотничные, слесарные и ряд подсобно-вспомогательных. Применение крупных блоков позволяет сократить сроки монтажа буровых установок до минимума. Однако промышленное обустройство нефтяных площадей, наличие линии высоковольтной передачи, железных и шоссейных дорог, а также ограничения, налагаемые охраной земельных угодий, снижают возможности применения этого способа, особенно в центральных районах страны. В то же время обычный и мелкоблочный методы монтажа буровых установок занимают много времени и резко снижают производительность буровых установок.

Промышленностью выпускаются буровые установки, изготовленные так, что они могут перевозиться в зависимости от местных условий различными способами. Эти установки называются установками универсальной монтажеспособности.

## 1.2 Буровые вышки и оборудование для спуска буровых колонн

Процесс бурения сопровождается спуском и подъемом бурильной колонны в скважину, а также поддержанием ее на весу. Масса инструмента, с которой приходится при этом оперировать достигает многих сотен килонаютонов. Для того чтобы уменьшить нагрузку на канат и снизить установочную мощность двигателей применяют подъемное оборудование (рис. 1.1), состоящее из вышки, буровой лебедки и талевой (полиспастовой) системы. Талевая система, в свою очередь, состоит из неподвижной части - кронблока (неподвижные блоки полиспаста), устанавливаемого наверху фонаря вышки, и подвижной части - талевого блока (подвижного блока полиспаста), талевого каната, крюка и штропов. Подъемное оборудование является неотъемлемой частью всякой буровой установки независимо от способа бурения.

Буровая вышка предназначена для подъема и спуска бурильной колонны и обсадных труб в скважину, удержания бурильной колонны на весу во время бурения, а также для размещения в ней талевой системы, бурильных труб и части оборудования, необходимого для осуществления процесса бурения. Буровые вышки различаются по грузоподъемности, высоте и конструкции.

Наиболее серьезной опасностью при работе на буровых вышках является частичное или полное их разрушение. Основная причина, приводящая к падению или разрушению вышек - недостаточный надзор за их состоянием в процессе длительной эксплуатации.

По этим причинам были введены изменения в правилах безопасности, предусматривающие обязательные периодические проверки вышек, в том числе с полной разборкой и ревизией их деталей, а также испытания вышек в собранном виде с нагрузкой.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	7
					ДП-140604.65 ПЗ	

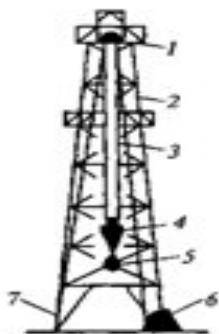


Рис. 2.2. Спуско-подъемное оборудование буровой установки:

1 — кронблок; 2 — вышка;  
3 — талевый канат; 4 — та-  
левый блок; 5 — крюк; 6 — бу-  
ровая лебедка; 7 — неподвиж-  
ный конец талевого каната

### Рисунок 1.1 Спуско-подъемное оборудование

Кроме того, вышка должна подвергаться тщательному осмотру, проверке каждый раз до начала буровых работ, перед спуском обсадных колонн, освобождением прихваченной бурильной или обсадной колонны, при авариях и после сильных ветров (15 м/с для открытой местности, 21 м/с для лесной и таежной местности, а также когда вышка сооружена в котловане) [2, с.219]. Вышки мачтового типа монтируются в горизонтальном положении, а затем поднимаются в вертикальное положение при помощи специальных устройств. Транспортировка вышки осуществляется в собранном виде вместе с платформой верхового рабочего в горизонтальном положении на специальном транспортном устройстве. При этом талевая система не демонтируется вместе с вышкой. При невозможности из-за условий местности транспортирования вышки целиком она разбирается на секции и транспортируется частями универсальным транспортом.

В практике бурения кроме вышек мачтового типа продолжают использоваться вышки башенного типа, которые собираются методом сверху-вниз. Перед началом монтажа на вышечном основании монтируют подъемник. После окончания сборки вышки подъемник демонтируют.

Одновременно с монтажом буровой установки и установкой вышки ведут строительство привычечных сооружений. К ним относятся следующие сооружения:

а) Редукторный (агрегатный) сарай, предназначенный для укрытия двигателей и передаточных механизмов лебедки. Его пристраивают к вышке со стороны её задней панели в направлении, противоположном мосткам. Размеры редукторного сарая определяются типом установки;

б) Насосный сарай для размещения и укрытия буровых насосов и силового оборудования. Его строят либо в виде пристройки сбоку фонаря вышки редукторного сарая, либо отдельно в стороне от вышки. Стены и крышу

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

редукторного и насосного сараев в зависимости от конкретных условий обшивают досками, гофрированным железом, камышитовыми щитами, резинотканями или полиэтиленовой плёнкой. Использование некоторых буровых установок требуется совмещение редукторного и насосного сараев;

в) Приемный мост, предназначенный для укладки бурильных обсадных и других труб и перемещения по нему оборудования инструмента, материалов и запасных частей. Приемные мосты бывают горизонтальные и наклонные. Высота установки приемных мостов регулируется высотой установки рамы буровой вышки. Ширина приемных мостов до 1,5...2 м, длина до 18 м.;

г) Система устройств для очистки промывочного раствора выбуренной породы, а также склады для химических реагентов и сыпучих материалов;

д) Ряд вспомогательных сооружений при бурении: на электроприводе - трансформаторные площадки, на двигателях внутреннего сгорания (ДВС) - площадки, на которых находятся емкости для горючесмазочных материалов и т. п.

### **1.2.1 Талевая система буровой лебедки**

Буровую лебедку применяют для спуска и подъема бурильной колонны, спуска обсадных колонн, удерживания на весу неподвижной бурильной колонны или медленной ее подачи в процессе бурения. В ряде случаев буровая лебедка используется для передачи мощности от двигателя к ротору, свинчивания и развинчивания труб, подтаскивания грузов и других вспомогательных работ. Лебедка является одним из основных агрегатов буровой установки [2].

Спуск и подъем бурильных колонн производят много раз. Все операции повторяются систематически в строго определенной последовательности, а нагрузки на лебедку при этом носят циклический характер. При подъеме крюка мощность подводится к лебедке от двигателей, а при спуске, наоборот, тормозные устройства должны преобразовывать всю освободившуюся энергию в теплоту. Для лучшего использования мощности во время подъема крюка с переменной по величине нагрузкой приводные трансмиссии лебедки или ее привод должны быть многоскоростными. Лебедка должна оперативно переключаться с больших скоростей подъема на малые и обратно, обеспечивая плановые включения с минимальной затратой времени на эти операции. В случаях прихватов и затяжек колонны сила тяги при подъеме должна быть быстро увеличена. Переключение скоростей для подъема колонн различной массы осуществляется периодически.

Буровая лебедка состоит из сварной рамы, на которой установлены подъемный и трансмиссионные (один или два) валы на подшипниках качения, ленточный и гидравлический или электрический тормоза и пульт управления. Кроме того, на некоторых лебедках монтируются коробки перемены передачи, позволяющие сократить число валов лебедки. По числу валов буровые лебедки делятся на одно-, двух- и трехвальные. Кинематическая связь между валами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	9
					ДП-140604.65 ПЗ	

лебедок осуществляется посредством цепных передач.

Подъемный вал является основным валом буровой лебедки, а в некоторых и единственным. На нем, кроме звездочек цепной передачи барабан для навивки талевого каната, ленточный тормоз и муфта, соединяющая вал с гидравлическим или электрическим тормозом.

Трансмиссионный и промежуточный (катушечный) валы буровой лебедки осуществляют кинематическую связь между подъемным валом и приводом лебедки. Трансмиссионный вал в ряде случаев используется для передачи вращения ротору и присоединения к лебедке автомата подачи долота. На промежуточном валу, кроме звездочек цепной передачи для передачи вращения подъемному валу, монтируют специальные катушки для проведения работ по подтаскиванию грузов и свинчиванию и развинчиванию труб при спускоподъемных операциях. Для выполнения этих работ применяются вспомогательные лебедки и пневматические раскрепители. В результате этого упрощаются конструкции буровой лебедки и повышается безопасность работ по подтаскиванию грузов и вспомогательных работ при спускоподъемных операциях.

Пневмораскрепители предназначены для раскрепления замковых соединений бурильных труб. Пневмораскрепитель состоит из цилиндра, в котором перемещается поршень со штоком. Цилиндр с обоих концов закрыт крышками, в одной из которых установлено уплотнение штока. На штоке с противоположной стороны от поршня крепится металлический трос, другой конец которого надевается на машинный ключ. Под действием сжатого воздуха поршень перемещается и через трос вращает машинный ключ. Максимальная сила, развиваемая пневматическим цилиндром при давлении сжатого воздуха 0,6 МПа, равна 50...70 кН. Ход поршня (штока) пневмоцилиндра 740...800 мм [2].

Подъём и спуск бурильных труб в целях замены сработавшегося долота состоит из одних и тех же многократно повторяемых операций. Причём к машинам относятся операции подъёма свечи из скважин и порожнего элеватора. Все остальные операции являются машинно - ручными или ручными требующими затрат больших физических усилий.

К ним относятся:

1) при подъёме:

- посадка колонны на элеватор;
- развинчивание резьбового соединения;
- установка свечи на подсвечник;
- спуск порожнего элеватора;
- перенос штропов на загруженный элеватор;

2) при спуске:

- вывод свечи из-за пальца и с подсвечника;
- свинчивание свечи с колонной;
- спуск свечи в скважину;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- посадка колонны на элеватор;
- перенос штропов на свободный элеватор.

Для производства спускоподъемных операций буровая бригада должна быть оснащена, во-первых, инструментом для захвата и подвешивания колонны труб. В качестве такого инструмента применяются элеваторы, клинья и слайдеры (элеваторы с плашечными захватами). Во-вторых, инструментом для свинчивания и развинчивания бурильных и обсадных труб (машины, круглые ключи и т.п.).

Устройства для захвата и подвешивания колонн различаются по размерам и грузоподъемности. Обычно это оборудование выпускается для бурильных труб размером 60, 73, 89, 114, 127, 141, 169 мм с номинальной грузоподъемностью 75, 125, 140, 170, 200, 250, 320 т. Для обсадных труб диаметром от 194 до 426 мм применяют клинья четырех размеров: 210, 273, 375 и 476 мм, рассчитанные на грузоподъемность от 125 до 300 т.

Элеватор служит для захвата и удержания на весу колонны бурильных (обсадных) труб при спускоподъемных операциях и других работах в буровой. Применяют элеваторы различных типов, отличающиеся размерами в зависимости от диаметра бурильных или обсадных труб, грузоподъемностью, конструктивным использованием и материалом для их изготовления. Элеватор при помощи штропов подвешивается к подъемному крюку.

Клинья для бурильных труб используют для подвешивания бурильного инструмента в столе ротора. Они вкладываются в конусное отверстие ротора. Обмотка короткозамкнутого ротора лопатки и кольца - литые из алюминия. Вентиляционные лопатки на кольцах ротора служат для перемещения воздуха, находящегося внутри машины.

Подшипниковые щиты крепят к корпусу с помощью четырех или шести болтов.

Применение клиньев ускоряет работы по спускоподъемным операциям. В последнее время широко применяются автоматические клиновые захваты с пневматическим приводом типа ПКР (в этом случае клинья в ротор вставляются не вручную, а при помощи специального привода, управление которым внесено на пульт бурильщика).

Для спуска тяжелых обсадных колонн применяют клинья с не разъемным корпусом. Их устанавливают на специальных подкладках над устьем скважины. Клин состоит из массивного корпуса, воспринимающего массу обсадных труб. Внутри корпуса находится плашки, предназначенные для захвата обсадных труб и удержания их в подвешенном состоянии. Подъем и опускание плашек осуществляется поворотом рукоятки в ту или другую сторону вокруг клина, что достигается наличием наклонных исправляющих вырезов в корпусе, по которым при помощи рычага перекатываются ролики плашек.

Для свинчивания и развинчивания бурильных и обсадных труб вменяется специальный инструмент. В качестве такого инструмента используют различные

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

ключи. Одни из них предназначаются для свинчивания, а другие - для крепления и открепления резьбовых соединений колонны. Обычно легкие круговые ключи для предварительного свинчивания рассчитаны на замки одного диаметра, а тяжелые машинные ключи для крепления и открепления резьбовых соединений - на два, а иногда и более размеров бурильных труб и замков.

Операции крепления и открепления резьбовых соединений бурильных и обсадных колонн осуществляются двумя машинными ключами; при этом один ключ (задерживающий) - неподвижный, а второй (завинчивающий) - подвижный. Ключи подвешиваются в горизонтальном положении. Для этого у полатей на специальных «пальцах» укрепляют металлические ролики и через них перекидывают стальной тартальный канат или одну прядь талевого каната. Один конец этого каната прикрепляется к подвеске ключа, а другой - к противовесу, уравновешивающему ключ и облегчающему перемещение ключа вверх или вниз.

На основе создания ряда механизмов для автоматизации и механизации отдельных операций спускоподъемных работ был создан автомат спуска-подъема. Комплекс механизмов АСП предназначен для механизации и частичной автоматизации спускоподъемных операций.

Он обеспечивает:

- совмещение во времени подъема и спуска колонны труб и незагруженного элеватора с операциями установки свечей на подсвечник, выноса ее с подсвечника, а также с развинчиванием или свинчиванием свечи колонной бурильных труб;
- механизацию установки свечей на подсвечник и вынос их к центру, а также захват или освобождение колонны бурильных труб автоматическим элеватором.

В работе комплекса механизмов типа АСП-ЗМ1, АСП-ЗМ4, АСП-ЗМ5 и АСП-ЗМ6 используются ключ АКБ-ЗМ2 и пневматический клиновой захват БО-700 (кроме АСП-ЗМ6, для которого применяется захват ПКРБО-700).

При спускоподъемных операциях необходимо соблюдать целый ряд основных положений.

Спускоподъемные операции (скорости спуска и подъема, момент начала подъема, проработки и др.) должны производиться в соответствии с режимно-технологической картой (технически проектом на строительство скважины) или указанием бурового мастера, начальника буровой, инженерно-диспетчерской службой руководства Районной инженерно-технической службы (РИТС) или разведки.

Для проведения работ по спуску, подъему и наращиванию бурильной колонны буровая установка должна быть оснащена комплектом механизмов и приспособлений малой механизации. В процессе бурения и после окончания долбления ведущую трубу и первую свечу следует поднимать из скважины на первой скорости. Запрещается раскреплять резьбовые соединения свечей

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	12
					ДП-140604.65 ПЗ	

бурильных труб и других элементов компоновки бурильной колонны при помощи ротора. Также запрещается останавливать вращение колонны бурильных труб включением обратного хода ротора.

При спуске бурильных и утяжеленных бурильных труб в скважину, резьбовые соединения следует докреплять машинными и автоматическими ключами, контролируя зазор между соединительными элементами и соблюдая по показаниям моментомера величину допустимого крутящего момента, установленную действующей инструкцией.

При спуске бурильной колонны запрещается включать клиновой захват до полной остановки колонны.

Посадка бурильной колонны на ротор вовремя СПО должна производиться плавно без толчков и ударов. При появлении посадок во время спуска бурильной колонны в этих местах следует производить промывку или проработку ствола скважины. Допустимые величины посадок и затяжек бурильной колонны зависят от технических и геологических условий и должны определяться в каждом отдельном случае буровым мастером или технологической службой.

Запрещается работать без приспособления для правильного наматывания талевого каната на барабан лебедки.

При подъеме из скважины труб и других элементов компоновки колонны наружные поверхности их должны очищаться от остатков бурового раствора с помощью специальных приспособлений

Колонна бурильных, обсадных труб и УБТ, захватываемая пневматическим клиньевым захватом, должна быть составлена с учетом допустимых нагрузок на нее, приведенных в инструкции по эксплуатации ПКР. Запрещается во время работы клинового захвата находиться на роторе членам буровой бригады, поднимать или спускать колонну труб при не полностью поднятых клиньях, вращать стол ротора при поднятых клиньях, работать с деформированными бурильными или обсадными трубами оставлять устье скважины открытым. Необходимо устанавливать устройство, предупреждающее падение посторонних предметов в скважину.

При вскрытии газоносных и склонных к поглощению бурового раствора пластов спуск и подъем бурильной колонны следует производить при пониженных скоростях, с целью снижения возможности возникновения гидроразрыва, проницаемых горизонтов и вызова притока из пласта.

При подъеме бурильной колонны из скважины следует производить, долив в скважину бурового раствора с теми же показателями свойств, что и у раствора, находящегося в ней. Буровой мастер (начальник буровой) должен осуществлять проверку спуска подъемных механизмов в соответствии с графиком профилактического осмотра и результаты проверки заносить в специальный журнал. Периодически должна производиться дефектоскопия спускоподъемного оборудования.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	13
					ДП-140604.65 ПЗ	

### 1.3 Выбор типа электропривода и схемы управления им

Привод буровой установки (рис.1.3.1) состоит из электродвигателя 1 с фазным ротором и цилиндрического редуктора 3. Плавность пуска обеспечивается включением в цепь ротора электродвигателей пускового реостата из 12 ступеней. С целью удобства транспортирования сборочных единиц по выработкам двигатель и редуктор не имеют общей рамы, а монтируются каждый самостоятельно на общем фундаменте. Вал двигателя через упругую втулочно-пальцевую муфту 2 передает вращающий момент на один из концов быстроходного вала редуктора. На противоположном конце быстроходного вала редуктора устанавливается тормозной шкив, на котором монтируется колодочный тормоз 4 типа ТКТГ-500. Тормоз служит для торможения буровой установки при ее остановках. Передаточное отношение двухступенчатого цилиндрического редуктора Ц2Ш  $U = 20,5$  при частоте вращения ротора двигателя  $n = 985 \text{ мин}^{-1}$  обеспечивает движение буровой колоны со скоростью  $V = 3,15 \text{ м/с}$ . Первая (быстроходная) ступень передачи редуктора выполнена косозубой двухпоточной. Направление наклона зубьев быстроходной вал-шестерни выполнено встречным с целью компенсации осевых реакций в зубчатом зацеплении. На промежуточном валу, посередине между косозубыми зубчатыми колесами первой ступени, расположена ведущая шестерня тихоходной (второй) ступени. На верхней половине корпуса редуктора имеются две крышки, в одной из которых завернут маслюказательный щуп 6, а в другой маслозаливная пробка 7. На выходном (тихоходном) валу редуктора через шпонку посажена ступица зубчатой муфты 5 промежуточного вала [3].

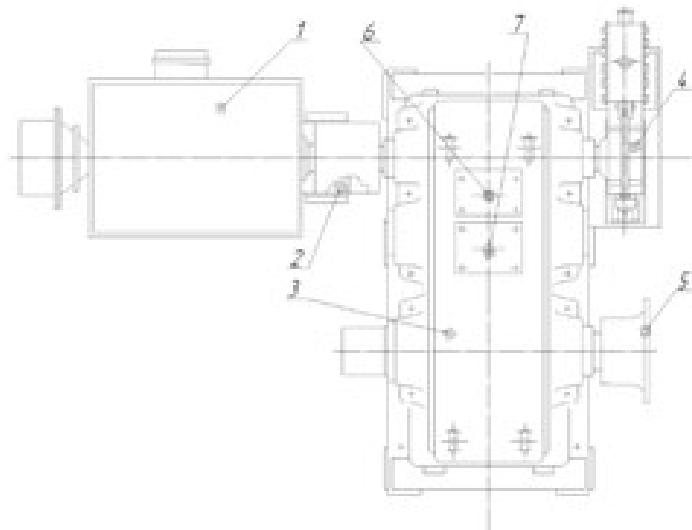


Рисунок 1.3.1 - Привод буровой установки

Целью автоматизации является повышение эффективности и безопасности работы буровых установок. В существующих системах используется фазовое

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	14
					ДП-140604.65 ПЗ	

управление подаваемого напряжения, реализуемое тиристорным преобразователем. Но при фазовом регулировании на выходе преобразователя получается напряжение плохого качества, при котором пуск характеризуется наличием переходных процессов, как в электроприводе, так и в механической части конструкции. Переходные процессы сопровождаются резкими изменениями различных параметров состояния во времени, в том числе и усилие. При этом значение данной переменной могут меняться в значительной степени, выходя за пределы допустимых или даже критических. Перегрузки при пуске могут привести к опасному снижению запаса прочности привода. Поэтому, анализируя вышеперечисленное, можно сделать вывод что проблема плавного пуска очень актуальна на сегодняшний день. Это означает, что существует необходимость в поиске альтернативных средств управления напряжением питания асинхронных двигателей (АД) с короткозамкнутым ротором. Одной из таких альтернатив является замена принципа фазового регулирования - широтно-импульсным регулированием напряжения. В соответствии с этим принципом силовые ключи между источником питания и нагрузкой коммутируются с высокой частотой на протяжении периода напряжения питания. Управляемая величина - длительность включенного состояния силового ключа при постоянном значении несущей частоты. Среднее значение выходного напряжения за период несущей частоты определяется скважностью импульсов управления силовым ключом, а также мгновенными значениями напряжения питания. Реализация этого способа возможна при использовании транзисторов с изолированным затвором (IGBT), которые характеризуются высокими энергетическими и динамическими показателями.

С точки зрения обеспечения требований, предъявляемых к приводу буровых установок, этот привод имеет недостатки[3]. К недостаткам электропривода с асинхронным короткозамкнутым электродвигателем следует отнести резкое увеличение пускового момента и, следовательно, возможность появления высоких напряжений в конвейерной ленте и пробуксовки на приводных барабанах.

Значительного улучшения рабочих характеристик электропривода достигают включением в схему привода специальных пусковых устройств:

1. Пусковые гидромуфты замкнутого типа, обеспечивающие плавный пуск и необходимое распределение нагрузки между двигателями многодвигательных приводных станций. Гидромуфты имеют серьезные недостатки, т.к. механическая характеристика гидромуфты не позволяет осуществить разгон тягового органа с необходимой интенсивностью; срабатывание защиты вызывает опасность для обслуживающего персонала и простой конвейера, обусловленный временем на повторную заливку в неё эмульсии, установку новой плавкой пробки;
2. Электромагнитная муфта скольжения. К недостаткам электромагнитных муфт скольжения относится следующее: в процессе разгона вихревые

Иzm.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

токи, возникающие в якоре муфты, вызывают ее сильный нагрев, что требует, особенно при большой мощности привода, довольно сложной системы охлаждения муфты; индуктор, к которому подводится постоянный ток через кольца, должен быть во взрывобезопасном исполнении, чтобы отвечать условиям работы во взрывоопасной атмосфере; электропривод с электромагнитной муфтой скольжения и короткозамкнутым асинхронным двигателем требует два вида тока - переменного и постоянного, что также усложняет систему питания привода. Поэтому по указанным причинам работы в области создания электромагнитных муфт скольжения для буровых вышек в настоящее время не получают развития;

3. Электродвигатели с фазным ротором. Обеспечение плавного пуска в таких электроприводах осуществляется введением сопротивления в роторную цепь электродвигателя. В качестве сопротивления используют металлический ступенчатый реостат или бесступенчатый - жидкостный. Жидкостные реостаты выпускаются на широкий диапазон мощностей и изготавливаются во взрывобезопасном исполнении, что позволяет использовать приводы этого типа в угольных шахтах. Не менее широкое распространение получил привод с электродвигателем с фазовым ротором и металлическим реостатом, включенным в цепь ротора. Введение сопротивлений осуществляют при помощи электромагнитных контакторов. Существуют также приводы с двигателями с фазовым ротором, в цепь которого включены неуправляемые индукционные реостаты. Применение данного метода имеет ряд таких недостатков, как изнашивание контактных колец, большие потери на регулировочном сопротивлении, уменьшение жесткости характеристики с ростом сопротивления, большая стоимость относительно двигателя с КЗ ротором;
4. Электропривод переменного тока на базе асинхронного двигателя с фазным ротором по системе асинхронного вентильного каскада (АВК). Недостатки данной схемы - дороговизна реализации и сопутствующие недостатки двигателя с фазным ротором;
5. Схема импульсного регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором. Регулирование жесткости механической характеристики в данной схеме производится изменением сопротивления в цепи выпрямленного тока импульсным методом. В электроприводе с асинхронным короткозамкнутым двигателем импульсное регулирование тока возможно лишь в статорной цепи. Импульсный метод управления асинхронным двигателем является наиболее простым и легко реализуемым. Однако этот метод обладает рядом существенных недостатков. При таком способе регулирования имеет место непрерывное протекание переходных процессов и связанное с этим протекание по

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

- обмоткам двигателя свободных составляющих переходных токов, обуславливающих нагрев двигателя и появление знакопеременных ударных моментов, ухудшающих качество переходного процесса при пуске;
6. Частотное регулирование асинхронного двигателя с помощью преобразователя частоты (ПЧ). ПЧ обеспечивает плавное регулирование частоты в требуемом диапазоне. Основные недостатки ПЧ - это его дороговизна и большие габариты;
  7. Параметрический метод управления асинхронным двигателем. При таком методе действуют на величину приложенного к приводному двигателю напряжения. Реализуется при пуске двигателя с короткозамкнутым ротором двумя основными методами:
    - а) Детерминированным фазированием, т.е. поочередным включением статорных обмоток двигателя на сеть в моменты времени, соответствующие определенной фазе питающего напряжения, что исключает появление апериодических составляющих пускового тока и позволяет получить динамическую механическую характеристику, близкую к статической.
    - б) Плавным увеличением по линейному или экспоненциальному закону напряжения, подводимого к двигателю. Полное время нарастания питающего напряжения при этом должно быть не менее времени затухания апериодической составляющей тока.

## **2 Обзор и анализ систем электропривода и структур управления электроприводами**

Для обеспечения требований, предъявляемых к приводу необходимо провести анализ систем управления электроприводов. Рассмотрим системы электроприводов на базе асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока.

Асинхронный электропривод нашел применение почти во всех областях современной промышленности, где не требуется регулировать скорость вращения вала двигателя. В силу своей простоты и надежности намного дешевле остальных типов приводов. Основная сложность внедрения асинхронного электропривода заключается в невозможности регулировать скорость вала в широком диапазоне скоростей в тех механизмах, где это необходимо. Существует три способа регулирования скорости вала асинхронного двигателя [5, с.560]:

- изменением величины питающего напряжения;
- введением регулировочных реостатов для асинхронного двигателя с фазным ротором;
- использование преобразователей частоты (ПЧ).

Первые два способа не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электроприводу маневровых лебедок. В настоящее время широко внедряется

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

способ регулирования частоты вращения вала двигателя, путем изменения частоты питающего напряжения на обмотках статора машины (система электропривода - ПЧ-АД) [4]. Данная система электропривода позволяет выполнить все требования, предъявляемые к электроприводу. В связи с тем, что нет необходимости поддерживать скорость на валу двигателя с большой точностью, возможно применение ПЧ со скалярным законом управления.

Для обоснования выбора системы электропривода проведем сравнительный анализ двух систем электроприводов (ПЧ-АД и ТП-Д) по различным критериям:

1) По конструктивному исполнению:

ТП-Д: конструкция двигателя значительно сложнее, больший расход меди, необходимо постоянно прочищать коллектор двигателя, возможен круговой огонь при перегрузках. Как следствие большие затраты на эксплуатацию.

ПЧ-АД: лишен всех предыдущих недостатков, но обладает большим моментом при разгоне и более мягкой механической характеристикой. Существенный недостаток - сложность в управлении.

2) По коэффициенту полезного действия:

ТП-Д: коэффициент полезного действия:

выпрямителя составит  $\eta_{\text{вост}} = 0,99$  [5, с.663]

двигателя постоянного тока  $\eta_{\text{ДПТ}} = 0,845$  [6]

привода  $\eta_{\text{вдл}} = \eta_{\text{шт}} \cdot \eta_{\text{шд}} = 0,99 \cdot 0,845 = 0,837$

ПЧ-АД: коэффициент полезного действия:

двухзвенного преобразователя  $\eta_{\text{преобр}} = 0,965 - 0,985$  [11]

асинхронного двигателя  $\eta_{\text{АД}} = 0,91$  привода [7, с.277]

$\eta_{\text{привода}} = \eta_{\text{преобр}} \cdot \eta_{\text{АД}} = (0,965 - 0,985) \cdot 0,91 = 0,878 - 0,896$

3) По влиянию на питающую сеть:

ТП-Д: в начале пуска имеет место значительный рост реактивной мощности, который может превышать значения в 3-4 раза больше мощности двигателя. При статической работе двигатель вносит искажения в питающую сеть. Коэффициент мощности меньше 1 и может достигать значений до 0,2 [8].

ПЧ-АД: Наводит в питающей сети гармоники. Коэффициент мощности около единицы.

4) По стоимости привода:

Стоимость непосредственно самого преобразователя напряжения сети, как в системе ТП-Д, так и в системе ПЧ-АД находится в одной ценовой категории. Для сравнения систем электроприводов будем использовать стоимость электрических машин.

Рассмотрим характеристики основных типов ПЧ.

а) НПЧ - предназначен для преобразования высокой частоты в низкую и состоит из 18 тиристоров, объединенных во встречно-параллельные группы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

(рис.2.1). В основе преобразователя лежит трехфазная нулевая схема выпрямления; каждая фаза преобразователя состоит из двух таких встречно включенных выпрямителей.

НПЧ различают с раздельным и совместным управлением.

При раздельном управлении управляющие импульсы должны подаваться на тиристоры одной из вентильных групп в соответствии с направлением тока в нагрузке. Для обеспечения раздельной работы применяется специальное логическое устройство, исключающее возможность прохождения тока в одной группе в то время, когда ток проходит в другой группе.

В преобразователях с совместной работой вентильных групп необходимо включение дополнительных реакторов, ограничивающих уравнительный ток между вентилями каждой группы, а углы управления положительной и отрицательной групп изменяются по определенному закону, исключающему появление постоянной составляющей уравнительного тока. Преобразователи с совместным управлением работой вентильных групп обладают большой установленной мощностью силовых элементов.

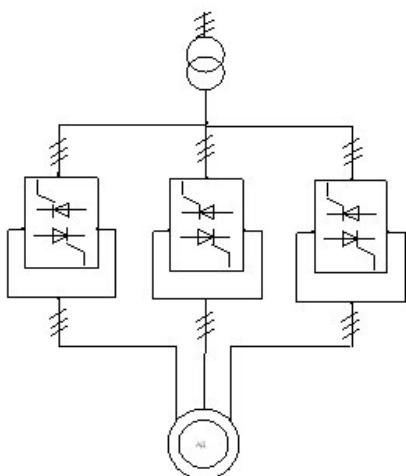


Рисунок 2.1 - ПЧ с непосредственной связью

Для получения выходного напряжения, близкого по форме к синусоидальному, необходимо изменять угол включения вентилей таким образом, чтобы среднее за полупериод питающей сети значение напряжения изменялось в течение полупериода выходного напряжения по синусоидальному закону. Регулирование частоты и напряжения на выходе преобразователя достигается изменением угла включения вентилей [11].

К достоинствам этого типа преобразователей можно отнести:

- 1) однократное преобразование энергии и, следовательно, высокий КПД (около 0,97-0,98);
- 2) возможность независимого регулирования амплитуды напряжения на выходе от частоты;
- 3) свободный обмен реактивной и активной энергией из сети к двигателю и

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	19
					ДП-140604.65 ПЗ	

обратно

4) отсутствие коммутирующих конденсаторов, так как коммутация тиристоров производится естественным путем (напряжением сети).

К недостаткам рассмотренного ПЧ относятся:

1) ограниченное регулирование выходной частоты (от 0 до 40 % частоты сети);

2) сравнительно большое число силовых вентилей и сложная схема управления ими;

3) невысокий коэффициент мощности - максимальное значение на входе преобразователя около 0,8.

б) ПЧ со звеном постоянного тока

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых приводах находят преобразователи с явно выраженным звеном постоянного тока, принципиальная схема которого приведена на рис.2.2. В преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (УВ), фильтруется фильтром (С), сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором (И) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению КПД и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

Преобразователь с промежуточным звеном постоянного тока позволяет регулировать частоту как вверх, так и вниз от частоты питающей сети; он отличается высоким КПД (около 0,96), значительным быстродействием, сравнительно малыми габаритами и надежностью.

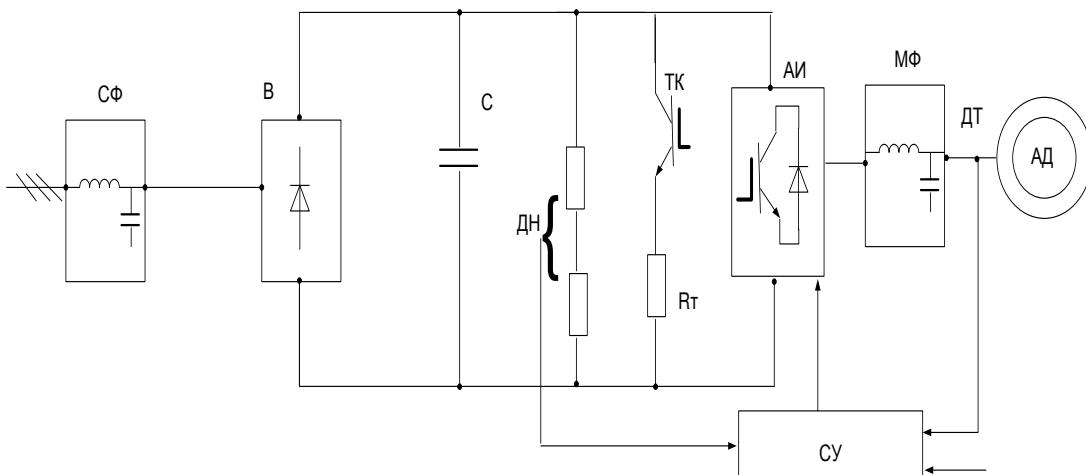


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема ПЧ со звеном постоянного тока

СФ - сетевой фильтр для отсечения высших гармоник; В - выпрямитель, обычно не регулируемый (в ПЧ первого поколения) для регулирования напряжения в звене

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

постоянного тока; ДН и ДТ - датчики напряжения и тока; ТК - тормозной ключ; АИ - автономный инвертор, обычно ШИМ; МФ - мотор-фильтр, уменьшение высших гармоник на двигатель; СУ - система управления.

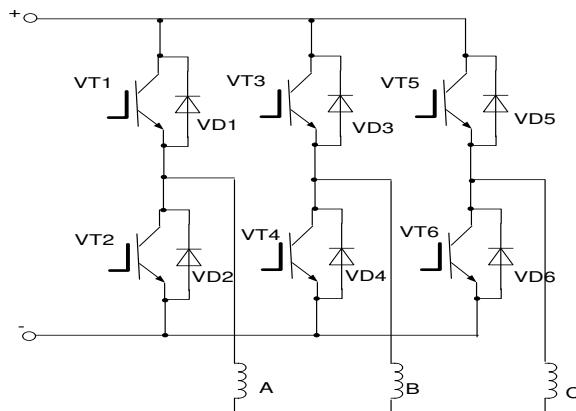


Рисунок 2.3 - Принципиальная схема АИ

В качестве запираемых ключом в АИ могут использоваться GTO тиристоры или IGBT транзисторы.

Тиристор является полууправляемым прибором: для его включения достаточно подать короткий импульс на управляемый вывод, но для выключения необходимо либо приложить к нему обратное напряжение, либо снизить коммутируемый ток до нуля. Для этого в тиристорным преобразователе частоты требуется сложная и громоздкая система управления.

Биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT отличают от тиристоров полная управляемость, простая неэнергоемкая система управления, самая высокая рабочая частота.

Вследствие этого преобразователи частоты на IGBT позволяют расширить диапазон управления скорости вращения двигателя, повысить быстродействие привода в целом.

Применение IGBT с более высокой частотой переключения в совокупности с микропроцессорной системой управления в преобразователях частоты снижает уровень высших гармоник, характерных для тиристорных преобразователей. Как следствие - меньшие добавочные потери в обмотках и магнитопроводе электродвигателя, уменьшение нагрева электрической машины, снижение пульсаций момента и исключение так называемого «шагания» ротора в области малых частот. Снижаются потери в трансформаторах, конденсаторных батареях, увеличивается их срок службы и изоляции проводов, уменьшаются количество ложных срабатываний устройств защиты и погрешности индукционных измерительных приборов.

Изменением периода подачи управляемых импульсов на силовые ключи достигается изменение частоты напряжения, подаваемого на двигатель.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

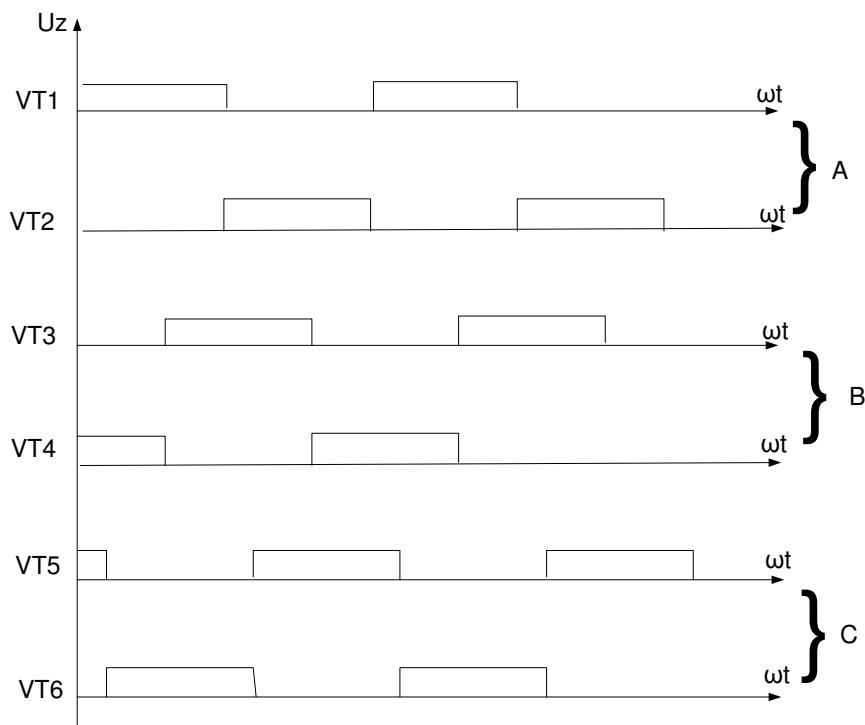


Рисунок 2.4 - Алгоритм подачи импульсов на транзисторы

При таком алгоритме в любой момент времени работают три силовых ключа (VT1, VT4, VT6)

Для работы двигателя необходимо с изменением частоты изменять и напряжение. Для этого его изменяют в звене постоянного тока либо используют ШИМ. При выборе соотношений между частотой и напряжением чаще всего исходят из условий сохранения перегрузочной способности.

Выбор преобразователя частоты производят исходя из условий:

$$I_{вых.нч} \geq I_{1н}; U_{вых.нч} \geq U_{1н}$$

### 3 Расчетная часть

#### 3.1 Составление расчетной схемы электропривода и приведение параметров

Исходными данными для правильного расчета мощности и выбора типа электропривода являются технологические и конструктивные требования, которые возникают в связи с эффективностью использования производственных механизмов.

Одним из основных элементов электропривода определяющим, в значительной степени, его технические и экономические показатели является электродвигатель. Применение электродвигателя недостаточной мощности может вызвать нарушение в нормальной работе механизма, понижение его

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП-140604.65 ПЗ	Лист
						22

производительности, аварию и выход из строя двигателя. Использование двигателя завышенной мощности приведет к неоправданному увеличению капитальных затрат, снижения КПД двигателя.

Двигатели серии 4А выпускались в 80-х годах XX века в массовом количестве и в настоящее время эксплуатируются, практически на всех промышленных предприятиях России. Серия охватывает диапазон мощностей от 0,6 до 400 кВт и построена на 17 стандартных высотах оси вращения от 50 до 355 мм. Серия включает основное исполнение двигателей, ряд модификаций и специализированные исполнения. Двигатели основного исполнения предназначены для нормальных условий работы и являются двигателями общего назначения [7, с.103]. Это трехфазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту сети 50 Гц. Они имеют исполнение по степени защиты IP44 во всем диапазоне высот оси вращения и IP23 в диапазоне высот осей вращения 160...355 мм.

Модификации и специализированные исполнения двигателей построены на базе основного исполнения и имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов. Такие двигатели выпускаются отдельными отрезками серии на определенные высоты оси вращения и предназначены для применения в качестве приводов механизмов, предъявляющих специфические требования к двигателю или работающих в условиях, отличных от нормальных по температуре или чистоте окружающей среды.

К электрическим модификациям двигателей серии 4А относятся двигатели с повышенным номинальным скольжением, повышенным пусковым моментом, многоскоростные, частотой питания 60 Гц. К конструктивным модификациям относятся двигатели с фазным ротором, со встроенным электромагнитным тормозом, малошумные, со встроенной температурной защитой.

По условиям окружающей среды различают модификации двигателей тропического исполнения, влагоморозостойкого, химостойкого, пылезащищенные и сельскохозяйственные.

Большинство двигателей серии 4А имеют степень защиты IP44 и выпущено в конструктивном исполнении, относящемся к группе IM1, т. е. с горизонтальным валом, на лапах, с двумя подшипниковыми щитами. Корпус двигателей выполнен с продольными радиальными ребрами, увеличивающими поверхность охлаждения и улучшающими отвод тепла от двигателя в окружающий воздух. На противоположном от рабочего конце вала укреплен вентилятор, прогоняющий охлаждающий воздух вдоль ребер корпуса. Вентилятор закрыт кожухом с отверстиями для прохода воздуха.

Магнитопровод двигателей - шихтованный из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, причем двигателей с  $h = 50 \dots 250$  мм из стали марки 2013, а двигателей с  $h = 280 \dots 355$  мм - из стали марки 2312 [7].

Во всех двигателях серии с  $h < 280$  мм и в двигателях с  $2p = 10$  и  $12$  всех

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	23
					ДП-140604.65 ПЗ	

высот оси вращения обмотка статора выполнена из круглого провода и пазы статора полузакрытые. При  $h = 280\ldots355$  мм, кроме двигателей с  $2p = 10$  и 12, катушки обмотки статора намотаны прямоугольным проводом, подразделенные и пазы статора полуоткрытые.

Коробка выводов расположена сверху станины, что облегчает монтажные работы при соединении двигателя с сетью.

Исходные данные для расчета:

1. Высота подъёма подзема буровой колоны, м  $H_{prod} = 0$
2. Угол подъема, град.  $\beta = 0$
3. Производительность, т/час  $Q = 1500$
4. Скорость движения колоны, м/с  $v = 3,15$
5. Вес вращающихся частей роликоопоры верхней ветви, кг  $GB = 44$
6. Вес вращающихся частей роликоопоры нижней ветви, кг  $GH = 21$
7. Шаг установки роликов на верхней ветви, м  $LPB = 1,25$
8. Шаг установки роликов на нижней ветви, м  $LPH = 2,5$
9. Коэффициент учёта дополнительных сопротивлений  $KD = 1,05$
10. Коэффициент сопротивления движению по роликоопорам ССОП = 0,032
11. Мощность на первом барабане, кВт  $N1 = 250$
12. Мощность на втором барабане, кВт  $N2 = 500$
13. Угол обхвата первого барабана, град.  $\alpha_1 = 3,45$
14. Угол обхвата второго барабана, град.  $\alpha_2 = 3,45$
15. Коэффициент сцепления  $\mu_1 = 0,25$
16. Коэффициент запаса  $n = 8$
17. Коэффициент динаминости  $KД = 0,85$
18. Кратность пускового момента  $KП = 1,4$
19. Коэффициент угла установки  $K1 = 1,1$
20. Коэффициент снижения производительности  $K\beta = 0,85$

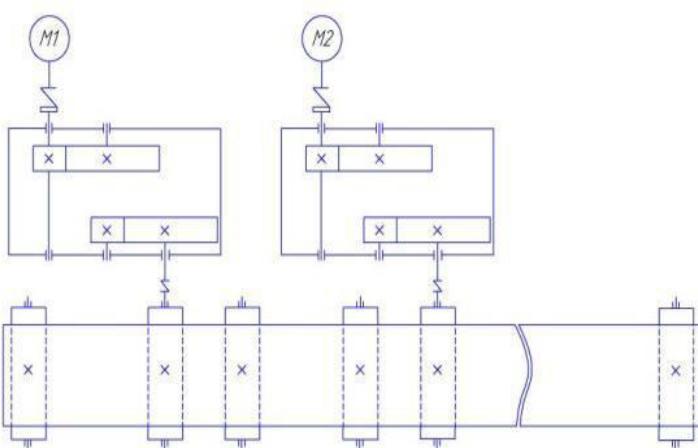


Рисунок 3.1.1 - Кинематическая схема

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

### 3.2 Выполнение упрощений

Фазы роторной обмотки соединяются в звезду и реже в треугольник и подводятся к трем контактным кольцам, расположенным на валу двигателя и изолированным друг от друга. В цепь обмотки фазного ротора с помощью контактных колец и соприкасающихся с ними щеток можно вводить добавочные сопротивления или э. д. с. Это используется при необходимости изменения рабочих или пусковых характеристик двигателей. Кроме того, с помощью контактных колец и щеток можно замыкать обмотку ротора накоротко. Для уменьшения износа щеток в ряде конструкций асинхронных двигателей имеются специальные щеткоподъемные приспособления. С помощью этих устройств по окончании пуска двигателя контактные кольца замыкаются накоротко и образуют короткозамкнутый ротор, а щетки приподнимаются и не участвуют в работе [10].

Между ротором и статором асинхронных двигателей имеется воздушный зазор. Величина его составляет как правило 0,25-0,35 мм. Он проектируется как минимальный, допускаемый по механическим соображениям при изготовлении. Это обусловливается тем, что ротор имеет непосредственную связь со статором через магнитный поток, создаваемый статором. Чем меньше воздушный зазор между ними, тем эффективнее эта связь и тем более экономичным получается асинхронный двигатель.

В пазах сердечника статора размещается многофазная обмотка, которая подсоединяется к сети переменного тока. Многофазные симметричные обмотки с числом фаз  $t$  включают в себя  $t$  фазных обмоток, которые соединяются в звезду или многоугольник. Так, например, в случае трехфазной обмотки статора число фаз  $t=3$  и обмотки могут соединяться в звезду или треугольник. Между собой обмотки фаз смешены на угол  $360/t$  град; для трехфазной обмотки этот угол равен  $120^\circ$ .

Обмотки фаз выполняются из отдельных катушек, соединенных последовательно, параллельно либо последовательно-параллельно. В данном случае под катушкой подразумеваются несколько последовательно соединенных витков обмотки статора, размещенных в одних и тех же пазах и имеющих общую изоляцию относительно стенок паза. В свою очередь витком считаются два активных (т. е. расположенных в самом сердечнике статора) проводника, расположенных в двух пазах под соседними разноименными полюсами и соединенных друг с другом последовательно. Проводники, расположенные вне сердечника статора и соединяющие активные проводники между собой, называются лобовыми частями обмотки. Прямолинейные части катушек обмоток, расположенные в пазах, называются сторонами катушек или пазовыми частями.

Пазы статора, в которые укладываются обмотки, образуют на внутренней стороне статора так называемые зубцы. Расстояние между центрами двух соседних зубцов сердечника статора, измеренное по его поверхности, обращенной к

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	ДП-140604.65 ПЗ	25

воздушному зазору, называется зубцовым делением или пазовым делением.

Катушки обмоток статора характеризуются определенным числом витков  $w_1$  и шагов  $y_1$ . Шаг катушки определяется числом зубцовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые укладываются проводники катушек. Шаг катушки считается полным - диаметральным, если он равен полюсному делению, т. е.  $y_1 = \tau_1 = Z_1/2p$ . Если шаг меньше полюсного деления, то он носит название укороченного. Под полюсным делением  $\tau_1$  (см) понимается длина окружности расточки сердечника статора, приходящаяся на один полюс его магнитного поля. Величина полюсного деления может быть найдена по формуле:

$$\tau_1 = \frac{1}{2p} \pi D \quad (1)$$

где  $D$  - диаметр расточки статора, см;

$2p$  - число полюсов обмотки статора.

Полюсное деление может быть также выражено числом пазовых делений, заключенных между осями соседних полюсов.

Центральный угол, соответствующий полюсному делению, составляет в двухполюсном электродвигателе 180, в четырехполюсном 90, в шестиполюсном 60° и т. д. Принято считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180 эл. град. Тогда число электрических градусов в окружности расточки для двигателя, имеющего  $2p$  полюсов, составит  $180 \cdot 2p$ .

Катушка с укороченным шагом может характеризоваться некоторым коэффициентом укорочения, который выражается отношением шага катушки  $y_1$  к величине полюсного деления  $\tau_1$ , т. е.:

$$\alpha = \frac{y_1}{\tau_1} \quad (2)$$

Укорочение шага приводит к снижению э. д. с., индуцируемой в катушке, так как при этом обе стороны витка не находятся одновременно под центрами соседних разноименных полюсов. Однако такие исполнения катушек имеют и ряд положительных сторон: экономия меди за счет лобовых частей, облегчение укладки катушек в пазы статора. Кроме того, при этом улучшаются электрические показатели двигателя за счет снижения так называемых высших гармонических, которые увеличивают потери и ухудшают форму поля э. д. с.

Катушки одной фазы обмотки статора, расположенные в соседних пазах и соединенные друг с другом последовательно, объединяются в так называемую катушечную группу. В свою очередь катушечные группы могут соединяться внутри каждой фазы последовательно или объединяться в параллельные ветви.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Параллельные ветви присоединяются к внешним зажимам фазы. Число параллельных ветвей фазы  $a_1$  является одним из показателей обмоток переменного тока [7].

Одним из характерных показателей обмоток статора асинхронного двигателя является также число пазов на полюс и фазу  $q_1$ . Эта величина показывает, сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на каждый полюс обмотки статора или из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки. Значение  $q_1$  можно найти из выражения:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} \quad (3)$$

где  $Z_1$  - число пазов статора;

$m$  - число фаз обмотки статора.

Для обмотки ротора соответственно:

$$q_2 = m \frac{Z_2}{2p} \quad (4)$$

Величина  $q$  может быть, как целой, так и дробной. Однако в асинхронных двигателях наибольшее распространение получили обмотки с целым числом  $q$ .

В пазы статоров машин переменного тока закладываются как однослойные, так и двухслойные обмотки. Отличие двухслойной обмотки от однослойной заключается в том, что в пазы статора закладываются стороны двух катушек, а каждая катушка устанавливается на статоре в двух слоях. Один слой катушки размещается на дне паза, а другой в части паза, прилегающей к расточке статора - к воздушному зазору. Лобовые части катушки также располагаются в два слоя, а соединения слоев осуществляются в головках катушек. При двухслойном выполнении обмоток статора все катушки изготавливаются одинаковыми, что упрощает и удешевляет производство и делает их более технологичными.

### 3.3 Выбор двигателя и построение уточненной нагрузочной диаграммы

Исходя из вышеописанного выбираем асинхронный двигатель серии 1ВАО-560S-4У2,5. Основные характеристики приведены в табл. 1:

Таблица 1- Основные характеристики

Номинальная мощность, кВт	500
Номинальная частота вращения, об/мин	1485
Коэффициент полезного действия, %	95,0

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Продолжение таблицы 1

Коэффициент мощности	0,89
Напряжение ,кВ	6
Номинальный момент, Нм	1613
Индекс механической характеристики	V
Отношение пускового момента к номинальному моменту	1,2
Отношение пускового тока к номинальному току	6,0
Отношение максимального момента к номинальному моменту	2,5
Динамический момент инерции ротора, кг*м <sup>2</sup>	3,97

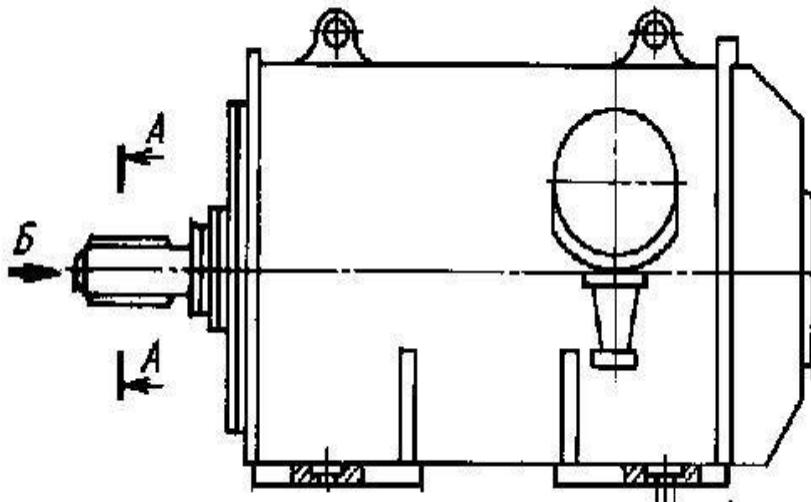


Рисунок 3.3.1 -Двигатель серии 1BAO-560S-4Y2,5

Система охлаждения двигателей является комбинацией способов IC014 и IC041. Охлаждение двигателей осуществляется центробежным вентилятором, расположенным на валу двигателя со стороны противоположной приводу, обдувающим ребристую станину и вентиляционными лопатками ротора, всасывающими воздух через нижнюю часть отверстий в подшипниковых щитах [7]. Воздух омывает лобовые части обмотки и выбрасывается через отверстия в верхней части щитов.

Для защиты двигателей в аварийных режимах, следствием которых может быть нагрев обмотки до недопустимой температуры, по заказу потребителя двигатель может быть укомплектован встроенными температурными датчиками. В качестве датчиков используются полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом - позисторы. Датчики

встраиваются в лобовые части обмотки статора со стороны противоположной вентилятору наружного обдува по одному в каждую фазу, соединяются последовательно, концы цепи датчиков выводятся на специальные клеммы в коробке выводов. К этим клеммам подключают реле или иной аппарат, реагирующий на сигнал датчиков. Датчики реагируют только на температуру, их действие не зависит от причин возникновения опасного нагрева. Поэтому такая система обеспечивает защиту двигателя как в режимах с медленным нагреванием (перегрузка, работа на двух фазах), так и в режимах с быстрым нагреванием (заклинивание ротора, выход из строя подшипников и другое).

При автоматическом пуске двигателя рукоятка команд аппарата SA устанавливается в одном из крайних положений (вправо или влево) [9]. При постановке рукоятки команд аппарата в крайнее правое положение (позиция 6) замыкаются контакты SA-1, SA-3, SA-4, SA-5, SA-6, SA-7 и размыкается контакт SA-0. (Рисунок 4.1)

При замыкании контакта SA-1 ток, протекающий через катушку контактора KM1 (по цепи: QS2-FU1-KU1-SA-1-KM2.2-KM1-KU2-FU2-QS2), вызывает его срабатывание и замыкание линейных (силовых) контактов KM1.1, приводящих к подаче напряжения на статор двигателя M, который начинает вращаться согласно искусственной механической характеристике с добавочными резисторами R<sub>d1</sub>+R<sub>d2</sub>+R<sub>d3</sub>+R<sub>d4</sub>+R<sub>d5</sub>. Одновременно с этим размыкается блок-контакт KM1.2, обеспечивающий электрическую блокировку, замыкаются блок-контакты KM1.3, шунтирующий контакт KU2, и KM1.4, KM1.5.

При замыкании блок-контакта KM1.4 ток протекает через катушку реле дуговой блокировки KU2, приводит к его срабатыванию и размыканию контакта KU2. Замыканием блок-контакта KM1.5 осуществляется подготовка цепи питания катушки контактора ускорения KM3. Пуск двигателя сопровождается броском пускового тока, вызывающего срабатывание реле тока KA3 и размыкание его контакта KA3 в цепи контактора ускорения KM3, не позволяющего включению контактора ускорения KM3. Увеличение скорости двигателя приводит к снижению тока. Как только ток достигнет значения I=303 А, соответствующего моменту переключения M2, якорь реле тока KA3 отпадает, а его контакт KA3 в цепи контактора ускорения KM3 замыкается. Это приводит к срабатыванию контактора ускорения KM3 и к замыканию его главных контактов KM3.1, шунтирующих первую ступень пускового резистора R<sub>d1</sub> и к переводу двигателя на новую искусственную механическую характеристику с добавочными резисторами R<sub>d2</sub>+R<sub>d3</sub>+R<sub>d4</sub>+R<sub>d5</sub>. Одновременно с этим замыкается блок-контакт KM3.2, подготавливающий цепь питания катушки контактора ускорения KM4.

Переход двигателя на новую искусственную механическую характеристику вновь сопровождается броском тока, приводящим к срабатыванию реле тока KA4. Разомкнувшийся его контакт KA4 не приводит к срабатыванию контактора ускорения KM4. Увеличение скорости двигателя сопровождается снижением тока.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

Как только ток достигнет значения  $I=303$  А, соответствующего моменту переключения М2, якорь реле тока КА4 отпадает, а его контакт КА4 в цепи контактора ускорения КМ4 замыкается. Это приводит к срабатыванию контактора ускорения КМ4 и к замыканию его главных контактов КМ4.1, шунтирующих вторую ступень пускового резистора  $R_d2$ , и к переходу двигателя на новую искусственную механическую характеристику с добавочным сопротивлением  $R_d3+R_d4+R_d5$ . Одновременно с этим замыкается блок-контакт КМ4.2, подготавливающий цепь питания катушки контактора ускорения КМ5. Переход двигателя на новую искусственную механическую характеристику сопровождается броском тока, приводящим к срабатыванию реле тока КА5. Размыкается его контакт КА5, что предотвращает срабатывание контактора ускорения КМ5. Увеличение скорости двигателя приводит к снижению тока. Как только ток достигнет значения  $I=303$  А, соответствующего моменту переключения М2, якорь реле тока КА5 отпадает, а его контакт КА5 в цепи контактора ускорения КМ5 замыкается. Это приводит к срабатыванию контактора ускорения КМ5 и к замыканию его главных контактов КМ5.1, шунтирующих третью ступень пускового резистора  $R_d3$ , и к переходу двигателя на новую искусственную механическую характеристику с добавочным сопротивлением  $R_d4+R_d5$ . Одновременно с этим замыкается блок-контакт КМ5.2, подготавливающий цепь питания катушки контактора ускорения КМ6. Переход двигателя на новую искусственную механическую характеристику сопровождается броском тока, приводящим к срабатыванию реле тока КА6. Разомкнувшийся его контакт КА6 не приводит к срабатыванию контактора ускорения КМ6. Увеличение скорости двигателя сопровождается снижением тока. Как только ток достигнет значения  $I=303$  А, соответствующего моменту переключения М2, якорь реле тока КА6 отпадает, а его контакт КА6 в цепи контактора ускорения КМ6 замыкается. Это приводит к срабатыванию контактора КМ6 и к замыканию его главных контактов КМ6.1, шунтирующих четвертую ступень пускового резистора  $R_d4$ , и к переходу двигателя на новую искусственную механическую характеристику с добавочным сопротивлением  $R_d5$ . Одновременно с этим замыкается блок-контакт КМ6.2, подготавливающий цепь питания катушки контактора ускорения КМ7. Переход двигателя на новую искусственную механическую характеристику сопровождается броском тока, приводящим к срабатыванию реле тока КА7. Размыкается его контакт КА7, что предотвращает срабатывание контактора ускорения КМ7. Увеличение скорости двигателя приводит к снижению тока. Как только ток достигнет значения  $I=303$  А, соответствующего моменту переключения М2, якорь реле тока КА7 отпадает, а его контакт КА7 в цепи контактора ускорения КМ7 замыкается. Это приводит к срабатыванию контактора КМ7 и к замыканию его главных контактов КМ7.1, шунтирующих пятую ступень пускового резистора  $R_d5$ . И двигатель начинает работать на естественной характеристике.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ 30

### 3.4 Составление уравнений движения системы определение передаточных функций механической части и построение ЛАЧХ и ЛФЧХ

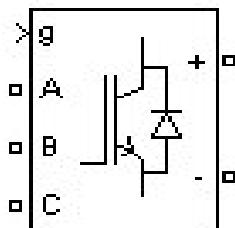


Рисунок 3.4.1 - Блок The Universal Bridge

Блок The Universal Bridge является универсальным конвертером с тремя фазами, который состоит из шести выключателей мощности, связанных в конфигурацию моста. Тип выключателя мощности и конфигурация конвертера выбирается в диалоговом окне. Блок позволяет моделирование конвертеров, используя свободно коммутируемые электронные устройства (диоды или тиристоры) и принудительно коммутируемые устройства (GTO, IGBT, MOSFET).

Используем данный блок в качестве инвертора.

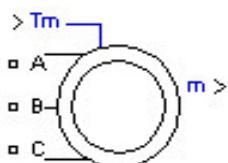


Рисунок 3.4.2 - Machine

Machine - модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Из этих блоков собираем модель управления двигателем:

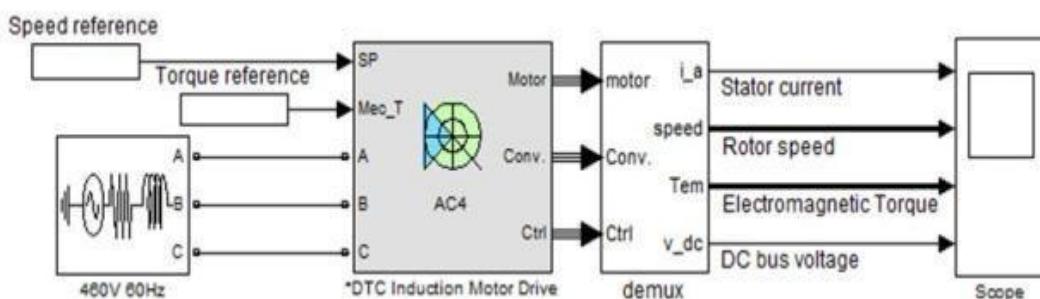
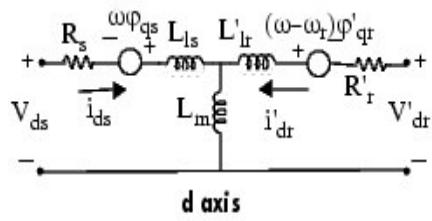
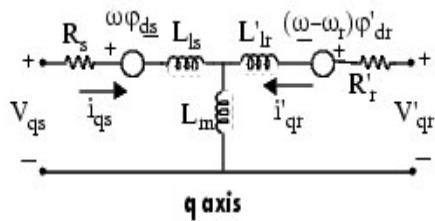


Рисунок 3.4.3 – Модель управления двигателем

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Электрическая система блока:



$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega \varphi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega \varphi_{qs}$$

$$V'_{qr} = R'_r i'_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{qr} + (\omega - \omega_r) \varphi'_{dr}$$

$$V'_{dr} = R'_r i'_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi'_{dr} - (\omega - \omega_r) \varphi'_{qr}$$

$$T_e = 1.5 p (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

$$\varphi'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L'_r = L'_{lr} + L_m$$

Субсистема DTC Induction Motor Drive:

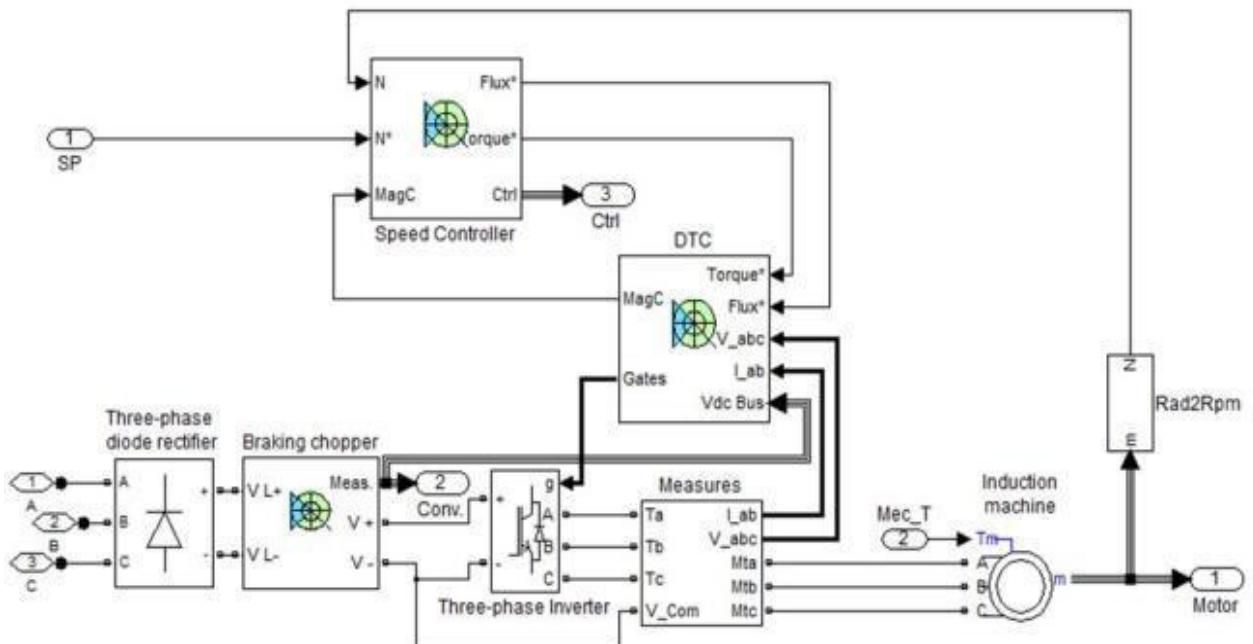


Рисунок 3.4.4 - Субсистема DTC Induction Motor Drive

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Механическая система блока:

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2H}(T_e - F\omega_m - T_m)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m$$



Рисунок 3.4.5 - Bus Selector

Bus Selector - выводит указанное множество сигналов поступающих на вход.

Субсистема Demux:

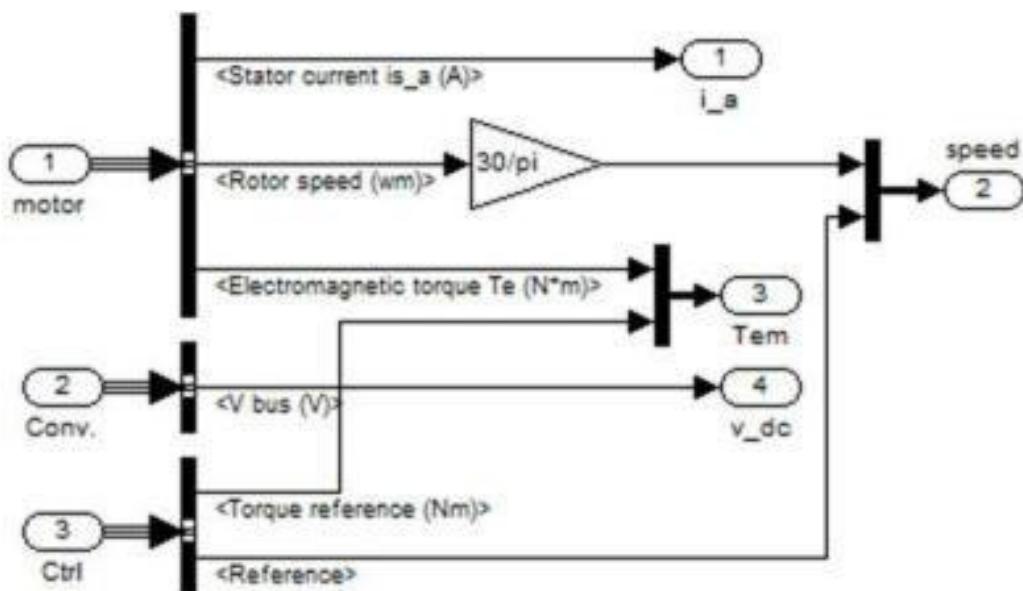


Рисунок 3.4.6 - Субсистема Demux

ПИД-регулятор обеспечивает заданную скорость на исполнительном механизме (двигателе), независимую от действующей на него постоянной или медленно изменяющейся нагрузки [10].

ПИД-регулятор - пропорционально-интергально-дифференциальный регулятор. ПИД-регулятор состоит соответственно из пропорционального ( $K_p$ ), интегрального ( $K_i/s$ ) и дифференциального ( $K_{ds}$ ) звена, у каждого из них свой коэффициент усиления.

В результате моделирования получаем следующие характеристики системы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ПЧ-АД:

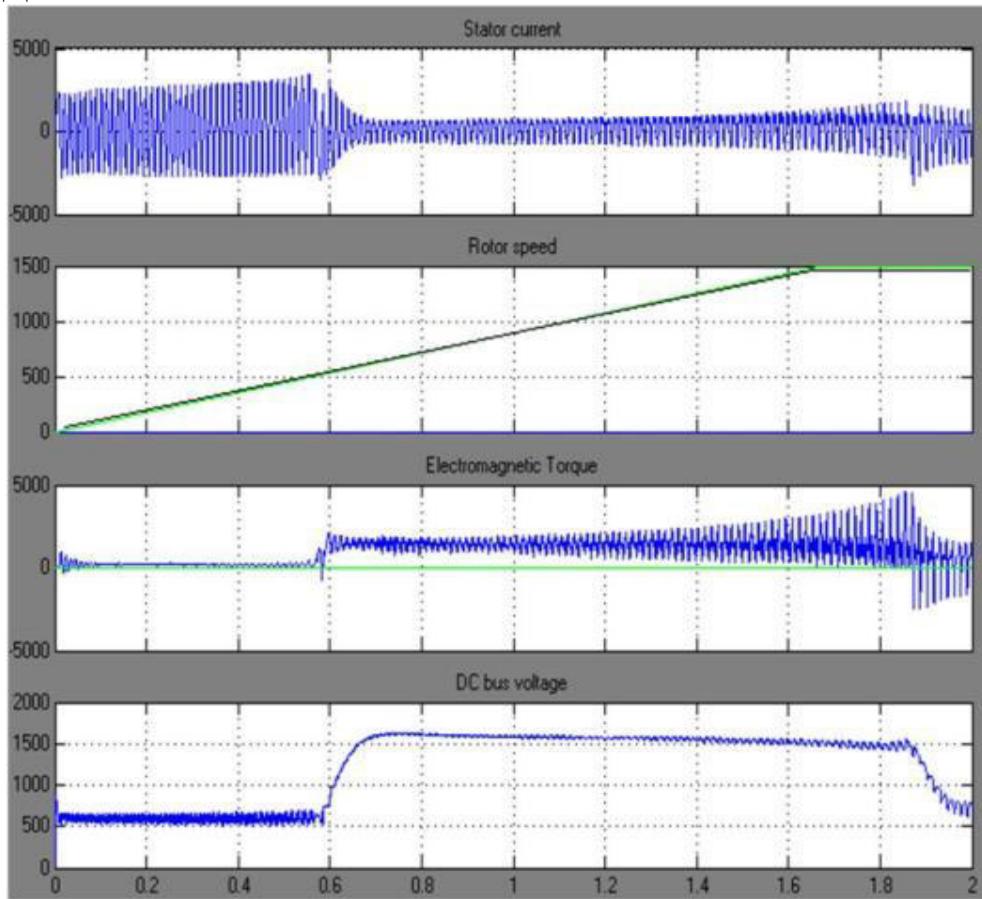


Рисунок 3.4.7 - Характеристики системы ПЧ-АД

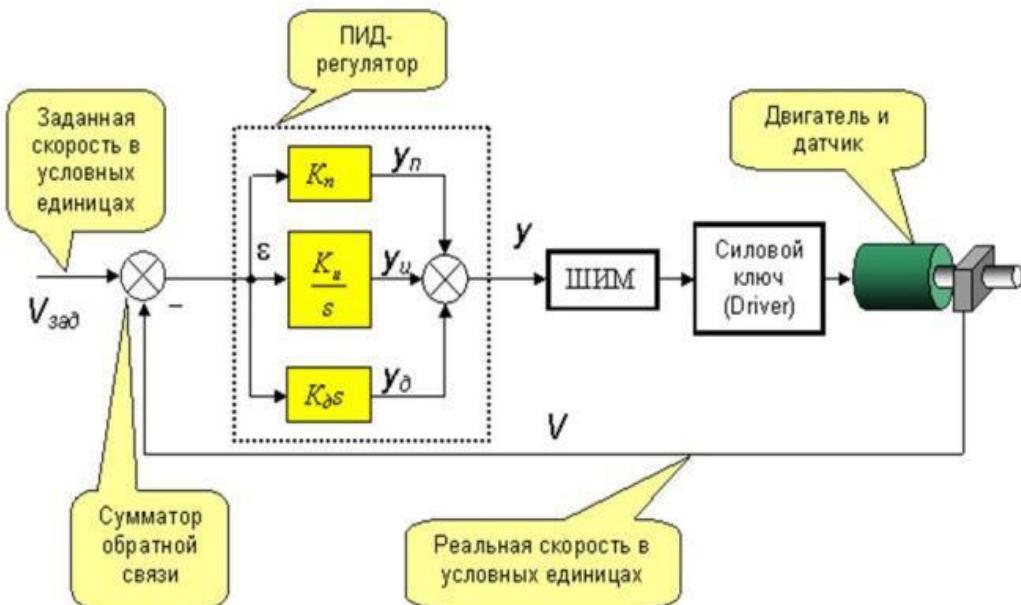


Рисунок 3.4.8 - Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

где  $s$  - оператор Лапласа (иногда его обозначают, как  $p$ ). Если абстрагироваться от преобразований Лапласа, то записи  $K_p$ ,  $K_i/s$  и  $K_d s$  следует воспринимать, лишь как обозначения соответствующего звена, а не как к математическому выражению. И уж точно не стоит искать значение  $s$ , потому что, как уже было сказано, это оператор, а не переменная.

В системе с ПИД-регулятором реальная скорость  $V(t)$  двигателя измеряется с помощью датчика.

На вход системы поступает заданное значение скорости  $V_{зад}(t)$  в тех же единицах, что и реальная скорость.

Сумматор обратной связи вычитает из сигнала задания на скорость  $V_{зад}(t)$  сигнал реальной скорости  $V(t)$  и формирует на выходе сигнал ошибки  $e(t)$ :

$$\varepsilon(t) = V_{зад}(t) - V(t) \quad (1)$$

Сигнал ошибки поступает на пропорциональное, интегральное и дифференциальное звенья ПИД-регулятора.

Пропорциональное звено производит умножение сигнала ошибки  $e(t)$  на коэффициент  $K_n$  и формирует выходной сигнал  $y_n$ .

$$y_n(t) = K_n \cdot \varepsilon(t) \quad (2)$$

Интегральное звено производит интегрирование сигнала  $e(t)$  по времени, умножает на коэффициент  $K_u$  и формирует выходной сигнал  $y_u$ .

$$y_u(t) = K_u \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad (3)$$

Дифференциальное звено производит дифференцирование сигнала ошибки по времени  $e(t)$ , умножения результата на число  $K_\delta$  и формирование выходного сигнала  $y_\delta$ .

$$y_\delta(t) = K_\delta \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (4)$$

Сумматор ПИД-регулятора суммирует сигналы  $y_n(t)$ ,  $y_u(t)$  и  $y_\delta(t)$  и формирует выходной сигнал  $y(t)$ :

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$y(t) = y_n(t) + y_u(t) + y_o(t) \quad (5)$$

ШИМ и силовой ключ предназначены для передачи на двигатель рассчитанного выходного сигнала  $y(t)$ .

Расчет коэффициентов ПИД-регулятора

ПИД-регулятор характеризуется тремя коэффициентами  $K_n$ ,  $K_u$  и  $K_o$ . Для расчета этих коэффициентов необходимо знать параметры объекта управления, в данном случае двигателя.

Структура и параметры объекта управления: с точки зрения теории автоматического управления двигатель приближенно описывается: двумя апериодическими звеньями с электрической постоянной времени  $T_e$  и механической постоянной времени  $T_m$ . Общий коэффициент усиления двигателя  $K_{oe}$ . На самом деле, структурная схема двигателя намного сложнее, но нам это в данном случае не так важно.

Структурная схема двигателя с точки зрения теории автоматического управления:

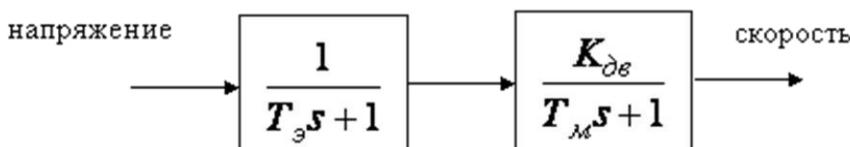


Рисунок 3.4.9 – Структурная схема двигателя

Передаточная функция двигателя, записанная через оператора Лапласа  $s$ , следующая:

$$W_{oe}(s) = \frac{K_{oe}}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)} \quad (6)$$

Коэффициент усиления двигателя  $K_{oe}$  определяет пропорциональность между скоростью вращения вала двигателя на холостых оборотах и поданным на вход напряжением. Проще говоря, коэффициент равен отношению скорости холостого хода  $V_{xx}$  и номинального напряжения двигателя  $U_n$ .

$$W_{oe}(s) = \frac{K_{oe}}{(T_e s + 1)(T_m s + 1)} \quad (7)$$

Напряжение на двигателе в микропроцессорной технике задается в условных единицах напряжения, а скорость снимается в условных единицах скорости.

Если для формирования напряжения на двигателе используется 7-битный ШИМ, то для расчета Кдв величина номинального напряжения равна 128 условных единиц напряжения.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Скорость холостого хода  $w_{xx}$ , заданную в паспортных данных двигателя, следует перечитать в условные единицы скорости  $V_{xx}$ , определяемые способом реализации датчика скорости.

Например, пусть для измерения скорости используется инкрементный датчик, расположенный на валу двигателя, и имеющий 512 меток на оборот. Пусть скорость в условных единицах измеряется как количество меток за такт расчета  $Dt$ . Пусть такт расчета, полученный путем оценки производительности алгоритма будет равен 0.001 сек. Пусть скорость холостого хода двигателя  $w_{xx}=1500$  об/мин.

Переведем обороты двигателя в метки датчика, получаем:  $1500 \times 512 = 768000$  меток/мин. Переведем минуты в такты расчета:

$$V_{xx} = \frac{768000}{60} \times \Delta t = \frac{768000}{60} \times 0.001 = 12,8 \approx 13 \text{ меток/такт}$$

Механическая постоянная времени  $T_m$  зависит от момента инерции вала двигателя, редуктора, инерции исполнительного устройства. Подсчитать ее значение аналитическим способом обычно не представляется возможным. Поэтому ее измеряют экспериментально [10, с.392].

Для этого на двигатель при его номинальной нагрузки скачком подают максимальное напряжение и снимают переходной процесс изменения скорости  $V(t)$ .

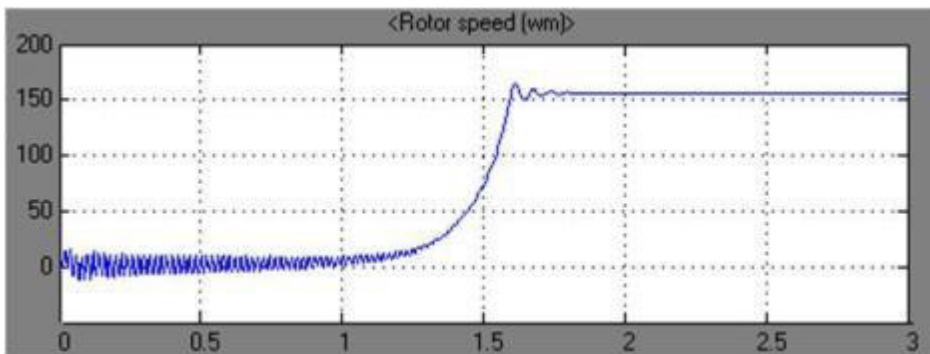


Рисунок 3.4.10— График переходного процесса изменения скорости

По графику переходного процесса можно определить, во-первых, скорость холостого хода  $V_{xx}$ , а во-вторых, время регулирования  $t_p$ . Время регулирования определяется временем окончания переходного процесса (время, когда кривая переходного процесса отличается меньше чем на 1% от установленного значения).

Известно, что время апериодического переходного процесса в пять раз длиннее его постоянной времени. Т.е.:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$t_p = 5 \cdot T \quad (8)$$

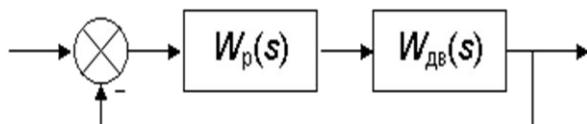
Отсюда для нашего случая получаем:

$$T_m = \frac{t_p}{5} \quad (9)$$

В нашем случае время регулирования  $t_p$ , судя по графику, равно 1.8 сек. Тогда механическая постоянная времени  $T_m = 1.8/5 = 0.36$  сек.

Таким образом, построив график переходного процесса, мы находим механическую постоянную времени  $T_m$

Чтобы рассчитать коэффициенты ПИД-регулятора следует решить обратную задачу динамики. Для этого абстрагируемся от ПИД-регулятора. Будем полагать, что структура регулятора, т.е. его передаточная функция  $W_p(s)$ , нам неизвестна. Зато известна передаточная функция объекта управления  $W_{dv}(s)$ .



Запишем передаточную функцию замкнутой системы  $W_3(s)$ :

$$W_3(s) = \frac{W_p(s) \cdot W_{dv}(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{dv}(s)} \quad (10)$$

Нас вполне устраивает апериодический переходный процесс в системе. Именно так система должна реагировать на изменение скорости и нагрузки.

Пусть желаемая постоянная времени переходного процесса  $T_{ж}$  будет примерно равна  $T_m$ . Т.е. передаточная функция желаемой системы  $W_{ж}(s)$  равна:

$$W_{ж}(s) = \frac{1}{T_{ж}s + 1} \quad (11)$$

Приравняем передаточную функцию замкнутой системы к передаточной функции желаемой системы:

$$W_{ж}(s) = W_3(s)$$

$$\frac{1}{T_{ж}s + 1} = \frac{W_p(s) \cdot W_{dv}(s)}{1 + W_p(s) \cdot W_{dv}(s)}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

(12)

Путем простых математических преобразований, выразим отсюда выражение для передаточной функции регулятора  $W_p(s)$ :

$$W_p(s) = \frac{1}{T_{\mathcal{H}} s \cdot W_{\text{дв}}(s)} \quad (13)$$

Подставим значение  $W_{\text{дв}}(s)$ :

$$\begin{aligned} W_p(s) &= \frac{1}{T_{\mathcal{H}} \cdot s \cdot \frac{K_{\text{дв}}}{(T_3 s + 1)(T_M s + 1)}} = \frac{1}{T_{\mathcal{H}} \cdot s \cdot \frac{K_{\text{дв}}}{T_M T_3 s^2 + (T_M + T_3) \cdot s + 1}} = \\ &= \frac{T_M T_3 s^2 + (T_M + T_3) \cdot s + 1}{T_{\mathcal{H}} \cdot s \cdot K_{\text{дв}}} = \frac{T_M T_3 s^2}{T_{\mathcal{H}} \cdot s \cdot K_{\text{дв}}} + \frac{(T_M + T_3) \cdot s}{T_{\mathcal{H}} \cdot s \cdot K_{\text{дв}}} + \frac{1}{T_{\mathcal{H}} \cdot s \cdot K_{\text{дв}}} = \\ &= \frac{T_M + T_3}{T_{\mathcal{H}} \cdot K_{\text{дв}}} + \frac{1}{T_{\mathcal{H}} \cdot K_{\text{дв}}} \cdot \frac{1}{s} + \frac{T_M T_3}{T_{\mathcal{H}} K_{\text{дв}}} \cdot s \end{aligned} \quad (14)$$

Введем коэффициенты:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{T_M + T_3}{T_{\mathcal{H}} \cdot K_{\text{дв}}} \\ C_2 &= \frac{1}{T_{\mathcal{H}} \cdot K_{\text{дв}}} \\ C_3 &= \frac{T_M T_3}{T_{\mathcal{H}} K_{\text{дв}}} \end{aligned} \quad (15)$$

Получаем:

$$W_p(s) = C_1 + C_2 \cdot \frac{1}{s} + C_3 \cdot s \quad (16)$$

Не сложно заметить, что мы получили просто коэффициент  $C_1$ , коэффициент перед интегральным звеном  $C_2$  и коэффициент перед дифференцирующим звеном  $C_3$ . Т.е. мы получили классическую структуру ПИД-регулятора с параметрами

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ 39

$K_p=C1$ ,  $K_i=C2$  и  $K_d=C3$ :

$$K_n = \frac{T_m + T_\vartheta}{T_{\mathcal{H}} \cdot K_{\partial\vartheta}}; \quad K_u = \frac{1}{T_{\mathcal{H}} \cdot K_{\partial\vartheta}}; \quad K_d = \frac{T_m T_\vartheta}{T_{\mathcal{H}} K_{\partial\vartheta}} \quad (17)$$

Критерий устойчивости Найквиста для систем, устойчивых в разомкнутом состоянии, сводится к тому, что ЛАЧХ должна пересечь ось абсцисс раньше, чем фаза окончательно перейдёт за значение  $-\pi$ . Другими словами система будет устойчива если на частоте среза  $\omega_c$  величина фазы будет меньше  $\pi$ .

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W(s) = \frac{K}{(T_U s + 1)(T_G s + 1)(T_\vartheta T_M s^2 + T_M s + 1)} \quad (18)$$

$$\text{K}_{\text{нв}} := K_{\text{AR}} \cdot K_{\text{U}} \cdot K_{\text{G}} \cdot K_{\text{M}} \cdot K_{\text{BV}} = 15.363 \blacksquare \quad (19)$$

$$W(w) := \frac{K}{(T_U \cdot j \cdot w + 1) \cdot (T_G \cdot j \cdot w + 1) \cdot \left[ T_m \cdot T_e \cdot (j \cdot w)^2 + T_m \cdot j \cdot w + 1 \right]} \quad (20)$$

Выражение для ЛАЧХ:

$$\text{Lm}(w) := 20 \cdot \log(|W(w)|) \quad (21)$$

Выражение для ЛФЧХ:

$$\xi := \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T_m}{T_e}} = 0.617 \blacksquare \quad (22)$$

$$\text{T}_{\text{нв}} := \sqrt{T_e \cdot T_m} = 0.04 \blacksquare \quad (23)$$

$$\phi(\omega) := -\tan(T_U \cdot \omega) - \tan(T_G \cdot \omega) - \tan\left(\frac{2 \cdot \xi \cdot T_e \cdot \omega}{1 - T_m^2 \cdot \omega^2}\right) \quad (24)$$

$$\phi(\omega) := \begin{cases} -\tan(T_U \cdot \omega) - \tan(T_G \cdot \omega) - \tan\left(\frac{2 \cdot \xi \cdot T_e \cdot \omega}{1 - T_m^2 \cdot \omega^2}\right) & \text{if } \omega \leq 25 \\ \left(-\tan(T_U \cdot \omega) - \tan(T_G \cdot \omega) - \tan\left(\frac{2 \cdot \xi \cdot T_e \cdot \omega}{1 - T_m^2 \cdot \omega^2}\right)\right) - \pi & \text{if } \omega \geq 25 \end{cases}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

(25)

По графикам ЛАЧХ и ЛФЧХ для нашей системы определим частоту среза и критическую частоту.

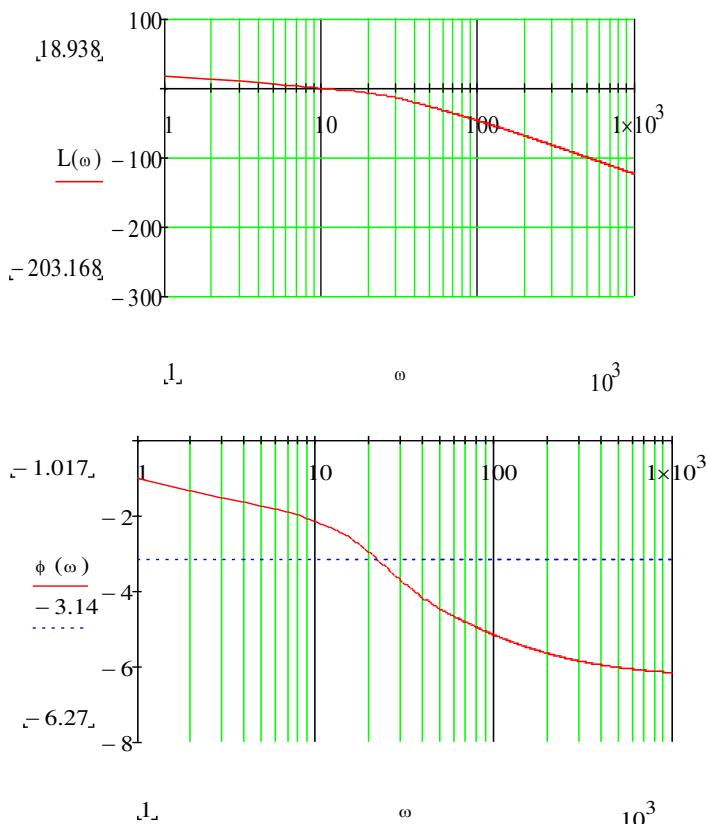


Рисунок 3.4.11 - ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой системы  $\omega_{кр}=24$      $\omega_{ср}=12$

В нашем случае система устойчива, т.к.  $\omega_{кр}>\omega_{ср}$ .  
Чтобы найти Кор, нужно в выражении

$$Lm(w_{cp}) := 20 \cdot \log \left[ \frac{\text{Кор}}{(T_U \cdot w_{cp} + 1) \cdot (T_G \cdot w_{cp} + 1) \cdot [T_M \cdot T_e \cdot (w_{cp})^2 + T_M \cdot w_{cp} + 1]} \right] \quad (26)$$

где  $w = \omega_{ср}$

$$Lm(w_{cp}) = 0$$

$$\text{Find}(\text{Кор}) \rightarrow 36.900499609$$

### 3.5 Представление двигателя в виде обобщенной машины

Электродвигатель может быть представлен в виде электромеханического многополюсника:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

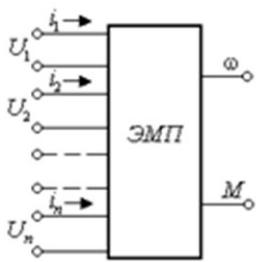


Рисунок 3.5.1- Электромеханический преобразователь

Электромеханический преобразователь имеет  $n$ -пар электрических выводов, соответствующих  $n$ -обмоткам двигателя, и одну пару механических выводов, на которых в результате электромеханического преобразования энергии при скорости  $\omega$  развивается электромагнитный момент двигателя  $M$ .

Как правило, двигатели являются многофазными электрическими машинами. С увеличением числа фаз возрастает число уравнений, описывающих электромагнитные и электромеханические процессы.

В теории электрических машин доказано, что любая многофазная машина с  $n$ -фазной обмоткой статора и  $m$ -фазной обмоткой ротора может быть представлена двухфазной моделью [12]. Поэтому математическое описание процессов во вращающейся электрической машине получают на основе рассмотрения её двухфазной модели, которая получила название обобщенной электрической машины.

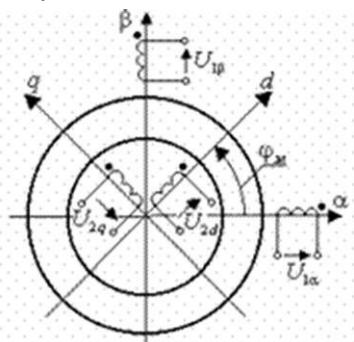


Рисунок 3.5.2 - Схема обобщенной электрической машины

Уравнения Кирхгофа, выраженные через потокосцепление  $\Psi$ , имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{1\alpha} &= R_1 i_{1\alpha} + \frac{d\Psi_{1\alpha}}{dt}; \\ U_{1\beta} &= R_1 i_{1\beta} + \frac{d\Psi_{1\beta}}{dt}; \\ U_{2d} &= R_2 i_{2d} + \frac{d\Psi_{2d}}{dt}; \\ U_{2q} &= R_2 i_{2q} + \frac{d\Psi_{2q}}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

где  $R_1$  и  $R_2$  - активное сопротивление фазы статора и приведённое сопротивление фазы ротора.

Произведём линейные преобразования уравнений обобщённой электрической машины для устранения зависимости индуктивностей и взаимных индуктивностей обмоток двигателя от угла поворота ротора, возможности оперировать не синусоидально изменяющимися переменными, а их амплитудами. При этом осуществляется замена действительных переменных новыми переменными при условии сохранения адекватности математического описания исследуемой машины. Этим условием является требование инвариантности мощности при преобразовании уравнений.

Рассмотрим преобразования, которые позволяют перейти от действительных переменных, определяемых системой координат, жёстко связанных со статором ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) и ротором ( $d$ ,  $q$ ), к расчётным переменным, соответствующим системе координат  $u$ ,  $v$ , вращающихся в пространстве с произвольной скоростью  $\omega_k$ .

В общем виде каждую реальную переменную - напряжение, ток, потокосцепление изобразим в виде вектора, направление которого жёстко связано с соответствующей данной обмотке системой координат, а модуль вектора изменяется в соответствии с изменениями изображаемой переменной.

Графические построения, соответствующие статору и ротору, изобразим отдельно, причём.

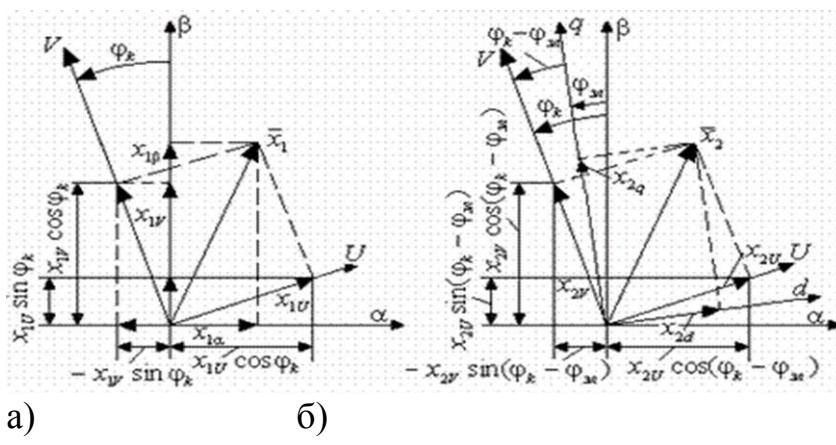


Рисунок 3.5.3 - К преобразованию переменных статорной обмотки в системах координат ( $\alpha, \beta$ ) и ( $u, v$ ) (а) и роторной обмотки в системах координат ( $d, q$ ) и ( $u, v$ ) (б).

Составляющие вектора определены как проекции векторов и на ось  $\alpha$ , составляющие вектора  $x_{1\beta}$  определены как проекции векторов и на ось  $\beta$ ; составляющие вектора - как проекции векторов  $x_{2u}$  и на ось  $d$ , составляющие вектора - как проекции векторов и на ось  $q$  [12, с.112].

Просуммировав проекции по осям, получим формулы обратного преобразования координат обобщённой машины, т.е. формулы перехода от

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

расчётных к реальным переменным:

$$\left. \begin{aligned} x_{1\alpha} &= x_{1u} \cos\varphi_k - x_{1q} \sin\varphi_k; \\ x_{1\beta} &= x_{1u} \sin\varphi_k + x_{1q} \cos\varphi_k; \\ x_{2d} &= x_{2u} \cos(\varphi_k - \varphi_m) - x_{2q} \sin(\varphi_k - \varphi_m); \\ x_{2q} &= x_{2u} \sin(\varphi_k - \varphi_m) + x_{2q} \cos(\varphi_k - \varphi_m), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta$  - оси, жёстко связанные со статором;

$d, q$  - оси, жёстко связанные с ротором;

$u, v$  - произвольная система ортогональных координат, вращающихся относительно статора со скоростью  $\omega_k$ , а  $\varphi_{эл} = p\pi\varphi$ ;  $\varphi_k = \omega_k t$ ,

где  $\varphi_{эл}$  и  $\varphi$  - соответственно электрический и геометрический углы поворота ротора относительно статора;  $p$ - число пар полюсов.

Аналогично выводятся формулы прямого преобразования:

$$\left. \begin{aligned} x_{1u} &= x_{1\alpha} \cos\varphi_k + x_{1\beta} \sin\varphi_k; \\ x_{1\alpha} &= -x_{1\beta} \sin\varphi_k + x_{1u} \cos\varphi_k; \\ x_{2u} &= x_{2d} \cos(\varphi_k - \varphi_m) + x_{2q} \sin(\varphi_k - \varphi_m); \\ x_{2q} &= -x_{2d} \sin(\varphi_k - \varphi_m) + x_{2u} \cos(\varphi_k - \varphi_m). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Подставив в первые два уравнения, получим:

$$\begin{aligned} u_{1u} \cos\varphi_k - u_{1q} \sin\varphi_k &= R_1(i_{1u} \cos\varphi_k - i_{1q} \sin\varphi_k) + \frac{d}{dt}(\Psi_{1u} \cos\varphi_k - \Psi_{1q} \sin\varphi_k); \\ u_{1u} \sin\varphi_k + u_{1q} \cos\varphi_k &= R_1(i_{1u} \sin\varphi_k + i_{1q} \cos\varphi_k) + \frac{d}{dt}(\Psi_{1u} \sin\varphi_k + \Psi_{1q} \cos\varphi_k). \end{aligned} \quad (4)$$

Умножив первое уравнение на  $\cos\varphi_k$ , а второе на  $\sin\varphi_k$ , сложив их, и учитывая, что

$$\begin{aligned} \cos^2 \varphi_k + \sin^2 \varphi_k &= 1; \\ \frac{d}{dt}(\Psi \cos\varphi_k) &= -\Psi \omega_k \sin\varphi_k + \cos\varphi_k \frac{d}{dt} \Psi; \\ \frac{d}{dt}(\Psi \sin\varphi_k) &= \Psi \omega_k \cos\varphi_k + \sin\varphi_k \frac{d}{dt} \Psi, \end{aligned} \quad (5)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

получим:

$$\left. \begin{aligned} u_{1u} &= i_{1u} R_1 + \frac{d\Psi_{1u}}{dt} - \omega_k \Psi_{1r}, \\ u_{1r} &= i_{1r} R_1 + \frac{d\Psi_{1r}}{dt} + \omega_k \Psi_{1u}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

В результате таких же преобразований для роторных цепей обобщенной машины получим:

$$\left. \begin{aligned} u_{2u} &= i_{2u} R_2 + \frac{d\Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_\infty) \Psi_{2r}, \\ u_{2r} &= i_{2r} R_2 + \frac{d\Psi_{2r}}{dt} + (\omega_k - \omega_\infty) \Psi_{2u}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $\omega_k = \frac{d\varphi_k}{dt}$ ;  $\omega_\infty = \frac{d\varphi_\infty}{dt}$ .

Уравнение электромагнитного момента для неявнополюсной машины выводится аналогично изложенному выше:

$$M = p_n L_{12} \left[ (i_{1q} i_{2s} - i_{1s} i_{2q}) \cos \varphi_\infty - (i_{1q} i_{2q} + i_{1s} i_{2s}) \sin \varphi_\infty \right]. \quad (8)$$

Воспользовавшись формулами обратного преобразования, получим:

$$M = p_n L_{12} (i_1 i_{2u} - i_{1u} i_{2r}), \quad (9)$$

где  $L_{12}$  - взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора.

Математическое описание механических характеристик в осях  $u$ ,  $v$  имеет вид:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$\left. \begin{aligned} u_{1u} &= i_{1u} R_1 + \frac{d\Psi_{1u}}{dt} - \omega_k \Psi_{1r}; \\ u_{1r} &= i_{1r} R_1 + \frac{d\Psi_{1r}}{dt} + \omega_k \Psi_{1u}; \\ u_{2u} &= i_{2u} R_2 + \frac{d\Psi_{2u}}{dt} - (\omega_k - \omega_m) \Psi_{2r}; \\ u_{2r} &= i_{2r} R_2 + \frac{d\Psi_{2r}}{dt} + (\omega_k - \omega_m) \Psi_{2u}; \\ M &= p_n L_{12} (i_{1r} i_{2u} - i_{1u} i_{2r}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Если ось принять за действительную, а ось - за мнимую, то изображающие векторы можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\Psi}_1 &= \Psi_{1u} + j\Psi_{1r}; \quad \bar{\Psi}_2 = \Psi_{2u} + j\Psi_{2r}; \\ \bar{i}_1 &= i_{1u} + ji_{1r}; \quad \bar{i}_2 = i_{2u} + ji_{2r}; \\ \bar{u}_1 &= u_{1u} + ju_{1r}; \quad \bar{u}_2 = u_{2u} + ju_{2r}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

В этом случае математическое описание механических характеристик имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{u}_1 &= \bar{i}_1 R_1 + \frac{d\bar{\Psi}_1}{dt} + j\omega_k \bar{\Psi}_1; \\ \bar{u}_2 &= \bar{i}_2 R_2 + \frac{d\bar{\Psi}_2}{dt} + j(\omega_k - \omega_m) \bar{\Psi}_2; \\ M &= p_n L_{12} \operatorname{Im}(\bar{i}_1 \cdot \bar{i}_2^*). \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Математическое описание составляется для двухфазной модели реальной машины. Реальные двигатели чаще всего имеют трёхфазную обмотку статора, поэтому необходимо преобразовать переменные двухфазной модели к переменным трёхфазной машины.

Один и тот же результирующий вектор МДС может быть создан как двухфазной, так и трёхфазной обмоткой. Для получения формул двухфазно-трёхфазных преобразований представим реальные переменные трёхфазной машины в виде векторов и, будем считать, что преобразованные переменные в осях  $\alpha$  и  $\beta$  не равны, а пропорциональны сумме проекций реальных переменных  $x_{1a}$ ,  $x_{1b}$ ,  $x_{1c}$  и  $\beta$  (рис. 3.5.4).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

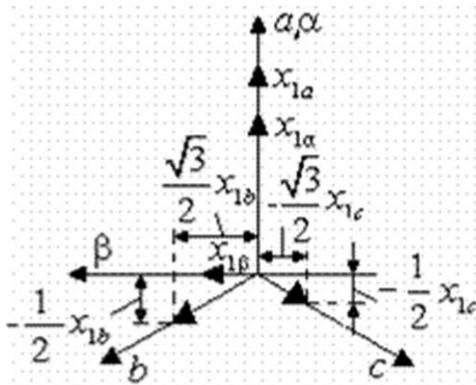


Рисунок 3.5.4 - Схема двухфазно - трехфазного преобразования

Из рисунка получаем:

$$\left. \begin{aligned} x_{1\alpha} &= x_c \left( x_{1\alpha} - \frac{1}{2} x_{1\delta} - \frac{1}{2} x_{1\epsilon} \right); \\ x_{1\beta} &= x_c \left( \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\epsilon} \right). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где  $x_c$  - согласующий коэффициент пропорциональности, величина которого определяется из условия инвариантности мощности.

Для трёхфазной машины, как правило, выполняется условие:

$$x_{1\alpha} + x_{1\delta} + x_{1\epsilon} = 0; \quad (14)$$

Отсюда

$$-\frac{1}{2} x_{1\delta} - \frac{1}{2} x_{1\epsilon} = \frac{1}{2} x_{1\alpha}. \quad (15)$$

Следовательно,

$$x_{1\alpha} = \frac{3}{2} k_T x_{1\alpha}; \quad x_{1\beta} = \frac{\sqrt{3}}{2} (x_{1\alpha} - x_{1\epsilon}) k_T. \quad (16)$$

Формулы обратного преобразования получим аналогично, воспользовавшись схемой трехфазно - двухфазного преобразования [11]:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

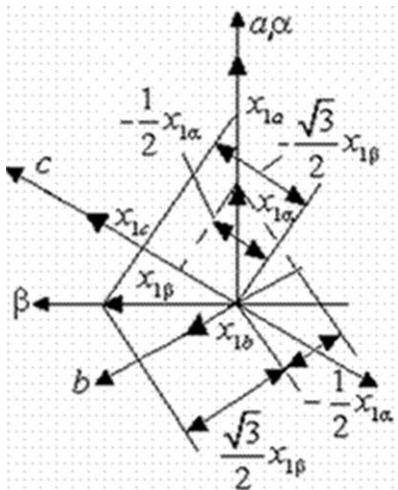


Рисунок 3.5.3 - Схема трехфазно - двухфазного преобразования

Из рисунка имеем:

$$\left. \begin{aligned} x_{1\alpha} &= x_e x_{1\alpha}; \\ x_{1\delta} &= x_e \left( \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} - \frac{1}{2} x_{1\alpha} \right); \\ x_{1\epsilon} &= x_e \left( -\frac{1}{2} x_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\beta} \right). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Для определения согласующего коэффициента найдём выражение для мгновенной мощности, потребляемой обмотками статора из сети:

$$\begin{aligned} U_{1\alpha} i_{1\alpha} + U_{1\delta} i_{1\delta} + U_{1\epsilon} i_{1\epsilon} &= (k_t U_{1\alpha})(k_t i_{1\alpha}) + \\ &+ \left[ k_t \left( -\frac{1}{2} U_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} U_{1\beta} \right) \right] \left[ k_t \left( -\frac{1}{2} i_{1\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1\beta} \right) \right] + \\ &+ \left[ k_t \left( -\frac{1}{2} U_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} U_{1\beta} \right) \right] \left[ k_t \left( -\frac{1}{2} i_{1\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{1\beta} \right) \right] = \\ &= k_t^2 \left( \frac{3}{2} U_{1\alpha} i_{1\alpha} + \frac{3}{2} U_{1\beta} i_{1\beta} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Для выполнения условия инвариантности мощности:

$$U_{1\alpha} i_{1\alpha} + U_{1\delta} i_{1\delta} + U_{1\epsilon} i_{1\epsilon} = U_{1\alpha} i_{1\alpha} + U_{1\beta} i_{1\beta} \quad (19)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

необходимо, чтобы:

$$\kappa_e = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (20)$$

Совместим изображающий вектор переменной, с осью  $a$  модели и с совпадающей с ней осью  $a$  реальной машины. При этом и связь между амплитудами переменных определяется выражением, полученным при прямом двухфазно - трёхфазном преобразовании:

$$x_{1\max(2\phi)} = k_e x_{1\max(3\phi)} = \frac{\sqrt{3}}{2} x_{1\max(3\phi)}, \quad (21)$$

где  $x_{1\max(2\phi)}$ ,  $x_{1\max(3\phi)}$  - амплитуды переменной двухфазной модели и трёхфазной реальной машины.

### 3.6 Расчет переходных процессов обобщенной машины при пуске

Последовательно включенное активное сопротивление:

$$r_{12} = \frac{P_{ct.osch}}{mI_\mu^2} = \frac{359,3}{3 \cdot 8,01^2} = 1,87 \text{ Ом.} \quad (1)$$

Последовательно включенное индуктивное сопротивление:

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{8,01} - 0,859 = 26,6 \text{ Ом.} \quad (2)$$

Комплексный коэффициент  $= 1 + x_1/x_{12} = 1 + 0,859/26,6 = 1,032$ .

Используем приближенную формулу, так как

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} = \operatorname{arctg} \frac{0,18 \cdot 26,6 - 1,87 \cdot 0,859}{1,87 \cdot (0,18 + 1,87) + 26,6 \cdot (0,859 + 26,6)} = 0,26' < 1^\circ. \quad (3)$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$I_{0a} = \frac{P_{ct,osn} + 3I_\mu^2 r_1}{3U_1} = \frac{359,3 + 3 \cdot 8,01^2 \cdot 0,18}{3 \cdot 220} = 0,6 \text{ А.} \quad (4)$$

Расчетные величины  $a' = c12 = 1,0322 = 1,07$ ;  $b' = 0$ ;  $= c1r1 = 1,032 \cdot 0,18 = 0,19$ ;  $= c1(x1 + c1x2') = 1,032 \cdot (0,859 + 1,032 \cdot 0,5) = 1,419$ .

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения  $st + P_{mex} = 573,01 + 504,55 = 1077,55$  Вт.

Таблица 1 - Рабочие характеристики двигателя

Расчетные формулы	Размерность	s						
		0,001						
$a'r'_2/s' \Omega_M$	234	924	0,006	0,011	0,016	0,021	0,026	0,031
$R = a + a'r'_2/s' \Omega_M$	235	124	713	08	86	75	24	4
$X = b + b'r'_2/s' \Omega_M$	1	421	813	29	06	95	44	6
$Z = \sqrt{R^2 + X^2} \Omega_M$	235	0824	421	421	421	421	421	42
$I''_2 = U_1/Z_A$	0	948	8913	289	147	035	594	79
$\cos \varphi'_2 = R/Z$	-1	0000	8416	5724	0831	3139	3645	92
$\sin \varphi'_2 = X/Z$	-0	0060	9980	9940	9880	9790	9670	955
$I_{la} = I_{0a} + I''_2 \cdot \cos \varphi'_2 A$	1	539	0570	1070	1550	2020	2540	296
$I_{lp} = I_{0p} + I''_2 \cdot \sin \varphi'_2 A$	8	028	4217	0724	3831	2738	6744	46
$I_l = \sqrt{I_{la}^2 + I_{lp}^2} A$	8	1612	529	7811	7514	3418	0021	61
$I'_2 = c_1 \cdot I''_2 A$	0	979	7019	6827	0734	4042	6549	43
$P_1 = 3U_1 \cdot I_{la} \text{ кВт}$	1012	45220	1317	1124	8532	3340	6347	40
$P_{\vartheta 1} = 3I_1^2 r_1 \text{ кВт}$	36	889	011268	716092	220636	625521	220342	8
$P_{\vartheta 2} = 3I_2^2 r'_2 \text{ кВт}$	0	3632	2214	1405	0654	11005	81350	9
$P_{DOB} = 0,005P_1 \text{ кВт}$	5	0631	29113	46239	51405	19640	12871	71
$\Sigma P = P_{CT} + P_{MEX} + P_{\vartheta 1} + P_{\vartheta 2} + P_{DOB} \text{ кВт}$	1119	811230	1056	3480	46103	18127	61146	71
$P_2 = P_1 - \Sigma P \text{ кВт}$	-107	44989	131461	411802	482240	002851	043446	46
$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$		-10,6%	99807	314289	718396	622670	225896	3
$\cos \varphi = I_{la} / I_l$		-0,1880	80,2%	87,0%	88,8%	89,1%	88,8%	88,3%

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП-140604.65 ПЗ			Лист
								50

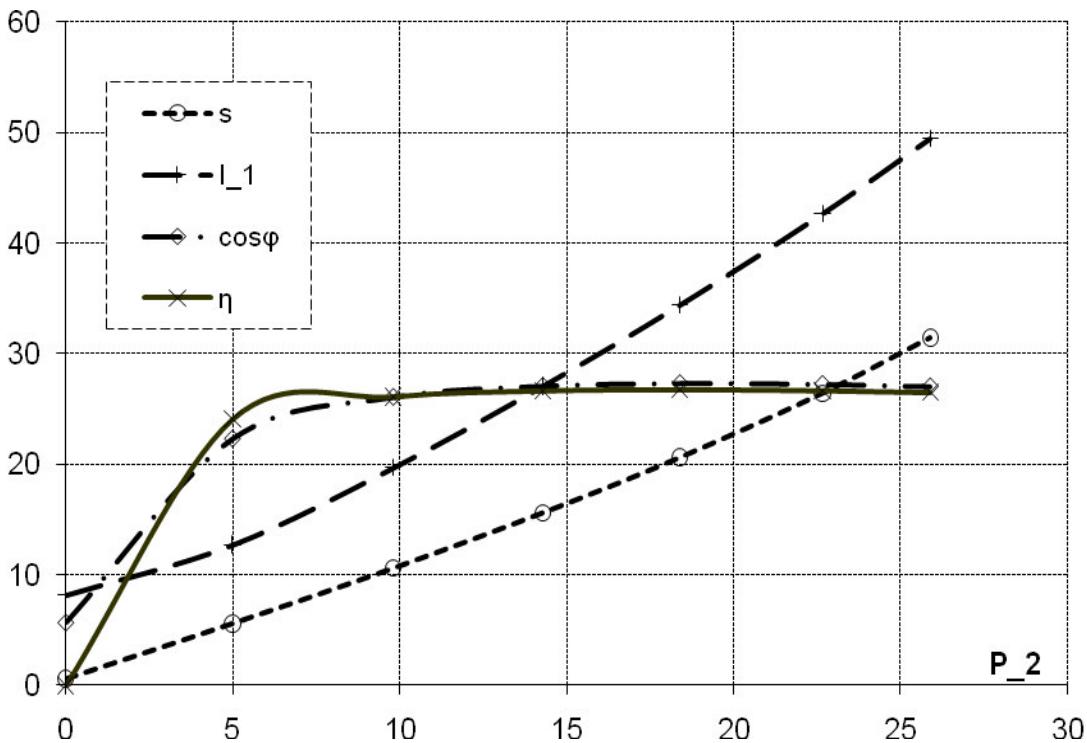


Рисунок 3.6.1 - Рабочие характеристики

Высота стержня в пазу  $=h_p - (h_{ш} + h'_{ш}) = 32,6 - (0,7 + 0,3) = 31,6$  мм.

В роторах с литой обмоткой  $c/b_p = 1$ .

Коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником с обмоткой

$$\lambda_{n_2} = \frac{h_0}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} = \frac{28,4}{3 \cdot 6,1} \cdot \left( 1 - \frac{3,14 \cdot 6,1^2}{8 \cdot 121,1} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 6,1} = 1,74$$

Пусковые параметры  $\Pi = k\pi x 12 = 2,59 \cdot 26,6 = 68,96$  Ом;  
 $c_1\Pi = 1 + x_1 / x 12 \Pi = 1 + 0,859 / 68,96 = 1,012$ .

Таблица 2 - Расчет токов в пусковом режиме с учетом влияния эффекта вытеснения тока

Расчетные формулы	Размерность	S					
		3					
1	2	1	0,56	0,24	0,18	0,125	0,1
$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s}$	-2	011	500	990	850	710	58
$\varphi(\xi)$	-	0,89	0,36	0,09	0,05	0,02	0,01
$h_R = h_C / (1 + \varphi)$ ММ	16	7523	3129	0730	1730	9031	28

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

Продолжение таблицы 2

1	2	3					
$h'_R = (h_R - b_1/2)_{MM}$	13	7020	2626	0227	1227	8528	23
$b_R = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} h'_R_{MM}$	3	832	751	801	611	491	43
$q_R = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_R}{2} h'_R_{MM}$	282	64104	25117	31119	20120	32120	88
$k_r = q_C/q_R$	-1	471	161	031	021	011	00
$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2(k_R - 1)}$	-1	281	101	021	011	010	00
$r'_2 = K_R r'_2 O_M$	0	1650	1420	1320	1300	1300	129
$k_d = \varphi'(\xi)$	-0	750	890	960	970	980	98
$\Delta \lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda'_{\Pi 2\xi} (1 - k_d)$	-0	440	200	060	050	040	03
$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta \lambda_{\Pi 2\xi}$	-2	722	963	093	113	123	13
$K_x = \Sigma \lambda_{2\xi} / \Sigma \lambda_2$	-0	930	970	990	990	991	00
$x'_{2\xi} = K_x x'_{2\xi} O_M$	0	4670	4850	4950	4960	4970	498
$R_\Pi = r_1 + c_{1\Pi} r'_{2\xi} / s_{O_M}$	0	3510	4400	7390	9161	2351	740
$X_\Pi = x_1 + c_{1\Pi} x'_{2\xi} O_M$	1	331	351	361	361	361	36
$I'_2 = U_1 / \sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2} A$	159	81154	99142	16134	08119	6699	54
$I_1 = I'_2 \frac{\sqrt{R_\Pi^2 + (X_\Pi + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} x_{12\Pi}} A$	160	89156	08143	19135	06120	54100	29

Коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,4}{15,18 + 11,92}} = 0,944$$

Высота скоса шлица паза статора при угле скоса  $\beta = 45^\circ$   
 $hk = (b_1 - b_{sh})/2 = (9,4 - 3,7)/2 = 2,85$  мм.

Таблица 3 - Расчет пусковых характеристик в пусковом режиме с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Расчетные формулы		Размерность	s					
1		2	3					
			1	0,56	0,24	0,18	0,125	0,1

Продолжение таблицы 3

1	2	3						
$k_{\text{нас}}$	-	1,34	1,32	1,22	1,2	1,12	1,06	
$F_{\Pi CP} 0,7 \frac{I_1 k_{\text{нас}} u_n}{a} \times \left( k'_{\beta} + k_{y1} k_{\text{об1}} \frac{Z_1}{Z_2} \right) A$	3892	03719	33153	72925	82437	11919	2	
$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\Pi CP} \cdot 10^{-6}}{1,6 \delta C_n T_L}$	6	446	165	224	844	043	18	
$\kappa_\delta = f(B_{\Phi\delta})$	-0	400	410	470	490	580	70	
$c_{\vartheta 1} = (t_{z1} - b_{\vartheta 1})(1 - \kappa_\delta)$ ММ	6	886	736	145	804	833	43	
$\lambda_{\Pi HAC} = \lambda_{\Pi} - \Delta \lambda_{\Pi HAC}$	-0	400	390	380	370	330	27	
$\lambda_{D HAC} = \kappa_\delta \lambda_{D1}$	-1	331	331	351	361	391	45	
$x_{1HAC} = x_1 \sum \lambda_{1HAC} / \sum \lambda_{OM}$	1	051	081	221	301	521	84	
$c_{\Pi HAC} = 1 + x_{1HAC} / x_{12\Pi}$	-0	6310	6350	6530	6630	6930	736	
$c_{\vartheta 2} = (t_{z2} - b_{\vartheta 2})(1 - \kappa_\delta)$ ММ	1	011	011	011	011	011	01	
$\Delta \lambda_{\Pi 2 HAC} = \frac{h_{\vartheta 2}}{b_{\vartheta 2}} \frac{c_{\vartheta 2}}{c_{\vartheta 2} + b_{\vartheta 2}}$	-6	246	115	575	264	383	11	
$\lambda_{\Pi 2 \xi HAC} = \lambda_{\Pi 2 \xi} - \Delta \lambda_{\Pi 2 HAC}$	-0	540	540	530	520	500	45	
$\lambda_{D 2 HAC} = \kappa_\delta \lambda_{D2}$	-2	182	422	572	592	622	68	
$x'_{2\xi HAC} = x'_2 \sum \lambda_{2HAC} / \sum \lambda_{2 OM}$	0	840	870	981	041	211	47	
$R_{\Pi HAC} = r_i + c_{\Pi HAC} r'_{\xi 2} / s_{OM}$	0	3310	3510	3710	3770	3930	416	
$X_{\Pi HAC} = x_{1HAC} + c_{\Pi HAC} x'_{\xi 2 HAC} OM$	0	350	440	740	911	231	74	
$I'_{2HAC} = U_1 / \sqrt{R_{\Pi HAC}^2 + X_{\Pi HAC}^2} A$	0	970	991	031	041	091	16	

$I_{1\text{нас}} = I'_{2\text{нас}}$ $\times \sqrt{R_{\Pi HAC}^2 + (X_{\Pi HAC} + x_{12\Pi})^2}$ $c_{\Pi} x_{12\Pi} A$	214	19203	10174	00158	55133	72105	39
$k'_{HAC} = I_{HAC} / I_{1HOM}$	-215	22204	13174	95159	43134	51106	06
$I_{1*} = I_{1HAC} / I_{HOM}$	-5	915	604	804	383	692	91
$M_* = \left( \frac{I'_{2HAC}}{I'_{2HOM}} \right)^2 K_R \frac{s_{HOM}}{s}$	-1	121	542	442	682	742	52

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ДП-140604.65 ПЗ

Лист

53

Максимальный момент двигателя

$$s_{KP} \approx \frac{r'_2}{\frac{x_1}{c_{1\Pi}} + x'_2} = \frac{0,13}{\frac{0,693}{1,01} + 0,393} = 0,12.$$

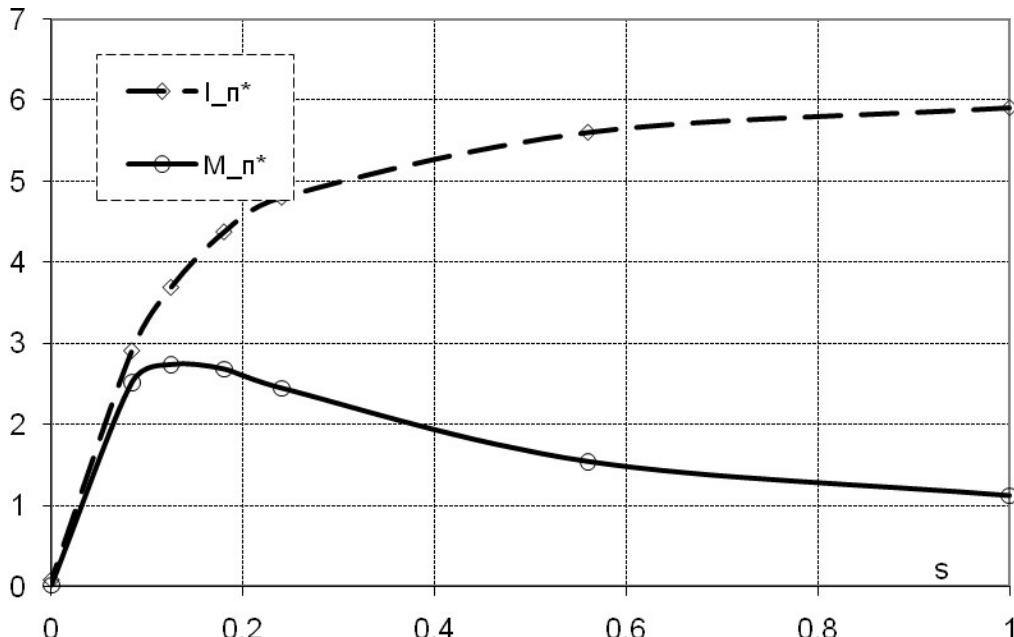


Рисунок 3.6.2 - Рабочие характеристики спроектированного двигателя

$$P'_{э,п1} = k_p P_{э1} \frac{2l_1}{l_{cp,1}} = 1,07 \cdot 699,81 \cdot 2 \cdot 130 / 964,6 = 201,82 \text{ Вт},$$

где  $k_p=1,07$  - коэффициент увеличения потерь.

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P'_{э,п1} + P_{ст.осн}}{\pi D l_1 \alpha_1} 10^6 = 0,22 \cdot \frac{201,82 + 359,3}{3,14 \cdot 145 \cdot 130 \cdot 155} \cdot 10^6 = 13,45^\circ\text{C},$$

где  $K=0,22$ - коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду;

$\alpha_1=155 \text{ Вт}/\text{м}^2$  - коэффициент теплоотдачи.

Расчетный периметр поперечного сечения паза статора  
 $PП1=2hПK+b1+b2=2,27,5+15,1+9,4=79,5 \text{ мм.}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

## Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора

$$\Delta v_{из.п1} = \frac{P'_{э.п1}}{Z_l \Pi_{п1} l_1} \left( \frac{b_{из.п1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{экв}} \right) 10^3 = \frac{201,82}{36 \cdot 79,5 \cdot 130} \cdot \left( \frac{0,4}{0,16} + \frac{9,4 + 15,1}{16 \cdot 1,34} \right) \cdot 10^3 = 2,37^\circ C,$$

где  $\lambda_{экв}=0,16$  Вт/(м. °C) - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции;

$\lambda'_{экв}=1,34$  Вт/(м. °C) - среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки [13].

## Электрические потери в обмотке статора в лобовых частях

$$P'_{э.л1} = k_p P_{э1} \frac{2l_{л1}}{l_{cp1}} = 1,07 \cdot 699,81 \cdot 2 \cdot 352,3 / 964,6 = 546,97 \text{ Вт.}$$

## Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{P'_{э.л1}}{2Z_l \Pi_{л1} l_{л1}} \left( \frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{п1}}{12 \lambda'_{экв}} \right) 10^3 = \frac{546,97}{2 \cdot 30 \cdot 79,5 \cdot 352,3} \cdot \left( \frac{0,05}{0,16} + \frac{27,5}{12 \cdot 1,34} \right) \cdot 10^3 = 0,66^\circ C,$$

где  $\Pi_{л1}=\Pi_{п1}=79,5$  мм - периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки;

$b_{из.л1}=0,05$  мм - односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя

$$\Delta v_{пов.л1} = \frac{KP'_{эл1}}{2\pi D l_{выл} \alpha_1} = \frac{0,22 \cdot 546,97}{2 \cdot 3,14 \cdot 145 \cdot 76,5 \cdot 155} = 11,14^\circ C$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя

$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= \frac{(\Delta v_{пов1} + \Delta v_{из.п1}) 2l_1 + (\Delta v_{из.л1} + \Delta v_{пов.л1}) 2l_1}{l_{cp1}} = \\ &= \frac{(13,45 + 2,37) \cdot 2 \cdot 130 + (0,66 + 11,14) \cdot 2 \cdot 352,3}{964,6} = 12,88^\circ C, \end{aligned}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса

$$\text{кор} = (\pi D_a + 8 \text{Пр})(11 + 2l_{\text{выл}}) = (3,14 \cdot 278 + 8 \cdot 319)(130 + 2 \cdot 76,5) = 9,69 \cdot 105 \text{ мм}^2,$$

где Пр=319 мм - условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя.

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя

$$\begin{aligned}\Sigma P'_B &= \Sigma P' - (1 - K)(P'_{\text{э.п1}} + P'_{\text{ст.осн}}) - 0,9 P_{\text{мех}} = \\ &= 2399,29 - (1 - 0,22)(201,82 + 359,3) - 0,9 \cdot 504,55 = 1507,52 \text{ Вт},\end{aligned}$$

где  $\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1)(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) = 2319,81 + (1,07 - 1)(699,81 + 435,69) = 2399,29 \text{ Вт};$   
 $\Sigma P = 2319,81 \text{ Вт}$  - сумма всех потерь в двигателе.

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды

$$\Delta v_B = \frac{\Sigma P'}{S_{\text{кор}} \alpha_B} 10^6 = \frac{1507,52}{9,69 \cdot 10^5 \cdot 20} \cdot 10^6 = 77,81^\circ\text{C},$$

где  $\alpha_B = 20 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  - коэффициент подогрева воздуха.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v'_B = 12,88 + 77,81 = 90,7^\circ\text{C}$$

Проверка условий охлаждения двигателя

Коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 3,3 \cdot \sqrt{\frac{3000}{100} \cdot 278 \cdot 10^{-3}} = 9,53.$$

Требуемый для охлаждения расход воздуха

$$\theta_B = \frac{k_m \Sigma P'_B}{1100 \Delta v_B} = \frac{9,53 \cdot 2399,29}{1100 \cdot 77,81} = 0,27 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП-140604.65 ПЗ	Лист
						56

$$\theta_b' = 0,6D_a^3 10^{-9} \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 278^3 \cdot 10^{-9} \cdot 3000/100 = 0,39 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Нагрев двигателя находится в допустимых пределах. Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

### 3.7 Выбор силового преобразователя и построение механических характеристик в разомкнутой системе, оценка диапазона регулирования скорости

В настоящем разделе рассматриваются настройки контуров регулирования и расчет динамических характеристик в системе регулирования скорости при векторном управлении асинхронным двигателем. Чтобы оперировать с цифрами, фигурирующими в каталожных данных машины, структурная схема представлена в эффективных значениях переменных [13].

Схема построена с использованием математического описания ненасыщенного асинхронного двигателя во врачающейся системе координат. Преобразователь характеризуется коэффициентом передачи по напряжению и чистым запаздыванием на время  $\tau$ , равное периоду ШИМ инвертора. Считается, что токи  $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}$ , а следовательно, и  $i_{1\alpha}$  и  $i_{1\beta}$ , измеряются безынерционными датчиками тока с некоторым коэффициентом  $k_{d.t}$ . Считается также, что величины  $\hat{M}_d$  и  $\hat{\psi}_d$ , определяемые в модели потока, точно воспроизводят электромагнитный момент двигателя  $M_d$  и потокосцепление ротора  $\psi_2$  в масштабах, характеризующихся коэффициентами обратных связей по моменту и потокосцеплению ротора КДМ и КДТ соответственно. Датчик скорости имеет коэффициент передачи КДС. Сигналы на выходах датчиков обозначены символом  $i$  с соответствующим индексом. Такие же обозначения применены к выходным сигналам регуляторов взамен приведенных обозначений  $\psi_2^*, i_{1\alpha}^*, i_{1\beta}^*, M_d^*$ . Поскольку настройка контуров регулирования производится в линеаризованной системе при таком уровне воздействий, что выходные величины регуляторов не достигают значения ограничения, блоки ограничения на схеме не показаны. Опыт показывает, что стандартные настройки регуляторов, рассчитанные по линеаризованному описанию системы, обеспечивают удовлетворительную динамику системы, построенной по принципам подчиненного регулирования, и при ограничении выходных переменных регуляторов.

Настройка токовых контуров. Настройка производится без учета влияния перекрестных связей. Передаточная функция разомкнутого контура тока статора по оси  $\beta$  записывается в виде

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$W_{I\beta}(p) = W_{p,T\beta}(p) \frac{k_\pi e^{-\tau p} k_{d.t.}}{R_1(\sigma T_1 p + 1)}. \quad (1)$$

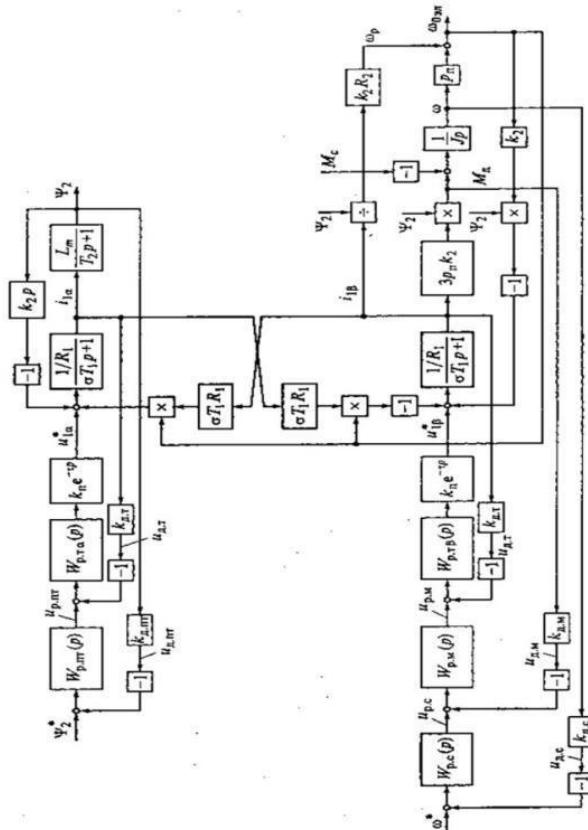


Рисунок 3.7.1 - Структурная схема системы регулирования скорости управления асинхронным двигателем в эффективных (действующих) значениях переменных

При частоте ШИМ, равной fШИМ, значение чистого запаздывания составляет  $\tau = 1/f_{ШИМ}$ . В зоне частот, где  $\omega \leq \tau - 1$ , фазовая частотная характеристика звена чистого запаздывания близка к фазовой частотной характеристике апериодического звена с постоянной времени  $\tau$ . На этом основании при расчете параметров регулятора тока можно принять малую постоянную времени равной времени чистого запаздывания  $T_{\mu I} = \tau$  и для настройки контура на ОМ применить ПИ регулятор с параметрами:

$$\beta_p = \beta_{p,T} = \frac{\sigma T_1 R_1}{2T_{\mu I} k_\pi k_{d.t.}}; \tau_{p,T} = \sigma T_1, \quad (2)$$

где  $\beta_{p,T}$  - динамический коэффициент регулятора тока.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

При рассмотрении контура тока  $i1\alpha$  должна быть учтена обратная связь по производной от потокосцепления ротора. Перенеся вход обратной связи на выход звена  $1/[R_1(\sigma T_1 p + 1)]$ , получим передаточную функцию объекта контура в виде

$$W_{0I}(p) = \frac{T_2 p + 1}{R_1 [\sigma T_1 T_2 p^2 + (\sigma T_1 + T_2 + k_2 L_m / R_1) p + 1]}. \quad (3)$$

Поскольку обычно  $T_2 \gg T_1$  можно и в контуре тока  $i1\alpha$  применить ПИ регулятор с параметрами такими же, как в контуре тока  $i1\beta$ .

Настройка контура регулирования потокосцепления ротора. Для расчета параметров регулятора в контуре, содержащем подчиненный замкнутый контур (в рассматриваемом случае - контур тока статора по оси  $\alpha$ , рекомендуется рассматривать его как апериодическое звено с эквивалентной малой постоянной времени, равной удвоенной малой постоянной времени, подчиненного контура. Тогда передаточная функция объекта, по которой рассчитываются параметры регулятора потока, должна быть записана в виде

$$W_{0\psi}(p) = \frac{L_m k_{d.PT}}{k_{d.T}} \cdot \frac{1}{(T_{\mu\psi} p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad (4)$$

где  $T_{\mu\psi}$  - малая постоянная времени при отсутствии запаздывания в определении потокосцепления ротора,  $T_{\mu\psi} = T_{\text{ЭКВ}} = 2T_{\mu I}$  ( $T_{\text{ЭКВ}}$  - эквивалентная малая постоянная времени токового контура;  $T_{\mu I}$  - малая постоянная времени контура тока).

Параметры ПИ регулятора потока должны быть следующим:

$$\beta_{p.PT} = \frac{T_2 k_{d.T}}{2T_{\mu\psi} L_m k_{d.PT}}; \tau_{p.PT} = T_2, \quad (5)$$

где  $\beta$  - динамический коэффициент регулятора потокосцепления.

Настройка контура регулирования электромагнитного момента двигателя. Контур не содержит звена с большой постоянной времени. В предположении, что в двигателе установлено номинальное потокосцепление ротора  $\psi_{2n}$ , передаточная функция объекта при расчете в амплитудных значениях имеет вид

$$W_{0M}(p) = \frac{3}{2} p_n k_2 \psi_{2n} k_{d.M} \frac{1}{k_{d.T} (T_{\mu M} p + 1)}. \quad (6)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

Если расчет ведется в эффективных значениях, то коэффициент в этом выражении для момента надо принять равным трем:

$$W_{0M}(p) = 3p_N k_2 \psi_{2n} k_{D.M} \frac{1}{k_{D.T}(T_{\mu M} p + 1)}, \quad (7)$$

где  $T_{\mu M}$  - малая постоянная времени контура регулирования момента.

В этих выражениях  $\frac{1}{[k_{D.T}(T_{\mu M} p + 1)]}$  - передаточная функция апериодического звена, которым при расчете параметров регулятора момента заменена передаточная функция замкнутого контура тока  $i1\beta$  при  $T_{\mu M} = T_{\text{ЭКВ}} = 2T_{\mu I}$  [13, с.347].

Для настройки контура на ОМ регулятор должен быть интегрирующим с передаточной функцией

$$W_{p.M}(p) = \beta_{p.M} / p, \quad (8)$$

где  $\beta_{p.M}$  - динамический коэффициент регулятора момента.

Если расчет выполняется в амплитудных значениях, то

$$\beta_{p.M} = 1 / [2T_{\mu M} (3/2)p_N k_2 \psi_{2n} k_{D.M}]. \quad (9)$$

При расчете в эффективных значениях

$$\beta_{p.M} = 1 / [2T_{\mu M} 3p_N k_2 \psi_{2n,\text{эф}} k_{D.M}] \quad (10)$$

Настройка контура скорости. Настройка произведена на ОМ. Поскольку объект представляет собой интегрирующее звено, для настройки на ОМ надо применить пропорциональный регулятор скорости с коэффициентом

$$k_{p.c} = \frac{k_{D.M} J}{2T_{\mu \omega} k_{D.C}}. \quad (11)$$

При настройке на СО регулятор скорости должен быть пропорционально-

$$k_{p.c} = \frac{k_{D.M} J}{2T_{\mu \omega} k_{D.C}}. \quad (12)$$

интегральным. Его коэффициент рассчитывается по формуле

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

т.е.  $\beta_{р.c} = k_{р.c}$ , а постоянная времени должна быть равна  $т_{р.c} = 4T\mu\omega$ , ( $T\mu\omega$ ) =  $T\text{МЭКВ} = 2T\mu\omega$ ).

Расчет выполнен в эффективных значениях переменных. Приняты следующие упрощения: коэффициент передачи преобразователя принят равным единице ( $k_{р.1}=1$ ), равными единице без указания размерности приняты и коэффициенты обратных связей ( $k_{Д.T}=1$ ;  $k_{Д.M}=1$ ;  $k_{Д.PT}=1$ ;  $k_{Д.c}=1$ ). Такое упрощение не повлияет на характер переходных процессов и скажется только на рассчитанных значениях коэффициентов регуляторов и установившихся значениях величин, так как передаточные функции разомкнутых контуров останутся при этом соответствующими стандартным настройкам. Результаты расчета параметров регуляторов при принятых допущениях сведены в таблицу.

Расчеты переходных процессов выполнены по структурной схеме в среде MATLAB Simulink.

Таблица 1 - Расчет параметров регуляторов:

№ п/п	Параметр	Расчет
1	Коэффициент усиления и постоянная времени ПИ регулятора тока при f <sub>ШИМ</sub> =4000Гц( $T\mu I=2,5 \cdot 10^{-4}$ с) $\sigma T_1=0,133 \cdot 0,0509=0,00677$ с $T_p.T=0,00677$ с ( $\beta_{р.T}/t_{р.T}=18995$ с <sup>-1</sup> )	$\beta_{p.T} = \frac{0,0067 \cdot 9,5}{2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 1} = 128,6;$
2	Коэффициент усиления и постоянная времени ПИ регулятора потока при $T\mu\Psi=2T\mu I=5 \cdot 10^{-4}$ с $t_{р.PT}=0,0844$ с ( $\beta_{р.PT}/t_{р.PT}=2237$ с <sup>-1</sup> )	$\beta_{p.PT} = \frac{0,0844 \cdot 1}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,447 \cdot 1} = 188,8$
3	Коэффициент усиления ПИ-регулятора момента при $\Psi_{2H.\text{ЭФ}}=0,599$ Вб и $T\mu M=5 \cdot 10^{-4}$ с ( $t_{р.m}=0,0034$ с)	$\beta_{p.m} = \frac{1}{2 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 2 \cdot 0,939 \cdot 0,599 \cdot 1} = 296,8 \text{ с}^{-1}$
4	Коэффициент регулятора скорости при $T\mu\omega=2T\mu M=1 \cdot 10^{-3}$ с	$k_{p.c} = 1 \cdot 0,026 / (2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 13$

Значения переходных процессов в системе при внешних воздействиях настолько малы, что не приводят к ограничению выходных сигналов регуляторов момента и тока по поперечной оси ( $i_1\beta$ ). В момент времени  $t=0,01$  с через задатчик интенсивности, обеспечивающий плавное нарастание сигнала, на вход контура регулирования потока подается сигнал задания номинального потокосцепления ротора.

### 3.8 Выбор силового преобразователя

Очень важно сделать правильный выбор преобразователя. От него будет зависеть эффективность и ресурс работы преобразователя частоты и всего электропривода в целом. Так если мощность преобразователя будет слишком завышена, он не сможет в должной мере обеспечить защиту двигателя. С другой стороны, если мощность преобразователя мала, он не сможет обеспечить высокодинамичный режим работы и из-за перегрузок может выйти из строя [14].

При работе одного ПЧ с одним двигателем выбор ПЧ может производиться по следующим параметрам:

1) Паспортная мощность ПЧ [кВт] должна быть больше или равна паспортной мощности двигателя [кВт]. Причем, изготовители ПЧ всегда указывают, что этот критерий распространяется на двигатели с двумя парами полюсов ( $2p=4$  и синхронная скорость вращения соответственно равна 1500 об/мин), работающих на нагрузку с постоянным моментом (транспортер, конвейер), для преобразователей с перегрузочной способностью 150% и, - работающих на центробежные насосы и вентиляторы, для ПЧ с перегрузочной способностью 120%.

2) Номинальный длительный ток ПЧ должен быть больше (или равен) фактического длительного тока, потребляемого двигателем.

Для управления насосом выбираем преобразователь частоты компании BARTEC с промежуточным контуром напряжения VSD-2x-630-0660/02-IP54.



Рисунок-3.8.1 - BARTEC с промежуточным контуром напряжения VSD-2x-630-0660/02-IP54

Преимущества данного ПЧ:

- Улучшенный алгоритм энергосбережения.
- Расширенный ПИД-регулятор с функциями спящего режима, детектора, обрыва аналоговых сигналов, нижним и верхним ограничителями выхода ПИД-регулятора, аварии при выходе абсолютного значения или отклонения сигнала ОС из заданного

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	62
					ДП-140604.65 ПЗ	

диапазона и т.д.

- Нечувствительность к кратковременным провалам питания.
- Автоподхват двигателя при любом направлении свободного вращения.
- Функции переключения сеть/инвертер с возможностью автоматического переключения двигателя на сеть при срабатывании защиты инвертера.
- Обнаружение низкого момента.
- Функция прогрева/сушки двигателя.
- Монитор аналогового входа.
- Счетчик потребленной электроэнергии.
- Модификации IP54 со встроенным фильтром ЭМС и дросселем звена постоянного тока.
- Оценка срока службы конденсатора звена постоянного тока (расчетный срок службы увеличен до 10 лет) и суммарного времени работы инвертора.
- Меню быстрой настройки.

### 3.9 Выбор трансформатора и сглаживающего реактора

Для защиты людей, электропроводок и электрических устройств применяются специальные защитные устройства, включаемые непосредственно на входе цепи потребителя. Все эти устройства защищают электрические цепи от чрезмерного тока, вызванного замыканиями в цепях.

Автоматические выключатели размыкают питающие цепи в случае увеличения выше номинального значения, протекающего через них тока, осуществляя таким образом отключение электрооборудования от сети. Кроме того, они имеют возможность замыкания цепи (функция включения), в том числе повторного. К автоматическому выключателю предъявляются требования малого времени размыкания цепи (отключения). Автоматические выключатели соответствуют современным нормам электробезопасности.

Современный автоматический выключатель состоит из подпружиненного механического выключателя, замыкающего контактную группу автомата во взвешенном состоянии, теплового (на базе биметаллической пластины) и электромагнитного (на базе соленоида) размыкателей, дугогасительного устройства и универсальных контактов.

Тепловой размыкатель предназначен для защиты цепей по току перегрузки, а магнитный - для защиты от короткого замыкания. Тепловой размыкатель срабатывает после нагрева биметаллической пластины. Время нагрева пластины зависит от величины тока, превышающей номинальное значение. Этот тип размыкателя - инерционный. Размыкатель не реагирует на небольшие кратковременные увеличения значения тока. Магнитный размыкатель является

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	63
					ДП-140604.65 ПЗ	

быстродействующим. Его срабатывание происходит при превышении значения номинального тока в несколько раз.

Во введенном состоянии контакты выключателя замкнуты, ток в цепи протекает через обмотку магнитного размыкателя и часть биметаллической пластины. Срабатывание одного из размыкателей приводит к освобождению взводной пружины и сбрасыванию выключателя, который, в свою очередь, размыкает контактную группу. Чтобы защитить контакты от подгорания в момент размыкания, параллельно им установлены дугогасительные камеры, представляющие собой набор медных пластин, разделенных воздушной прослойкой.

Универсальные контакты позволяют фиксировать как проводники, так и клеммы или шины. Конструктивно все выключатели крепятся на стандартную DIN-рейку шириной 35 мм. Крепление корпуса автоматического выключателя осуществляется с помощью одной защелки. Для удобства защелка имеет два фиксированных положения. В верхнем положении защёлки корпус выключателя фиксируется на DIN-рейке, в нижнем - он освобожден. Головка винта крепления позволяет использовать и крестовую, и плоскую отвертки.

По способу размыкания питающей сети автоматические выключатели можно разделить на следующие типы:

- однополюсные;
- однополюсные с нейтралью;
- двухполюсные;
- трёхполюсные;
- трёхполюсные с нейтралью;
- четырёхполюсные.

Произведем выбор автоматических выключателей исходя из условия, что  $n.p. \geq 1,25 * I_d > 570$

Выбираем 3-3х полюсных автоматических выключателя серии А3730Ф:  $I_n=630\text{A}$ ,  $I_{отк}=50\text{kA}$

Для защиты реле контроля фаз выбираем автоматический выключатель ВА4729 ИЭК:  $I_n=5\text{A}$ ,  $I_{отк}=4.5\text{kA}$

Для защиты вытяжного вентилятора выбираем 1 полюсный автоматический выключатель ВА4729 ИЭК:  $I_n=3\text{A}$ ,  $I_{отк}=4.5\text{kA}$

На входе в шкафу управления устанавливаем рубильник для отключения силовых цепей с созданием видимого разрыва. Выбираем рубильник Р2525:  $n=1500\text{A}$

Питающая сеть подвержена воздействиям нелинейных приемников, которые вызывают деформации протекания синусоидального напряжения, следовательно, увеличивают потери, а также создают помехи для работы других машин и приборов, питающихся от сети. Применяемые дроссели позволяют решить множество проблем:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

- ограничивают возникновение гармоник в сети,
- гасят коммутационные перенапряжения,
- в случае короткого замыкания уменьшают ток установившегося короткого замыкания и производную тока.

Управляемые выпрямители и инверторы генерируют в сети ряд гармоник, которые сильно искажают ход синусоиды напряжения, вызывая увеличение потерь мощности всех машин и приборов, питающихся от сети. Сетевые дроссели ED1N или ED3N ограничивают распространение всех гармоник в сети и гасят коммутационные перенапряжения, возникающие во время переключения тиристоров. Применение сетевых дросселей вызывает ослабление взаимных помех, создаваемых преобразователями во время коммутации.

Выбираем трёхфазный сетевой дроссель ED3N.

### 3.10 Механические характеристики в разомкнутой системе

Активное сопротивление обмотки статора

$$r_1 = \rho_{75} \cdot \frac{L_{cp}}{q_{\phi} \cdot a} \quad (1)$$

По таблице 5.1. [Л-1] выбираем удельное электрическое сопротивление материала проводников обмоток. Для класса нагревостойкости изоляции F

расчетная температура  $\nu_{расч} = 75^{\circ}C$ ; для медных проводников  $\rho_{75} = \frac{10^{-6}}{47} O\cdot m$

где  $\rho_{75}$  - удельное сопротивление материала обмотки при расчетной температуре;

$\rho_{75} = \frac{10^{-6}}{47}$  - для медных проводников;

$q_{\phi}$  - сечение эффективного проводника;

$L_{cp}$  - общая длина проводников фазы обмотки

$L_{cp} = \ell_{cp} \cdot w_1$ ;

$\ell_{cp}$  - средняя длина витка обмотки

$\ell_{cp} = 2 \cdot (\ell_n + \ell_{\lambda})$ ;

$\ell_n$  - длина пазовой части катушки

$\ell_n = \ell_1 = 0,104 m$ ;

$\ell_{\lambda}$  - длина лобовой части катушки

$\ell_{\lambda} = K_{\lambda} \cdot b_{km} + 2 \cdot B$ ;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$B$  - длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части; для всыпной обмотки  $B = 0,01\text{м}$ ;

$K_{\alpha} = 1,2$  - при отсутствии изоляции на лобовых частях, при  $2p = 2$  по таблице 9.23. [Л-1];

$b_{km}$  - средняя ширина катушки

$$b_{km} = \frac{\pi \cdot (D + h_n)}{2 \cdot p} \cdot \beta = \frac{3,14 \cdot (0,0924 + 0,0163)}{2} = 0,17\text{ м}$$

$\beta$  - относительное укорочение шага обмотки статора; для двухслойных обмоток  $\beta = 1$ .

$$\ell_{\alpha} = 1,2 \cdot 0,17 + 2 \cdot 0,01 = 0,225\text{ м}$$

$$\ell_{cp} = 2 \cdot (0,1041 + 0,2249) = 0,66\text{ м}$$

$$L_{cp} = 0,66 \cdot 152 = 100\text{ м}$$

$$r_1 = \frac{10^{-6} \cdot 100}{47 \cdot 1,539 \cdot 10^{-6}} = 1,383\text{ Ом}$$

Длина вылета лобовой части катушки:

$$\ell_{выл} = k_{выл} \cdot b_{km} + B$$

$$\ell_{выл} = 0,26 \cdot 0,1708 + 0,01 = 0,054\text{ м}$$

$k_{выл}$  = 0,26 по таблице 9.23 [Л-1]

Относительное значение  $r_{1^*}$

$$r_{1^*} = r_1 \cdot \frac{I_{1nom}}{U_{1nom}} = 1,383 \cdot \frac{7,83}{220} = 0,0492$$

Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{kl}}{\Delta^2} \quad (2)$$

$$r_c = \rho_{75} \cdot \frac{\ell_2}{q_c} \quad (3)$$

$r_c$  - сопротивление стержня

$$\rho_{75} = \frac{10^{-6}}{22} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

для литой алюминиевой обмотки ротора по таблице 5.1 [Л-1]

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

$$r_c = \frac{10^{-6} \cdot 0,104}{22 \cdot 1,087 \cdot 10^{-4}} = 0,44 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

$k_r$  - коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от воздействия эффекта вытеснения тока  $k_r = 1$

$$r_{кл} = \rho_{75} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл, cp}}{Z_2 \cdot q_{кл}} \quad (4)$$

$D_{кл, cp}$  - средний диаметр замыкающих колец.

$q_{кл}$  - площадь поперечного сечения замыкающих колец.

$\rho_{75}$  - удельное сопротивление материала стержня и замыкающих колец.

$$D_{кл, cp} = D_2 - b_{кл} = 0,0915 - 0,0242 = 0,0673 \text{ м} \quad (5)$$

$$r_{кл} = \frac{10^{-6} \cdot 3,14 \cdot 0,0673}{22 \cdot 19 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4}} = 1,302 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

$$r_2 = 4,35 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 1,302 \cdot 10^{-6}}{0,3232} = 0,68 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Приводим  $r_2$  к числу витков обмотки статора:

$$r'_2 = r_2 \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} \quad (6)$$

$$r'_2 = 6,8 \cdot 10^{-5} \frac{4 \cdot 3 \cdot (152 \cdot 0,92)^2}{19} = 0,83 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$r''_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,83 \cdot \frac{7,83}{220} = 0,03 \quad (7)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{\ell'_\delta}{p \cdot q} (\lambda_n + \lambda_\alpha + \lambda_\phi) \quad (8)$$

$\lambda_n$  - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния.

$$\lambda_n = \frac{h_{n,\kappa}}{3 \cdot b_1} + \left( \frac{h_1}{b_1} + \frac{3 \cdot h_\kappa}{b_1 + 2 \cdot b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \quad (9)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

$h_1 = 0$  (проводники закреплены пазовой крышкой)

$$\lambda_n = \frac{0,0133}{3 \cdot 0,0085} + \left( \frac{3 \cdot 0,003}{0,0085 + 2 \cdot 0,0035} + \frac{0,0005}{0,0035} \right) = 1,25$$

$\lambda_n$  - коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_n = 0,34 \cdot \frac{q}{\ell_\delta} \cdot (\ell_n - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (10)$$

$$\lambda_n = 0,34 \cdot \frac{3}{0,104} \cdot (0,2249 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,1451) = 1,7256$$

$\beta = 1$  - относительное укорочение шага обмотки.

$$\lambda_\delta = \frac{t_{Z_1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi \quad (11)$$

$$\xi = 2 \cdot k'_{ck} \cdot k_\beta - k_{o\delta_1}^2 \cdot \left( \frac{t_{Z_2}}{t_{Z_1}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ck}^2) \quad (12)$$

Для  $\beta_{ck} = 0$  и  $\frac{t_{Z_2}}{t_{Z_1}} = \sqrt[15]{12} = 1,25$  по рисунку 9.51.д,  $k'_{ck} = 1,25$

$$\xi = 2 \cdot 1,25 \cdot 1 - 0,92^2 \cdot 1,25^2 \cdot 1 = 1,176$$

$$\lambda_\delta = \frac{0,0121}{12 \cdot 0,00045 \cdot 1,239} \cdot 1,176 = 2,1254$$

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{152}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,104}{1 \cdot 4} \cdot (1,7256 + 1,246 + 2,1254) = 2,42 \Omega$$

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1nom}}{U_{1nom}} = 2,42 \cdot \frac{7,83}{220} = 0,1$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора.

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot \ell_\delta \cdot (\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{ck}) \cdot 10^{-6} \quad (13)$$

$\lambda_{n2}$  - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора.

$$\lambda_{n2} = \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_1} \right] + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \quad (14)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

$$h_0 = h_1 + 0,4 \cdot b_2 = 0,0165 + 0,4 \cdot 0,0023 = 0,0174 \text{ м}$$

$$\lambda_{n2} = \left[ \frac{0,0174}{3 \cdot 0,0078} \cdot \left( 1 - \frac{3,14 \cdot 0,0078^2}{8 \cdot 0,0001087} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,001}{2 \cdot 0,0078} \right] \cdot 1 + \frac{0,0005}{0,001} = 1,48$$

$\lambda_{n2}$  - коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки ротора.

$$\lambda_{o2} = \frac{2,3 \cdot D_{kl, cp}}{Z_2 \cdot \ell_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{kl, cp}}{2(a_{kl} + b_{kl})} \quad (15)$$

$$\lambda_{o2} = \frac{2,3 \cdot 0,0673}{19 \cdot 0,104 \cdot 0,3292^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,0673}{0,016 + 0,0242} = 0,54$$

$\lambda_{o2}$  - коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора.

$$\xi = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi \quad (16)$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Z} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \left( \frac{3,14 \cdot 1}{19} \right)^2 - \frac{0,02}{1 - \left( \frac{1}{19} \right)^2} = 0,99$$

$$\text{т.к. при открытых пазах } \frac{b_{u2}}{\delta} = 2,2 \quad \frac{b_{u2}}{t_2} = 0,1 \quad \Delta_z \approx 0,02$$

$$\lambda_{o2} = \frac{0,0151 \cdot 0,99}{12 \cdot 0,00045 \cdot 1,239} = 2,2$$

$$x_2 = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,104 \cdot (1,4777 + 0,5413 + 2,2283 + 0) = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Приводим  $x_2$  к числу витков статора

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m (w_1 \cdot k_{o\delta_1})^2}{Z_2} \quad (17)$$

$$x'_2 = 1,7 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (152 \cdot 0,92)^2}{19} = 2,156 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$x''_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 2,156 \cdot \frac{7,83}{220} = 0,1$$

Рабочие характеристики асинхронных двигателей называют зависимости

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$P_1, I_1, \cos\varphi_1, \eta, S = f(P_2)$ . Рабочие характеристики рассчитаны аналитическим методом. Аналитический метод позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях.

Параметры:

Расчетное сопротивление

$$r_{12} = \frac{P_{cm.osn.}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{103,455}{3 \cdot 2,58^2} = 5,3 O\Omega$$

Сопротивление взаимной индукции

$$x_{12} = \frac{U_{1nom}}{I_\mu} = \frac{220}{2,58} = 84 O\Omega$$

Коэффициент  $c_1$

$$c_{1a} = \frac{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{5,3 \cdot (1,38 + 5,3) + 84 \cdot (2,4 + 84)}{5,3^2 + 84^2} = 1,0296$$

Используем приближенную формулу, так как  $|v| < 1^\circ$

$$c_{1p} = \frac{x_1 \cdot r_{12} + r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{2,4 \cdot 5,3 + 1,38 \cdot 84}{5,3^2 + 84^2} = -0,0146$$

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2} = \sqrt{1,029^2 + (-0,0146)^2} = 1,0297$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода

$$I_{0a} = \frac{P_{cm.osn.} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{103,45 + 3 \cdot 2,5^2 \cdot 1,383}{3 \cdot 220} = 0,197 A$$

Расчетные величины

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2 = 1,029^2 - (-0,0146)^2 = 1,0599$$

$$b' = 2 \cdot c_{1a} \cdot c_{1p} = 2 \cdot 1,0296 \cdot (-0,0146) = -0,03$$

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x'_2 = 1,0269 \cdot 1,3826 - (-0,0146) \cdot 2,4116 - (-0,03) \cdot 2,2087 = 1,5251 O\Omega$$

$$b = c_{1a} \cdot r_1 + c_{1p} \cdot x_1 + a' \cdot x'_2 = 1,0269 \cdot 1,3826 + (-0,0146) \cdot 2,4116 + 1,0599 \cdot 2,2087 = 4,80369 O\Omega$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения.

$$P_{cm} + P_{mex} = 124,26 + 77,54 = 201,8 Bm$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений  
 $S = 0,001; 0,0072; 0,012; 0,0168; 0,0216; 0,024; 0,0292$ , принимаем предварительно, что  
 $S_{nom} \approx r'_2 = 0,0292$ .

Номинальные данные спроектированного двигателя.

$$P_{2nom} = 4kBm \quad U_{1nom} = 220 / 380 B \quad I_{1nom} = 7,83 A \quad \cos\varphi_{nom} = 0,89 \quad \eta_{nom} = 0,87$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

### 3.11 Расчет переходных процессов в разомкнутой системе, оценка динамических показателей электропривода и возможностей демпфирования упругих колебаний

Из теории автоматического управления известно, что динамические свойства замкнутых систем определяются свойствами разомкнутой системы, ее передаточными функциями и частотными характеристиками. Поэтому прежде чем перейти к изучению свойств замкнутых систем «управляемый преобразователь-двигатель», рассмотрим динамику разомкнутых электромеханических систем [14].

При определенных условиях механические характеристики принципиально разнотипных двигателей описываются идентичными уравнениями. В этих границах аналогичны и основные электромеханические свойства двигателей, что создаёт предпосылки для обобщённого изучения динамики электромеханических систем.

Возможность такого обобщения вытекает из сравнения уравнений динамической жесткости, для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронного двигателя при линеаризации рабочего участка характеристики при питании от источника напряжения и тока:

$$\beta_{\text{ак}}(p) = -\frac{\beta}{1 + pT_s} \quad \text{- ДПТ;}$$

$$\beta_{\text{ак}}(p) = -\beta(1 + pT_s) \quad \text{- АД при питании от генератора напряжения;}$$

$$\beta_{\text{ак}}(p) = -\beta_1(1 + pT_{\text{я}}) \quad \text{- АД при питании от генератора тока.}$$

Из сравнения этих выражений видно, что они отличаются только выражениями статической жесткости  $\beta(\beta_1)$  и электромагнитной постоянной времени  $T_{\text{э}}(T_{\text{я}})$ . Следовательно, распространив обозначение  $T_{\text{э}}$  на двигатели постоянного тока ( $T_{\text{я}}=T_{\text{э}}$ ), получим следующую форму записи уравнений динамики линеаризованных электромеханических систем:

$$\begin{cases} (1 + T_s p)M = \beta(\omega_0 - \omega); \\ M - M_e = Jp\omega. \end{cases} \quad (1)$$

Эти уравнения являются обобщенными уравнениями динамики электромеханической системы с двигателем, имеющим линейную или линеаризованную механическую характеристику, динамическая жесткость которой описывается передаточной функцией апериодического звена с коэффициентом  $\beta$  и постоянной времени  $T_{\text{э}}$ :

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$\beta_{\Delta \omega}(p) = \frac{M(p)}{\omega(p)} = -\frac{\beta}{1+T_s p} \quad (2)$$

Особенности применяемого двигателя при этом отражаются в конкретном смысле переменных и выражениях параметров. Для двигателя с независимым возбуждением:



Рисунок 3.11.1 - Структурная схема электропривода с линейной механической характеристикой и с жесткими механическими связями

$$\omega_0 = \frac{U_d}{k\Phi} \quad (3)$$

Для асинхронного двигателя при линеаризации рабочего участка его механической характеристики в области  $s < sk$ :

$$\omega_0 = \frac{2\pi f_1}{p_n} \quad (4)$$

Обобщенная электромеханическая система с механической характеристикой, описываемой линейным дифференциальным уравнением первого порядка, является основным объектом изучения теории электропривода. Она правильно отражает основные закономерности, свойственные реальным нелинейным электромеханическим системам в режимах допустимых отклонений от статического состояния, и, благодаря простоте, обеспечивает возможность обобщенного анализа этих закономерностей методами теории автоматического управления.

Динамические процессы синхронного электропривода описываются следующей системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} M &= \left[ \left( \frac{C_m}{p} \right) + \beta \right] (\omega_0 - \omega); \\ M - M_c &= Jp\omega. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Структурная схема электромеханической системы с двигателем имеет вид

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

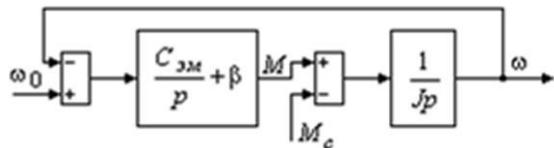


Рисунок 3.11.2 - Структурная схема линеаризованного электропривода.

Для анализа свойств электропривода с линейной механической характеристикой как объекта автоматического управления найдем передаточную функцию системы по управляющему воздействию:

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} \quad (6)$$

Из рисунка можно записать:

$$\omega(p) = [\omega_0(p) - \omega(p)] \frac{\beta}{1+T_s p} \frac{1}{Jp} \quad (7)$$

или

$$\omega(p) \left( 1 + \frac{\beta}{Jp + JT_s p^2} \right) = \omega_0(p) \frac{\beta}{Jp(1+T_s p)} \quad (8)$$

или

$$\omega(p) \left( 1 + \frac{1}{T_\kappa T_s p^2 + T_\kappa p} \right) = \omega_0(p) \frac{\beta}{Jp(1+T_s p)} \quad (9)$$

или

$$\omega(p) \frac{T_\kappa T_s p^2 + T_\kappa p + 1}{T_\kappa T_s p^2 + T_\kappa p} = \omega_0(p) \frac{\beta}{Jp(1+T_s p)} \quad (10)$$

Отсюда

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{\beta T_\kappa p (1+T_s p)}{(T_\kappa T_s p^2 + T_\kappa p + 1) J p (1+T_s p)} = \frac{\beta \frac{J}{\beta}}{J (T_\kappa T_s p^2 + T_\kappa p + 1)}; \quad (11)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$W_{\infty}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{1}{T_s T_m p^2 + T_m p + 1}, \quad (12)$$

где  $T_m = \frac{J}{\beta}$  - электромеханическая постоянная времени.

Передаточная функция по возмущающему воздействию - моменту статической нагрузки МС, имеет вид:

$$W'_{\infty}(p) = \frac{\omega(p)}{M_e(p)}. \quad (13)$$

Характеристическое уравнение системы:

$$T_s T_m p^2 + T_m p + 1 = 0 \quad (14)$$

Корни этого уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_s} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_s^2} - \frac{1}{T_s T_m}} = \frac{1}{T_m} \left( -\frac{m}{2} \pm \sqrt{\frac{m^2}{4} - m} \right) \quad (15)$$

$$m = \frac{T_m}{T_s}.$$

Значение  $m$  определяет колебательность разомкнутой электромеханической системы.

Если  $m > 4$ , то  $p_1 = -\alpha_1$ ;  $p_2 = -\alpha_2$ .

Поэтому в этом случае:

$$W_{\infty}(p) = \frac{1}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)}, \quad T_1 = \frac{1}{\alpha_1} \quad (16)$$

Следовательно, при  $m > 4$  рассматриваемый электропривод может быть представлен в виде последовательного соединения инерционных звеньев с постоянными времени  $T_1$  и  $T_2$  [14, с.304]

При  $m = 4$  характеристическое уравнение системы имеет два равных отрицательных корня. В этом случае:

$$W_{\infty}(p) = \frac{1}{(Tp + 1)^2}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$T = \frac{1}{\alpha}$$

где

При  $m < 4$  характеристическое уравнение имеет комплексно-сопряженные корни и электропривод представляет собой колебательное звено с коэффициентом затухания  $\xi$  меньшим или равным 1, уменьшающимся по мере уменьшения  $m$ .

В этом случае можно записать:

$$W_{\infty}(p) = \frac{1}{T_s T_n p^2 + T_n p + 1} = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1} \quad (17)$$

$$T_1 = \sqrt{T_s T_n}, \quad 2\xi T_1 = T_n; \quad \xi = \frac{T_n}{2T_1} = \frac{\sqrt{m}}{2} \quad (18)$$

Анализ частотных характеристик двигателей мощностью выше 10кВт показал, что передаточную функцию по управляемому воздействию можно представить в виде:

$$W_{\infty}(p) = \frac{1}{(\sqrt{T_s T_n} p + 1)^2} \quad (19)$$

т.е. заменить колебательное звено двумя апериодическими с постоянной.

Для многих электроприводов малой мощности  $m > 4$ , при этом можно пренебречь электромагнитной инерцией, положив  $T_n \gg 0$ , тогда структурная схема асинхронного электропривода с линеаризованной механической характеристикой будет иметь вид:

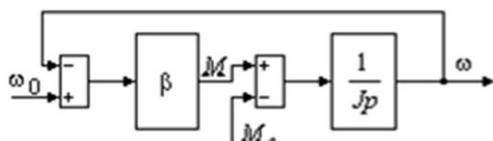


Рисунок 3.11.3 - Структурная схема асинхронного электропривода с линеаризованной механической характеристикой.

Из рисунка после элементарных преобразований:

$$M = \beta(\omega_0 - \omega); \quad M - M_c = \beta T_n p \omega; \quad (20)$$

$$[(\omega_0 - \omega)\beta - M_c] \frac{1}{Jp} = \left( \omega_0 - \omega - \frac{M_c}{\beta} \right) \frac{\beta}{Jp} = \omega; \quad (21)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$\beta = \frac{J}{T_\kappa}, \quad \frac{\beta}{Jp} = \frac{1}{T_\kappa p} \quad (22)$$

$$\omega = \left( \omega_0 - \frac{M_e}{\beta} \right) \frac{1}{T_\kappa p} - \omega \frac{1}{T_\kappa p}; \quad (23)$$

$$\omega \frac{1+T_\kappa p}{T_\kappa p} = \left( \omega_0 - \frac{M_e}{\beta} \right) \frac{1}{T_\kappa p} \quad (24)$$

получаем:

$$\omega = \left( \omega_0 - \frac{M_e}{\beta} \right) \frac{1}{1+T_\kappa p} \quad (25)$$

Полученное уравнение позволяет структурную схему асинхронной машины с линеаризованной механической характеристикой представить в виде (рис. 3.11.4):

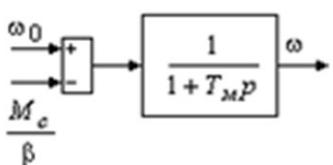


Рисунок 3.11.4 - Преобразованная структурная схема асинхронной машины с линеаризованной механической характеристикой.

Из преобразованной структурной схемы видно, что при  $T_\kappa \gg 0$  электропривод с линейной механической характеристикой приближенно можно представить в виде инерционного звена с постоянной времени  $T_m$ .

Переходную и весовую функции инерционного звена можно представить в виде:

$$h(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (26)$$

$$h'(t) = \left( \frac{1}{T_m} \right) e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (27)$$

По уравнениям на рисунке построены временные характеристики электропривода.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

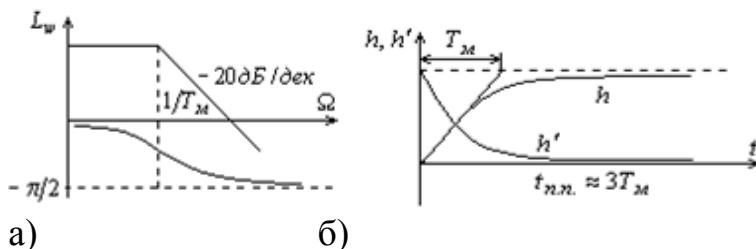


Рисунок 3.11.5 - Временные характеристики электропривода

Из полученных временных характеристик можно сделать вывод: электромеханическая постоянная времени  $T_m$  представляет собой время, за которое электропривод достиг бы установившейся скорости, двигаясь равномерно ускоренно под действием постоянного динамического момента, равного начальному значению:

$$M_{\text{дин. нач.}} = J \left( \frac{d\omega}{dt} \right). \quad (28)$$

В системе предусматривается регулирование скорости вращения якоря двигателя  $\omega_M$  путём изменения напряжения питания  $U$ . Ток возбуждения, а, следовательно, и магнитный поток двигателя полагается неизменным и равным номинальному  $\Phi_n$ .

На принципиальной схеме:  $b$ ,  $L_b$  - соответственно активное сопротивление и индуктивность обмотки LM1 двигателя;  $y_g$ ,  $L_{yg}$  - соответственно общее активное сопротивление и индуктивность обмоток LM2 и LM3 двигателя.

Уравнение движения двигателя под нагрузкой и уравнение цепи якоря:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_M - M_c \quad (1.15)$$

$$L_{ad} \frac{di_a}{dt} + r_{ad} i_a + e_d = U \quad (1.16) \quad (29)$$

В выражениях (1.15), (1.16) для двигателя:

$$M_M = (c\Phi_n)_o i_a \quad (30)$$

$$e_d = (c\Phi_n)_o \omega_M \quad (31)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$M_C = (c\Phi_h)_\partial i_c \quad (32)$$

После перехода к символической форме записи и соответствующих преобразований получим систему уравнений в виде:

$$sJ\omega(s) = [I_a(s) - I_c(s)](c\Phi_h)_\partial \quad (33)$$

$$U(s) - E_\partial(s) = I_a(s)(sL_{a\partial} + r_{a\partial}) \quad (34)$$

С учётом того, что уравнение цепи якоря генератора под нагрузкой

$$U(s) = E_e(s) - I_a(s)(sL_{ae} + r_{ae}) \quad (35)$$

уравнение примет вид:

$$E_{\tilde{a}}(s) - \omega_i(\tilde{n}\hat{O}_i)_{\tilde{a}} = I_{\tilde{y}}(s)[s(L_{\tilde{y}\tilde{a}} + L_{\tilde{y}\tilde{a}}) + (r_{\tilde{y}\tilde{a}} + r_{\tilde{y}\tilde{a}})] \quad (36)$$

На основании уравнений структурную схему двигателя можно представить, как приведено ниже.

Структурная схема двигателя приведена в п. 3.4 Рисунок 3.4.10

В соответствии со структурной схемой запишем передаточную функцию двигателя постоянного тока:

$$W_{\partial\theta}(s) = \frac{\frac{1}{R_\Theta(T_\Theta s + 1)} \cdot \frac{R_\Theta K_M}{T_M s}}{1 + \frac{1}{R_\Theta(T_\Theta s + 1)} \cdot \frac{R_\Theta K_M}{T_M s} \cdot \frac{1}{K_M}} = \frac{\frac{K_M}{T_M s (T_\Theta s + 1)}}{\frac{T_M s (T_\Theta s + 1) + 1}{T_M s (T_\Theta s + 1)}} = \frac{K_M}{T_M T_\Theta s^2 + T_M s + 1} \quad (37)$$

Определим численные параметры передаточной функции двигателя.

Эквивалентная электромагнитная  $T_\Theta$  и электромеханическая  $T_M$  постоянные времени:

$$T_\Theta = \frac{L_{ae} + L_{a\partial}}{R_\Theta} \quad T_M = \frac{JR_\Theta}{(c\omega_h)_\partial^2} \quad (38)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$L_{я\varrho} = 0,25 \frac{U_{н\varrho}}{P_{\varrho}\omega_{н\varrho} I_{н\varrho}} \quad L_{я\partial} = 0,25 \frac{U_{н\partial}}{P_{\partial}\omega_{н\partial} I_{н\partial}} \quad (39)$$

где индекс  $\varrho$  относится к генератору, а индекс  $\partial$  - к двигателю.

$$R_{\vartheta} = 1,1 [1,32(r_{я20} + r_{ко20} + r_{dn20})_{\varrho} + r_{u\varrho} + 1,32(r_{я20} + r_{ко20} + r_{dn20})_{\partial} + r_{u\partial}] \quad (40)$$

$r_{u\varrho} = \frac{2}{I_{н\varrho}}$  - сопротивление щеток генератора, Ом;

$r_{u\partial} = \frac{2}{I_{н\partial}}$  - сопротивление щеток двигателя, Ом;

$$(c\Phi_n)_{\partial} = \frac{E_{н\partial}}{\omega_{н\partial}}$$

$$E_{н\partial} = U_{н\partial} - I_{н\partial} \cdot 1,32(r_{я20} + r_{ко20} + r_{dn20})_{\partial} - \Delta U_{u\partial} \quad (41)$$

$K_m = \frac{1}{(c\Phi_n)_{\partial}}$  - коэффициент передачи двигателя  $н_г = 2\pi n_g / 60 = 6.28 * 1000 / 60 = 104,7$  рад/с- номинальная угловая частота вращения генератора;  $н_д = 2\pi n_d / 60 = 6.28 * 400 / 60 = 41,86$  рад/с- номинальная угловая частота вращения двигателя;  $н_г = 460$  (В) - номинальное напряжение для генератора;  $н_д = 652$  (А) - номинальный ток для генератора;  $г = 2$  - число пар полюсов  $д = 2$  - число пар полюсов  $н_д = 440$  (В) - номинальное напряжение для двигателя;  $н_д = 398$  (А) - номинальный ток для двигателя;

$r_{я20} = 0,0141$  ( $Ом$ );  $r_{ко20} = 0,00619$  ( $Ом$ );  $r_{dn20} = 0,001905$  ( $Ом$ ) - сопротивление соответственно обмотки якоря, компенсационной обмотки, обмотки добавочных полюсов для генератора при температуре  $20^{\circ}C$ ;

$$r_{я20\partial} = 0,0359$$
 ( $Ом$ );  $r_{ко20\partial} = 0,0178$  ( $Ом$ );  $r_{dn20\partial} = 0,00485$  ( $Ом$ ) -

сопротивление соответственно обмотки якоря, компенсационной обмотки, обмотки добавочных полюсов для двигателя при температуре  $20^{\circ}C$ ;

1,32 - коэффициент приведения сопротивлений обмоток к температуре

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$75^{\circ}\text{C} = 37,5$  - момент инерции двигателя.

Подставляем эти значения :

$$r_{u\vartheta} = \frac{2}{398} = 0,005(\text{Om})$$

$$\begin{aligned} R_{\vartheta} &= 1,1[1,32(r_{\vartheta 20} + r_{k\vartheta 20} + r_{d\vartheta n 20})_2 + r_{u\vartheta} + 1,32(r_{\vartheta 20} + r_{k\vartheta 20} + r_{d\vartheta n})_0 + r_{u\vartheta}] = \\ &= 1,1(1,32(0.022195) + 0,003 + \\ &+ 1,32(0.05855) + 0,005) = 0,127(\text{Om}) \end{aligned}$$

Вычислим номинальную ЭДС:

$$\begin{aligned} E_{n\vartheta} &= U_{n\vartheta} - I_{n\vartheta} \cdot 1,32(r_{\vartheta 20} + r_{k\vartheta 20} + r_{d\vartheta n 20})_0 - \Delta U_{u\vartheta} = \\ &= 440 - 3,98 \cdot 1,32(0.05855) - 2 = 407,241(\text{B}) \end{aligned}$$

$$(c\Phi_n)_0 = \frac{E_{n\vartheta}}{\omega_{n\vartheta}} = \frac{407,241}{41,86} = 9,728$$

$$K_u = \frac{1}{(c\Phi_n)_0} = \frac{1}{9,728} = 0,102$$

$$\frac{(0,123 + 3,3) \cdot 10^{-3}}{0,127} = 0,0328 (\text{c})$$

$$T_M = \frac{JR_{\vartheta}}{(c\Phi_n)_0^2} = \frac{37,5 \cdot 0,127}{9,728^2} = 50 \cdot 10^{-3} (\text{c})$$

Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются начальным пусковым и максимальным моментом и начальным пусковым током. Расчет пусковых характеристик затруднен необходимостью учета измерений параметров, вызванных эффектом вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния, т.к. при больших скольжениях токи могут превышать свое минимальное значение в 7-7,5 раз.

Рассчитываем точки характеристик, соответствующие скольжениям  $S = 1; 0,8; 0,6; 0,2; 0,1; 0,5$ .

Расчет проводится по формулам таблицы в целях определения токов в пусковых режимах для дальнейшего учета влияния насыщения от полей рассеяния расчет пусковых характеристик производится аналогично, включая последние пункты формуляра. Подробный расчет приведен для  $S=1$ . Данные расчета остальных точек сведены в таблице.

Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока  $[V_{pac} = 75^{\circ}\text{C}; \rho_{75} = \frac{10^{-6}}{22} \text{ Om} \cdot \text{m}; \frac{b_c}{b_n} = 1; b_c - \text{ширина стержня, м}; b_n -$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ширина паза, м; в роторах с литой обмоткой  $b_c = b_n$  [Л-1];  $f_1 = 50 \text{ Гц}$

По рисунку паза ротора

$$h_c = h_{n2} - h_{u2} = 0,022 - 0,0005 = 0,0215 \text{ м}$$

$h_c$  - высота стержня в пазу

$$\xi = 65,15 \cdot h_c \sqrt{S} = 65,15 \cdot 0,0215 \cdot \sqrt{1} = 1,4$$

для  $\xi = 1,4$  находим  $\varphi = 0,38$

Площадь сечения стержня  $q_r$

$$q_r = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) \quad (42)$$

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0,0215}{1 + 0,38} = 0,0168 \text{ м}$$

где

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 0,0078 - \frac{0,0078 - 0,0023}{0,017} \cdot \left( 0,0168 - \frac{0,0078}{2} \right) = 0,0036 \text{ м}$$

$$q_r = \frac{3,14 \cdot 0,0078^2}{8} + \frac{0,0078 + 0,0036}{2} \cdot \left( 0,0168 - \frac{0,0078}{2} \right) = 97,15 \text{ мм}^2$$

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{1,087 \cdot 10^{-4}}{9,715 \cdot 10^{-5}} = 1,12$$

$q_c$  из п. 3.6 расчета Таблица 2.

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием вытеснения тока.

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) \quad (43)$$

по п. 3.6 расчета Таблицы 2  $r'_c = r_c = 0,435 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$ ;  $r_2 = 0,66 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$

$$K_R = 1 + \frac{0,435 \cdot 10^{-4}}{0,66 \cdot 10^{-4}} \cdot (1,12 - 1) = 1,078$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 = 1,078 \cdot 0,8196 = 0,8835 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока для  $\xi = 1,4$ ;  $\varphi' = k_o = 0,9$ .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}} \quad (44)$$

где  $K_x$  - коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока.

$\lambda_{n2\xi}$  - коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока.

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda'_{n2} \cdot (1 - k_o) \quad (45)$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} = \lambda'_{n2} \cdot (1 - k_o) = \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_u}{2 \cdot b_1} \right] \cdot (1 - k_o) \quad (46)$$

$$\Delta\lambda_{n2\xi} = \left[ \frac{0,017}{3 \cdot 0,0078} \cdot \left( 1 - \frac{3,14 \cdot 0,0078^2}{8 \cdot 1,087 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0,66 - \frac{0,001}{2 \cdot 0,0078} \right] \cdot (1 - 0,9) = 0,6043$$

$$\lambda_{n2\xi} = 1,567 - 0,6043 = 0,9386$$

$$K_x = \frac{0,9386 + 0,5028 + 2,281}{1,5671 + 0,5028 + 2,281} = 0,976$$

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x = 2,2087 \cdot 0,976 = 2,1558 \text{ Ом}$$

где  $x'_{2\xi}$  - индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока.

Пусковые параметры:

Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме.

$$x_{12n} = k_\mu \cdot x_{12} = 1,5373 \cdot 84 = 129,139 \text{ Ом}$$

$$c_{1n} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{2,4116}{129,139} = 1,0187$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока для  $S=1$

$$R_n = r_1 + \frac{c_{1n} \cdot r'_{2\xi}}{S} = 1,3826 + \frac{1,0187 \cdot 0,8835}{1} = 2,2826 \text{ Ом}$$

$$X_n = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi} = 2,4116 + 1,0187 \cdot 1,8896 = 4,3365 \text{ Ом}$$

ток в обмотке ротора

$$I'_{2n} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{R_n^2 + X_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{2,2826^2 + 4,3365^2}} = 44,893 \text{ А}$$

ток в обмотке статора

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 П3

$$I_{1n} = I'_{2n} \cdot \frac{\sqrt{R_n^2 + (X_n + x_{12n})^2}}{c_{1n} \cdot x_{12n}} = 44,893 \cdot \frac{\sqrt{2,2826^2 + (4,3365 + 129,139)^2}}{1,0187 \cdot 129,139} = 45,5565A$$

### 3.12 Расчет энергетических показателей

Расчет проводим для точек характеристик, соответствующих  $S = 1; 0,8; 0,6; 0,2; 0,1; 0,5$  при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учетом влияния вытеснения тока. Подробный расчет приведен для  $S=1$  [14].

Индуктивное сопротивление обмоток. Принимаем  $k_{nac} = 1,2$

$$F_{n.cp.} = 0,7 \frac{I_1 \cdot k_{nac} \cdot U_{n1}}{a} \cdot \left( k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{o\delta 1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (1)$$

$$F_{n.cp.} = 0,7 \frac{44,89 \cdot 1,2 \cdot 38}{1} \cdot \left( 1 + 1 \cdot 0,92 \frac{24}{19} \right) = 2031 A$$

где  $k'_\beta$  - коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза вызванное укорочением шага обмотки.

$k_{y1}$  - коэффициент укорочения шага обмотки.

$a$  - число эффективных проводников в пазу статора.

$U_{n1}$  - число эффективных проводников в пазу статора.

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.cp.} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N}$$

$B_{\phi\delta}$  - фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре.

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z_1} + t_{Z_2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,00045}{0,0121 + 0,0151}} = 0,9573$$

коэффициент

$$B_{\phi\delta} = \frac{2031 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,00045 \cdot 0,9573} = 3,0241 Tl$$

для  $B_{\phi\delta} = 3,54 Tl$  находим  $\kappa_\delta = 0,7$

$\kappa_\delta$  - отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния насыщенной машины.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения.

$$c_{\exists 1} = (t_{Z_1} - b_{u1}) \cdot (1 - \kappa_\delta) = (0,0121 - 0,0035) \cdot (1 - 0,7) = 0,0026$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$\Delta\lambda_{n1nac} = \frac{h_{u1} + 0,58 \cdot h_\kappa}{b_{u1}} \cdot \left( \frac{c_{\vartheta 1}}{c_{\vartheta 1} + 1,5 \cdot b_{u1}} \right) \quad (3)$$

$$h_\kappa = \frac{b_1 - b_{u1}}{2} = \frac{0,0078 - 0,0035}{2} = 0,00213 \text{ м}$$

$$\Delta\lambda_{n1nac} = \frac{0,0005 + 0,58 \cdot 0,00213}{0,0035} \cdot \left( \frac{0,0026}{0,0026 + 1,5 \cdot 0,0035} \right) = 0,1633$$

$$\lambda_{n1nac} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1nac} = 1,1795 - 0,1633 = 1,0162$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения.

$$\lambda_{o1nac} = \lambda_{o1} \cdot \kappa_\delta = 2,174 \cdot 0,7 = 1,5218$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения.

$$x_{1nac} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1nac} + \lambda_{o1nac} + \lambda_{\pi 1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{o1} + \lambda_{\pi 1}} = 2,4116 \cdot \frac{1,0162 + 1,5218 + 1,7256}{1,1795 + 2,174 + 1,7256} = 2,0244 \text{ Ом}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока.

$$\Delta\lambda_{n2nac} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{\vartheta 2}}{c_{\vartheta 2} + b_{u2}} \quad (4)$$

$$c_{\vartheta 2} = (t_{Z_2} - b_{u2}) \cdot (1 - \kappa_\delta) = (0,0151 - 0,001) \cdot (1 - 0,7) = 0,0042$$

$$\Delta\lambda_{n2nac} = \frac{0,0005}{0,001} \cdot \frac{0,0042}{0,0042 + 0,001} = 0,4046$$

$$\lambda_{n2\xi nac} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2nac} = 0,9386 - 0,4046 = 0,534$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения.

$$\lambda_{o2nac} = \lambda_{o2} \cdot \kappa_\delta = 2,281 \cdot 0,7 = 1,5967$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния насыщения.

$$x'_{2\xi nac} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xi nac} + \lambda_{o2nac} + \lambda_{\pi 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{\pi 2}} = 2,2087 \cdot \frac{0,534 + 1,5967 + 0,5028}{1,5671 + 2,281 + 0,5028} = 1,3369 \text{ Ом}$$

$$c_{1n.nac} = 1 + \frac{x_{1nac}}{x_{12n}} = 1 + \frac{2,0244}{129,1391} = 1,0157$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

## Расчет токов и моментов.

$$R_{n.nac} = r_1 + c_{1n.nac} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{S} = 1,3826 + 1,0157 \cdot \frac{0,8835}{1} = 2,2799 \text{ Ом}$$

$$X_{n.nac} = x_{1n.nac} + c_{1n.nac} \cdot x'_{2\xi nac} = 2,0244 + 1,0157 \cdot 1,3369 = 3,3822 \text{ Ом}$$

$$I'_{2n.nac} = \frac{U_{1n\text{ом}}}{\sqrt{R_{n.nac}^2 + X_{n.nac}^2}} = \frac{220}{\sqrt{2,2799^2 + 3,3822^2}} = 53,936 \text{ А}$$

$$I_{1n.nac} = I'_{2n.nac} \cdot \frac{\sqrt{R_{n.nac}^2 + (X_{n.nac} + x_{12n})^2}}{c_{1n.nac} \cdot x_{12n}} = 55,34 \cdot \frac{\sqrt{2,2799^2 + (3,3822+129,139)^2}}{1,0157 \cdot 129,139} = 54,5 \text{ А}$$

Кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения.

$$I_n^* = \frac{I_{1n.nac}}{I_{1n\text{ом}}} = \frac{54,5}{7,83} = 6,96$$

Кратность пускового момента с учетом влияния вытеснения тока и насыщения.

$$M_n^* = \left( \frac{I'_{2n.nac}}{I'_{2n\text{ом}}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_{nac}}{S} = \left( \frac{53,94}{7,186} \right)^2 \cdot 1,078 \cdot \frac{0,0292}{1} = 1,77$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения.

$$k'_{nac} = \frac{I_{1n.nac}}{I_{1n}} = \frac{54,5}{45,56} = 1,19$$

отличается от принятого  $k_{nac} = 1,2$  менее чем на 1%

Для расчета других точек характеристики задаемся  $k_{nac}$ , уменьшенным в зависимости от тока  $I_{1n}$ .

Принимаем

$$S = 0,8 \cdot k_{nac} = 1,18$$

$$S = 0,6 \cdot k_{nac} = 1,16$$

$$S = 0,4 \cdot k_{nac} = 1,14$$

$$S = 0,2 \cdot k_{nac} = 1,12$$

$$S = 0,1 \cdot k_{nac} = 1,1$$

Критическое скольжение определяем после расчета всех пусковых характеристик по средним значениям сопротивлений  $x_{1n.nac}$  и  $x'_{2\xi nac}$ , соответствующим скольжениям  $S = 1\dots 0,1$  [14, с.361].

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ 85

$$S = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1nac}}{c_{1n.nac}} + x'_{2\xi nac}} = \frac{0,8196}{\frac{2,0244}{1,0157} + 1,3369} = 0,2$$

После этого рассчитываем кратность максимального момента  $M^*_{\max} = 2,93$ .

С увеличением частоты тока в стержнях обмотки короткозамкнутого ротора возникает эффект вытеснения тока, в результате которого плотность тока в верхней части стержней возрастает, а в нижней уменьшается, при этом активное сопротивление ротора увеличивается, а индуктивное уменьшается. Изменение сопротивлений ротора влияет на пусковые характеристики машины, увеличивается начальный момент двигателя.

В большинстве случаев эффект вытеснения тока в обмотках короткозамкнутых роторов играет положительную роль, так как увеличивает начальные моменты двигателей. Однако неравномерное распределение плотности тока по сечению стержня ротора может привести и к нежелательным последствиям. Например, при неудачно выбранных размерах соотношениях стержней чрезмерно возрастающая в пусковых режимах плотность тока в их верхних участках может вызвать неравномерное тепловое удлинение стержней и их изгиб. При этом стержни разрывают усики пазов и выгибают в воздушный зазор, что неизбежно приводит к выходу двигателя из строя.

Коронки зубцов статора и ротора в машинах средней и большой мощности в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии которого замыкаются через верхнюю часть паза. Поэтому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщение стали потоками рассеяния влияния не оказывает.

Приближенно считают, что оба явление - вытеснение тока в проводниках ротора и насыщение его зубцов - взаимно не связаны.

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям ( $KPD$  и  $\cos\varphi$ ), так и по пусковым характеристикам.

Тепло выделяемое при работе машины, нагревает отдельные части электрической машины, повышая их температуру. Чрезмерное повышение температуры может вызвать снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток. Для повышения надежности двигателя снижают (в некоторых случаях) допустимое превышение температуры.

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$\Delta\theta_{no\theta_1} = k \cdot \frac{k_\theta \cdot P_{\vartheta_1} \cdot \left( 2 \cdot \frac{l_1}{l_{cp_1}} \right) + P_\mu}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 0,22 \cdot \frac{1,15 \cdot 258,9 \cdot \left( 2 \cdot \frac{0,104}{0,6579} \right) + 103,455}{3,14 \cdot 0,0924 \cdot 0,104 \cdot 158} = 9,11^\circ C$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки

$$\Delta\theta_{u\vartheta_1} = \frac{k_\theta \cdot P_{\vartheta_1} \cdot \left( 2 \cdot \frac{l_1}{l_{cp_1}} \right)}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1} \cdot \left( \frac{b_{u\vartheta_1}}{\lambda_{\vartheta\kappa\theta}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\vartheta\kappa\theta}} \right) = \frac{1,15 \cdot 258,9 \cdot \left( 2 \cdot \frac{0,104}{0,6579} \right)}{24 \cdot 0,0367 \cdot 0,104} \cdot \left( \frac{0,00035}{0,16} + \frac{0,0078 + 0,0023}{16 \cdot 1,4} \right) = 2,708^\circ C$$

$$\Pi_1 = 2 \cdot h_{n,k} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,0133 + 0,0078 + 0,0023 = 0,0367 m$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя.

$$\Delta\theta_{\vartheta_1} = k \cdot \frac{k_\theta \cdot P_{\vartheta_1} \cdot \left( 2 \cdot \frac{l_{\vartheta_1}}{l_{cp_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{\vartheta_1} \cdot \alpha_1} = 0,22 \cdot \frac{1,15 \cdot 258,9 \cdot \left( 2 \cdot \frac{0,2249}{0,6679} \right)}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0924 \cdot 0,0544 \cdot 158} = 8,9749^\circ C$$

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора

$$\Delta\theta_{\vartheta_1} = \frac{k_\theta \cdot P_{\vartheta_1} \cdot \left( 2 \cdot \frac{l_{\vartheta_1}}{l_{cp_1}} \right)}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\vartheta_1} \cdot l_{\vartheta_1}} \cdot \frac{h_{\vartheta_1}}{12 \cdot \lambda'_{\vartheta\kappa\theta}} = \frac{1,15 \cdot 258,9 \cdot \left( 2 \cdot \frac{0,2249}{0,6679} \right)}{2 \cdot 24 \cdot 0,0367 \cdot 0,2249} \cdot \frac{0,0163}{12 \cdot 1,4} = 0,4986^\circ C$$

$$\Pi_1 \approx \Pi_{\vartheta_1} = 0,0367 m$$

Среднее повышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины.

$$\Delta\theta'_1 = (\Delta\theta_{no\theta_1} + \Delta\theta_{u\vartheta_1}) \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp_1}} + (\Delta\theta_{\vartheta_1} + \Delta\theta_{u\vartheta_1}) \cdot \frac{2l_{\vartheta_1}}{l_{cp_1}} \quad (5)$$

$$\Delta\theta'_1 = (9,1103 + 2,7079) \cdot \frac{2 \cdot 0,104}{0,6579} + (0,4986 + 8,9749) \cdot \frac{2 \cdot 0,2249}{0,6579} = 10,215^\circ C$$

Эквивалентная поверхность охлаждения

$\Pi_p = 0,18 m$  – средняя поверхность периметра поперечного сечения ребер корпуса АД для  $h = 100 mm$

$$S_{\vartheta\theta} = (\pi \cdot D_{1H} + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\vartheta_1}) = (3,14 \cdot 0,168 + 8 \cdot 0,18) \cdot (0,104 + 2 \cdot 0,0544) = 0,4189 m^2$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя.

$$\sum P_B = \sum P' - (1-k) \cdot (P_{\eta_1} + P_{cm.och}) - 0,9 \cdot P_{mex} = 668,986 - (1-0,22) \cdot (94,18 + 103,455) - 0,9 \cdot 77,544 = 445,043 Bm$$

$$\sum P' = \sum P - (k_\theta - 1) \cdot (P_{\eta_1} + P_{\eta_2}) = 611,1041 + (1,15 - 1) \cdot (258,907 + 126,9704) = 668,986 Bm$$

$$P_{\eta_1} = k_\theta \cdot \frac{P_{\eta_1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp_1}} = 1,15 \cdot \frac{258,907 \cdot 2 \cdot 0,104}{0,6579} = 94,18 Bm$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды.

$$\Delta \theta_B = \frac{\sum P'}{S_{ob} \cdot \alpha_B} = \frac{445,0432}{0,4189 \cdot 24} = 44,272$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды.

$$\Delta \theta_1 = \Delta \theta'_1 + \Delta \theta_B = 10,215 + 44,272 = 54,487^\circ C$$

Вентиляционный расчет асинхронного двигателя выполнен приближенным методом. Метод заключается в сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции двигателя.

Требуемый расход воздуха для охлаждения.

$$Q_B = \frac{k_m \cdot \sum P'_B}{1100 \cdot \Delta \nu_B} \quad (6)$$

где  $k_m$  - коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором.

$$k_m = m' \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a} \quad (7)$$

где  $m'$  - коэффициент, для  $2p=2$  при  $h=100\text{мм}$   $m'=2,9$ .  
 $n$  - частота вращения двигателя.

$$k_m = 2,6 \cdot \sqrt{\frac{3000}{100} \cdot 0,168} = 5,837$$

$$Q_B = \frac{5,837 \cdot 445,0432}{1100 \cdot 44,27} = 0,0533 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором.

$$Q'_B = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,168^3 \cdot \frac{3000}{100} = 0,0853 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воздуха  $Q'_B$  должен быть больше требуемого для охлаждения машины  $Q_B$ .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

$$Q'_B > Q_B$$

$$0,0853 > 0,0533$$

Что соответствует требованию.

#### 4 Разработка принципиальной схемы управления электроприводом

Разработанная принципиальная электрическая схема управления пуском асинхронного двигателя с фазным ротором функции тока представлена на рис. 4.1 [9]. На нем приведена принципиальная электрическая схема управления АД с фазным ротором и командоаппаратом. Схема предусматривает как автоматическое, так и ручное управление. Схема управления АД с фазным ротором включает АД с фазным ротором, разъединители: в силовой цепи QS1, в цепи управления QS2, командааппарат SA, реле дуговой блокировки KU2, реле напряжения KU1, линейные контакторы KM1, KM2, контакторы ускорения KM3-KM7, реле максимального тока FA1, FA2, реле тока управления KA3-KA7, тепловые реле FR1, FR2, предохранители FU1, FU2.

При подготовке схемы к работе включаются разъединители QS1 в главной цепи и QS2 в цепи управления. При этом в главной цепи ничего не происходит. В цепи управления рукоятка командааппарата устанавливается в нулевую позицию. При этом замыкается контакт SA-0, и ток, протекающий по цепи: QS2-FU1-SA-0-KA1-KA2-FR1-FR2-KU1-FU2-QS2, вызывает срабатывание реле напряжения KU1 и замыкание контакта KU1, шунтирующего контакт командааппарата SA-0. На этом подготовка схемы к работе завершается.

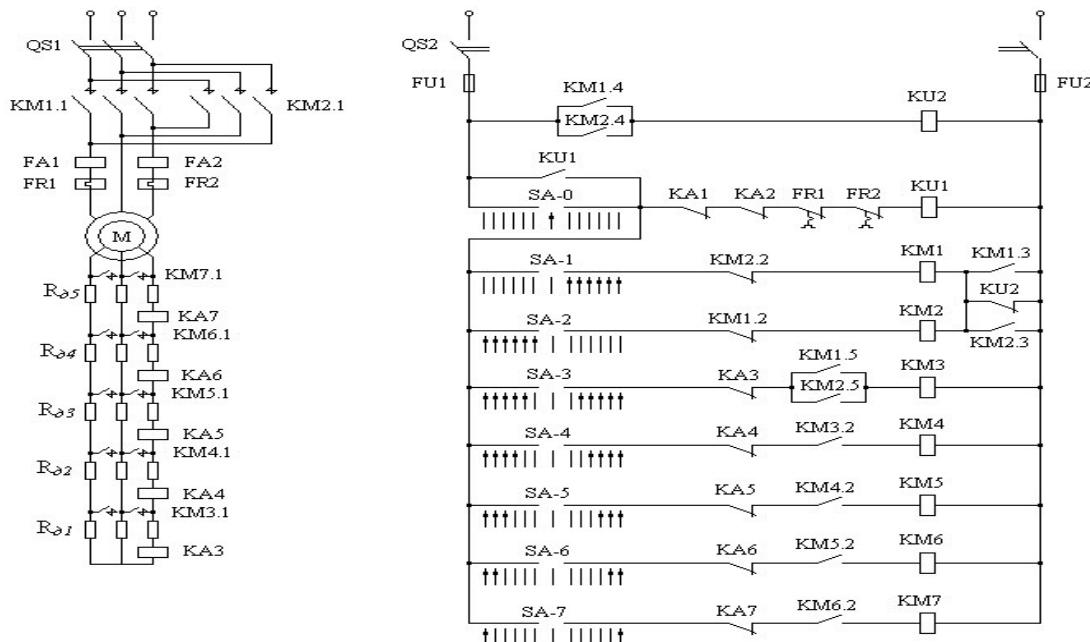


Рисунок 4.1 - Принципиальная реверсивная схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором и командааппаратом.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## **5 Экспериментальная часть**

### **5.1 Анализ кинетического привода**

Задача построения высококачественного торцевого асинхронного электропривода с векторным управлением без использования каких-либо датчиков, пристроенных к валу или встроенных в двигатель, постоянно привлекает внимание разработчиков с момента появления самого термина «векторное управление» применительно к торцевому асинхронному электродвигателю в начале 1970-х годов. Область применения таких электроприводов определяется следующими условиями:

- 1) Механизм предъявляет повышенные требования к быстродействию электропривода.
- 2) В электроприводе требуется регулирование электромагнитного момента на валу двигателя.
- 3) Не требуется высокая статическая точность и широкий диапазон регулирования скорости (диапазон не более 100).
- 4) Установка датчика скорости на вал двигателя невозможна по условиям эксплуатации, технологическим, стоимостным или прочим ограничениям. Типичными объектами являются электроприводы подъемно-транспортных средств, механизмов намотки, экструдеров, дробилок, работающих в пожароопасных, взрывоопасных, химически и радиоактивных средах, в условиях повышенных вибраций и ударных механических нагрузок.

В настоящее время бездатчиковые торцевые асинхронные электроприводы с векторным управлением представлены практически всеми ведущими фирмами, производителями преобразователей частоты. При этом характеристики большинства этих электроприводов оказываются весьма скромными. В частности, полоса пропускания контура скорости, как правило, не превышает 5-7 Гц, а общий диапазон регулирования скорости (вверх и вниз от номинальной) не более 20-100, что вполне достижимо и в системе частотного управления с векторной ориентацией переменных в установленных режимах работы. Большинство же производителей преобразователей частоты вообще не заявляют в технической документации полосу пропускания и диапазон регулирования скорости. В этом случае получить подобную информацию удается только в результате проведения стендовых испытаний [7, с.93].

Таким образом, если рассматривать указанные характеристики регулирования скорости, то практически «стирается грань» между бездатчиковыми электроприводами с частотным и векторным управлением. Исследования, выполненные в данной дипломной работе, показали, что характеристики торцевых асинхронных векторных электроприводов без датчика скорости могут существенно превышать аналогичные характеристики систем частотного управления. В частности, полоса пропускания контура скорости может составлять более 30 Гц, а в

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	90
					ДП-140604.65 ПЗ	

диапазоне регулирования скорости не менее 100 обеспечиваются значительно меньшие статические и динамические ошибки. Однако для достижения таких результатов приходится решить ряд проблем.

Основные проблемы, связанные с построением бездатчикового векторного электропривода, заключаются в следующем:

1) Наблюдатель состояния торцевого асинхронного электродвигателя, построенный на основе решения полной системы уравнений электрического равновесия для статора и ротора по доступной информации о напряжениях и токах статора, способен обеспечить приемлемую точность вычисления потоко-сцепления и скорости только в ограниченном диапазоне частот. Это связано с известной проблемой введения начальных условий при частотах, близких к нулевой. Практически все способы решения данной проблемы связаны с введением определенного отклонения математического описания наблюдателя состояния относительно реального объекта при работе в области малых частот. Эти отклонения проявляются в виде ошибки в вычислении потоко-сцепления, скорости, активной и реактивной составляющих тока.

2) Следующей проблемой является чувствительность электропривода к изменению его параметров в процессе работы. Прежде всего это относится к температурным изменениям активных сопротивлений статора и ротора, а также к изменению взаимной индуктивности в зависимости от тока цепи намагничивания. Одним из подходов к решению данной проблемы в построении векторного регулятора и наблюдателя состояния торцевого АД является применение регуляторов, грубых в отношении параметрических возмущений, в частности, релейных регуляторов, функционирующих в скользящих режимах. Другим подходом является параметрическая адаптация, осуществляемая в реальном времени при работе электропривода.

3) Третьей проблемой является получение необходимой точности оценки эквивалентных (усредненных на интервале расчета процессов в наблюдателе состояния) значений токов и напряжений статора. На точность оценки эквивалентных напряжений в области малых частот основной гармоники и высоких частот модуляции существенно влияет «мертвое время» и задержки переключения ключей инвертора. Заметим, что проблема точности измерения напряжения на малых частотах в гораздо меньшей степени проявляется в векторных электроприводах с датчиком скорости/положения, так как быстродействующий контур скорости, замкнутый по реально измеряемому сигналу, способен в значительной степени компенсировать ошибки, связанные с динамическими «неидеальностями» ключей инвертора. Известные подходы к построению наблюдателей состояния для бездатчикового торцевого асинхронного электропривода достаточно полно представлены. Отличительной особенностью предлагаемого в главе подхода является его относительная простота программной реализации и настройки (большинство контуров наблюдателя и системы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	91
					ДП-140604.65 ПЗ	

управления допускают независимую последовательную настройку). Высокие технические характеристики электропривода достигаются за счет его адаптируемости сразу к трем параметрам электродвигателя, подвергающимся наибольшим изменениям в процессе работы, а именно к активным сопротивлениям статора и ротора и к взаимной индуктивности, а также за счет компенсации задержек переключения силовых ключей преобразователя.

## 5.2 Структурная схема системы адаптивно-векторного управления электроприводом

Структурная схема системы адаптивно-векторного управления торцевым асинхронным электроприводом приведена на рис. 5.2.1 [12].

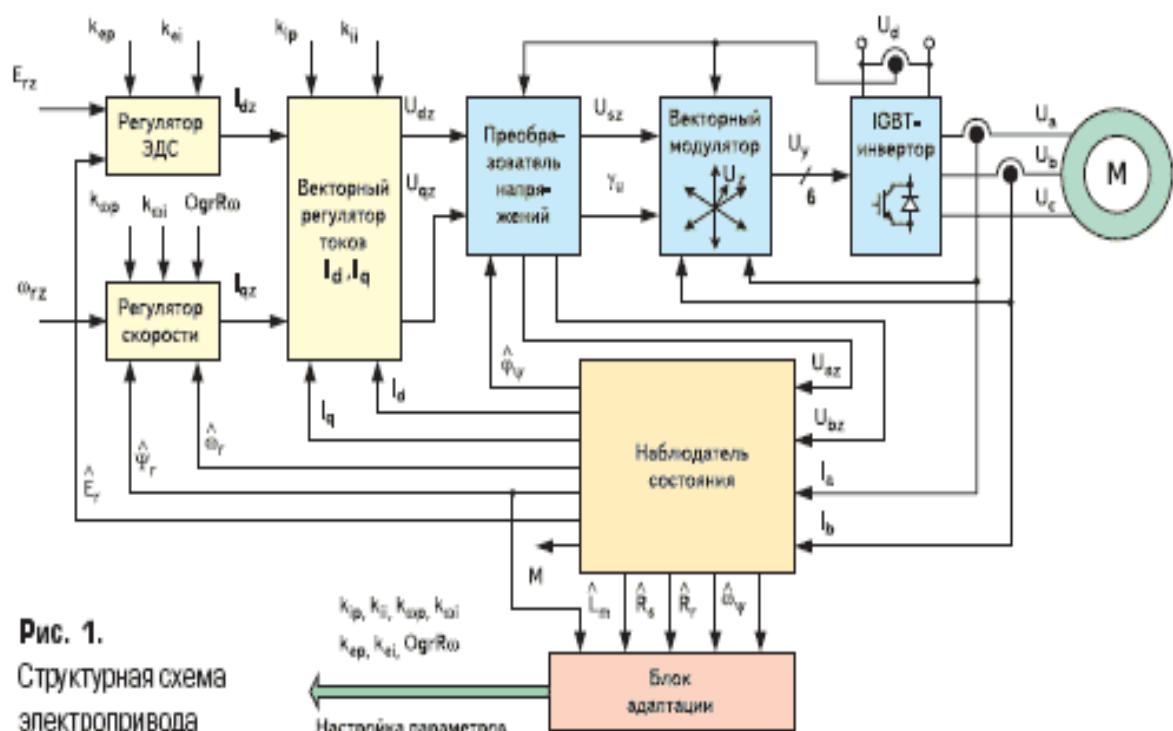


Рис. 1.  
Структурная схема  
электропривода

Рисунок 5.2.1 - Структурная схема электропривода

Назначение элементов, математическое описание, структурное построение и принцип действия векторного модулятора, преобразователя напряжений, базовых структур векторного регулятора токов  $I_d$ ,  $I_q$ , регуляторов ЭДС и скорости аналогичны и применительно к системе адаптивно-векторного управления с датчиком скорости/положения (исполнение 2 преобразователей частоты серии ЭПВ). Под базовыми здесь понимаются структуры без учета элементов адаптации.

Векторный регулятор токов включает в себя ПИ-регуляторы составляющих вектора тока статора по осям  $d$  и  $q$ , ориентированным по оценке углового положения вектора потоко-цепления ротора, и блок компенсации перекрестных

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

связей.

Преобразователь напряжений включает в себя ограничитель заданного напряжения статора по осям  $d$  и  $q$  и преобразователь координат: ортогональная система ( $d, q$ ) - полярная система - естественная трехфазная система ( $a, b, c$ ), неподвижная относительно статора, и блок компенсации запаздывания системы управления.

Векторный модулятор реализует «треугольный» алгоритм пространственно-векторного формирования выходного напряжения IGBT инвертора с функцией компенсации «мертвого времени» и задержек переключения силовых ключей.

Наблюдатель состояния реализует вычисление всех переменных и параметров электродвигателя, необходимых для реализации алгоритма адаптивно-векторного управления, по информации о двух фазных токах статора и двух заданных значениях фазных напряжений.

Блок адаптации выполняет пересчет параметров регуляторов системы управления в зависимости от изменения параметров двигателя, проявляющихся в процессе работы электропривода.

### 5.3 Наблюдатель состояния

Структурная схема наблюдателя состояния приведена на рисунке 5.3.1. Все вычисленные переменные (оценки) помечены верхним символом. Для вычисления необходимых переменных вводится ортогональная система координат ( $x, y$ ), вращающаяся синхронно с частотой поля. Ее угловое положение не фиксируется относительно какой-либо переменной или оси электродвигателя и может быть произвольным, то есть «плавающим». Принципиальными факторами являются не угловое положение, а синхронность системы ( $x, y$ ), которая обеспечивает в установившихся режимах работы двигателя постоянные значения вычисляемых переменных, а также ее относительно высокая инерционность (скорость изменения углового положения должна быть ограничена), что обеспечивает желаемую степень устойчивости цифровых вычислительных алгоритмов. В качестве частоты вращения системы координат ( $x, y$ ) могут приниматься переменные, величина которых в установившихся режимах работы равна частоте вращения поля. Это могут быть частоты вращения векторов потоко-цеплений, отфильтрованные значения частот вращения векторов напряжения или тока статора. В рассматриваемом случае частота вращения системы ( $x, y$ ) принята равной оценке частоты вращения вектора потокосцепления ротора  $\check{\omega} \psi$ . Угловое положение и частота системы координат на  $k$ -интервале расчета переменных наблюдателя вычисляются по выражениям:

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	93
					ДП-140604.65 ПЗ	

$$\begin{aligned}\omega_{x,k} &= \check{\omega}_{\psi,k-1}; \\ \varphi_{x,k} &= \varphi_{x,k-1} + \omega_{x,k} T_0,\end{aligned}\quad (1)$$

где  $T_0$  - интервал расчета переменных наблюдателя.

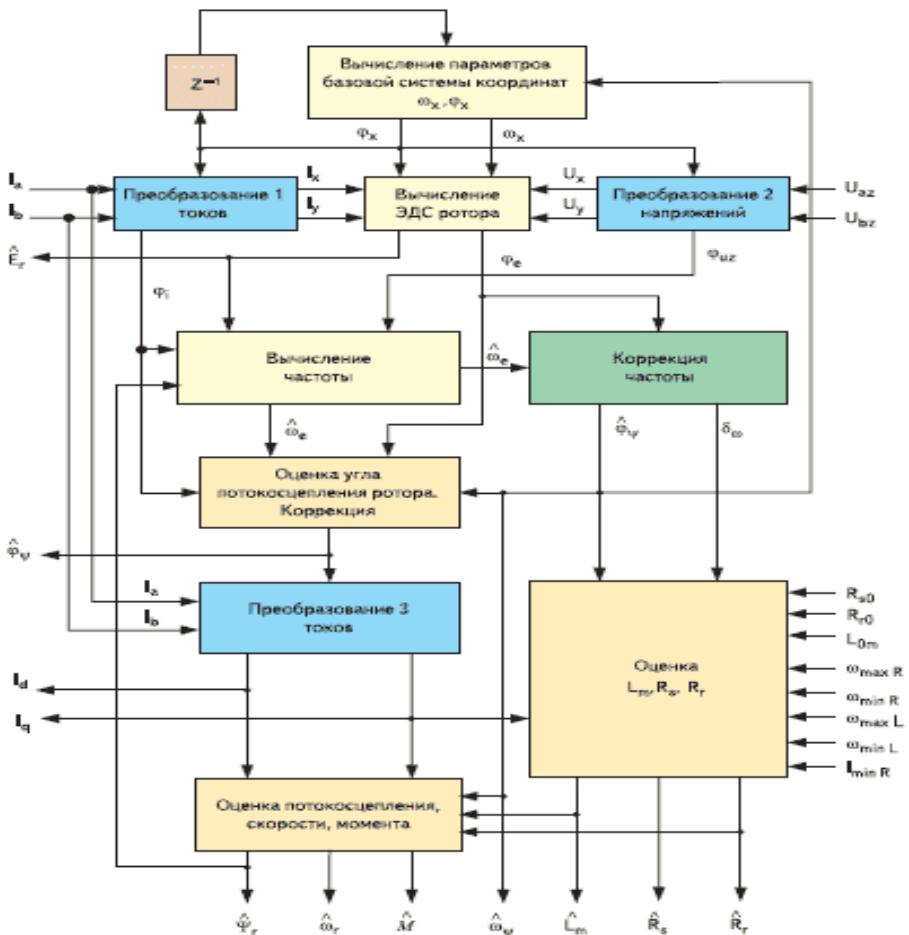


Рисунок 5.3.1 - Структурная схема наблюдателя состояния

Преобразование 1 токов и преобразование 2 напряжений из системы координат (a, b, c) в систему координат (x, y) осуществляются по выражениям:

$$\begin{aligned}U_x &= \frac{2}{\sqrt{3}}[U_{az} \sin(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}) + \\ &+ U_{bz} \sin(\varphi_{x,k-1})]; \\ U_y &= \frac{2}{\sqrt{3}}[U_{az} \cos(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}) + \\ &+ U_{bz} \cos(\varphi_{x,k-1})];\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}I_x &= \frac{2}{\sqrt{3}}[I_a \sin(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3}) + I_b \sin(\varphi_{x,k})]; \\ I_y &= \frac{2}{\sqrt{3}}[I_b \cos(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3}) + I_b \cos(\varphi_{x,k})].\end{aligned}\quad (3), (4)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

где Ia, Ib, Uaz, Ubz - токи и заданные напряжения статора фаз а и б.

Использование для преобразования напряжений углового положения системы координат на предыдущем интервале расчета ( $\phi_x, k-1$ ) связано с наличием запаздывания в измерении тока по отношению к формированию напряжения. Переход в полярную систему координат, неподвижную относительно статора, дает угловые положения векторов заданного напряжения и тока статора ( $\phi_{uz}, \phi_i$ ).

Расчет ЭДС ротора осуществляется на основе цифрового решения уравнений статорной цепи электродвигателя, записанных в системе координат (x, y):

$$U_x = R_s I_x + \sigma L_s (dI_x/dt) - \sigma L_s \omega_x I_y + E_{rx} ; = R_s I_y + \sigma L_s (dI_y/dt) - \sigma L_s \omega_x I_x + E_{ry} \quad (5)$$

где  $E_{rx} = (L_m/L_r)(d\Psi_{rx}/dt) - \omega_x (L_m/L_r)\Psi_{ty}$ ;  $E_{ry} = (L_m/L_r)(d\Psi_{ty}/dt) - \omega_x (L_m/L_r)\Psi_{rx}$ - проекции вектора ЭДС ротора в системе координат (x, y);  $\Psi_{tx}, \Psi_{ty}$  - проекции вектора потокосцепления ротора в системе координат (x, y);  $\sigma = 1 - (L_2m/L_sL_r)$  - коэффициент рассеяния;  $L_s, L_r, L_m$  - индуктивности статора, ротора, взаимная;  $R_s$  - активное сопротивление статора.

Преобразование  $E_{rx}, E_{ry}$  в полярную систему координат, неподвижную относительно статора, дает оценки модуля и углового положения вектора ЭДС ротора ( $\hat{E}_r, \Phi_e$ ).

Вычисление модуля первой оценки частоты вращения вектора потокосцепления ротора выполняется с учетом предположения, что трансформаторная составляющая ЭДС ротора ( $(L_m/L_r)(d\vec{\Psi}_r/dt)$ ) пренебрежимо мала в сравнении с

$$\text{ЭДС вращения } j\omega_\psi (L_m/L_r)\vec{\Psi}_r, \text{ по выражению:} \quad |\hat{\omega}_e| = \frac{L_r}{L_m} \frac{\hat{E}_r}{\hat{\Psi}_r}, \quad (6)$$

где  $\hat{\Psi}_r$  - оценка потокосцепления ротора.

Знак частоты вращения вектора потокосцепления ротора вычисляется на основе оригинального алгоритма по информации об угловых положениях векторов заданного напряжения и тока статора, модуле частоты вращения на текущем и предыдущих интервалах расчета и знаке частоты вращения на предыдущем интервале расчета.

Коррекция оценки частоты вращения вектора потокосцепления ротора по фактической мгновенной частоте вращения вектора ЭДС ротора, вычисленной из его углового положения  $\phi_e$ , выполняется с целью устранить в оценке частоты ошибку, вызванную структурной и параметрической неадекватностью модели статорной цепи, погрешностями измерительных каналов и приближенным

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	95
					ДП-140604.65 ПЗ	

характером вычислений. Коррекция выполняется на основе интегрального регулятора частоты, коэффициент которого устанавливается исходя из желаемого характера движения ошибки.

Оценка углового положения вектора потокосцепления ротора

$\Phi_\Psi$  выполняется на основе информации об угловых положениях векторов ЭДС ротора, тока статора и оценок частоты вращения вектора потокосцепления ротора  $\omega_e, \omega_\Psi$ . С учетом пренебрежения малой величиной трансформаторной ЭДС, угловые положения векторов ЭДС и потокосцепления ротора отстоят друг от друга на угол:  $\pm\pi/2$ . Знак определяется направлением вращения векторов (знаком частоты). На малых частотах величина ЭДС ротора стремится к нулю, и, следовательно, диапазон вычисления положения вектора ЭДС с заданной точностью ограничен некоторым минимальным значением частоты  $\omega_{\Psi\min}$ . Чтобы обеспечить работоспособность наблюдателя состояния на частотах, меньших  $\omega_{\Psi\min}$ , осуществляется переход от ориентации по вектору ЭДС к ориентации по вектору тока статора. Алгоритм вычислений организован таким образом, что этот переход осуществляется только в режимах малых скольжений, то есть близких к холостому ходу электродвигателя. В этом случае положение вектора тока статора оказывается близким к расположению вектора потокосцепления ротора, и переход на ориентацию по току не приводит к большим ошибкам в точности вычисления переменных.

Дополнительная коррекция оценки углового положения вектора потокосцепления ротора выполняется с целью минимизации влияния на точность вычисления переменных электродвигателя ошибок, вызываемых следующими факторами:

Малыми динамическими отклонениями разности угловых положений векторов ЭДС и потокосцепления ротора от величины  $\pm\pi/2$ .

Динамическими ошибками вычисления вектора ЭДС ротора.

Наличием скачков в оценке положения вектора потокосцепления, вызванных изменением структуры наблюдателя состояния в области малых частот при переходе с ориентации по вектору ЭДС к ориентации по вектору тока.

Коррекция выполняется на основе П-регулятора положения. Параметры регулятора выбираются исходя из желаемого характера движения ошибки между нескорректированным и скорректированным значениями углового положения вектора потокосцепления ротора. Коррекция угла выполняется с использованием алгоритма безинерционного устранения ошибок, превышающих определенное пороговое значение. Это делается для устранения возможности накопления больших погрешностей в вычислении угла потокосцепления при переходных процессах «в большом» (когда регулятор скорости переходит из линейной области в ограничение, в частности, при пусках, торможениях и реверсе с номинальной частоты вращения).

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	96
					ДП-140604.65 ПЗ	

Преобразование трех токов статора из системы координат (a, b, c) в ортогональную систему координат (d, q), ориентированную по оценке углового положения вектора потокосцепления ротора, осуществляется по выражениям:

$$I_d = \frac{2}{\sqrt{3}} [I_a \sin(\hat{\phi}_\psi + \frac{\pi}{3}) + I_b \sin(\hat{\phi}_\psi)];$$

$$I_q = \frac{2}{\sqrt{3}} [I_a \cos(\hat{\phi}_\psi + \frac{\pi}{3}) + I_b \cos(\hat{\phi}_\psi)].$$
(7)

Для выделения параметров электродвигателя, к изменениям которых электропривод оказывается наиболее чувствительным, а именно взаимной индуктивности, активных сопротивлений статора и ротора, используется сигнал невязки  $\delta\omega$ . Этот сигнал определяет разницу между скорректированным значением частоты вращения вектора потокосцепления ротора  $\tilde{\omega}_\psi$  и ее первой оценкой  $\tilde{\omega}_e$ . В качестве исходных значений вычисляемых параметров ( $Lm0$ ,  $Rs0$ ,  $Rr0$ ) используются значения, определенные в результате выполнения процедуры автонастройки электропривода или введенные пользователем на основе паспортных данных двигателя. Так как невязка одна, а оцениваемых параметров три, то для обеспечения сходимости оценок к истинным значениям параметров алгоритмы вычисления оценок разнесены во времени и в зависимости от режима работы электропривода (уровня частоты и нагрузки). С этой целью в блок оценки параметров вводится дополнительная информация о пределах функционирования алгоритмов оценки ( $\omega_{maxR}$ ,  $\omega_{minR}$ ,  $\omega_{maxL}$ ,  $\omega_{minL}$ ,  $I_{minR}$ ) и переменные, характеризующие величину частоты и нагрузки. Для оценки  $Rs$  использован интегральный регулятор, для оценки  $Lm$  - пропорционально-интегральный. Настройки регуляторов произведены таким образом, чтобы обеспечить желаемый характер движения ошибок оценки параметров. Оценка температурного изменения  $Rr$  выполняется косвенным образом, по оценке температурного изменения активного сопротивления статора.

## 6 Безопасность проекта

Электрические сети нефтегазопромысловых объектов преимущественно имеют три последовательные ступени трансформации на напряжения 110, 35, 6(10) кВ. Потребителями электроэнергии в основной технологической цепочке добычи и первичной переработки нефти являются:

- механизмы добычи нефти – это станки-качалки нефти, установки с погружным электроцентробежным насосом, винтовые насосы и др.;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- объекты сбора и перекачки нефти, к которым относятся групповые замерные установки, дожимные насосные станции;
- объекты подготовки и первичной переработки нефти – электрообезвоживающие и электрообессоливающие установки, термохимические установки, насосные станции внешней перекачки нефтесборных пунктов;
- газокомпрессорные станции, компримирующие попутный нефтяной газ;
- объекты поддержания пластового давления – кустовые насосные станции, водораспределительные блоки, водозаборы, установки очистки сточных вод;
- буровые установки.

Большинство из названных выше объектов получают электроэнергию по воздушным линиям электропередачи. Главная задача электроэнергетического комплекса заключается в надежном и бесперебойном электроснабжении потребителей нефтегазопромысловых объектов, поскольку перерывы в электроснабжении обрабатываются для предприятий прямыми потерями и возможными выходами из строя добывного оборудования (см. Введение).

## **6.1 Анализ факторов производственной среды**

### **Вредные и опасные факторы**

Процесс бурения ведется пожаро- и взрывоопасным. Продуктами, определяющими взрывоопасность установки, являются попутный (природный) газ, лёгкие фракции нефти, которые могут проявляться в процессе прохождения продуктивных пластов и в смеси с кислородом воздуха образуют смеси, взрывающиеся при наличии огня или искры.

Так же многие из химических реагентов, содержащихся в буровых растворах являются горючими веществами. Наличие аппаратов, работающих при высоких давлениях и температурах и содержащих большое количество продуктов в газо- и парообразном состоянии, может создавать опасность загазованности территории. Процесс относится к вредным, для здоровья обслуживающего персонала, производством, так как связан с получением продуктов реакции и углеводородных газов, в составе которых имеется сероводород, обладающий сильными ядовитыми свойствами.

Наиболее опасные места на буровой площадке:

- буровая площадка роторного стола;
- подроторная площадка;
- насосные блоки;
- ёмкостной блок приготовления раствора;
- ёмкостной блок очистки бурового раствора;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

- площадка КТПН 6/0,4 кВ ;
- территория площадки, включающая в себя трассу прохождения грязевого шланга высокого давления до 280 бар/см<sup>2</sup>;
- парогенераторная установка.

Основными причинами, которые могут вызвать аварии на площади буровой установки, являются:

- нарушение технологического режима;
- прогар трубы в змеевике печи МНС (парогенератора);
- разрыв и неисправность оборудования, паровых линий, линии подачи раствора в скважину;
- неисправность предохранительных клапанов;
- загазованность помещений ёмкостных блоков, насосных блоков и территории установки;
- прекращение подачи водяного пара, своевременного долива бурового раствора в скважину во время СПО, отключение электроэнергии;
- нарушение правил техники безопасности обслуживающим персоналом;
- несоблюдение графиков ППР, сроков технического освидетельствования оборудования;
- отсутствие заземления и не соблюдение правил электробезопасности.

Основные вредности и опасности на установке:

- пары углеводородов нефти (ПДК – 300 мг/м<sup>3</sup>, фактически – менее 100 мг/м<sup>3</sup>);
- пары сероводорода H<sub>2</sub>S (ПДК – 3 мг/м<sup>3</sup>, фактически – менее 2 мг/м<sup>3</sup>);
- шум от работающего оборудования (норма – 80 Дб, фактически – 70...80 Дб);
- температура паровой линии и некоторого оборудования достигает более 100°C;
- некоторое оборудование и рабочие площадки находятся на высоте более 15 м от поверхности земли.

Согласно ГОСТ 12.0.003 «ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы» при выполнении работ возможны следующие опасные и вредные производственные факторы:

- движущиеся машины и механизмы;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны (Табл.6.1.1; 6.1.2; 6.1.3);

Таблица 6.1.1 - Классы условий труда по показателю температуры воздуха, °С (нижняя граница), для открытых территорий в зимний период года применительно к категории работ Iб

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ 99

Климатический регион (пояс)	Класс условий труда					
	Допустимый		Вредный			Опасный (экстремальный)
	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
IA (особый)	-3,4	-5,0	-7,9	-10,5	-14,0	-14,0
	-5,9	-8,1	-12,2	-15,3	-20,0	-20,0
IB (IV)	-15,1	-17,3	-20,5	-23,5	-27,5	-27,5
	-18,1	-21,3	-26,2	-29,8	-35,5	-35,5
II (III)	+1,4	0,0	-2,6	-5,1	-8,3	-8,3
	-0,7	-2,7	-6,3	-9,2	-13,5	-13,5
III (II)	+7,0	+5,7	+3,5	+1,2	-1,7	-1,7
	+5,3	+3,5	+0,6	-2,1	-5,9	-5,9

В числителе - температура воздуха при отсутствии регламентированных перерывов на обогрев; в знаменателе - при регламентированных перерывах на обогрев (не более чем через 2 часа пребывания на открытой территории).

Таблица 6.1.2 - Классы условий труда по показателю температуры воздуха, °С (нижняя граница), для открытых территорий в зимний период года применительно к категории работ IB

Климатический регион (пояс)	Класс условий труда					
	Допустимый		Вредный			Опасный (экстремальный)
	2	3.1	3.2	3.3	3.4	4
IA (особый)	-3,4	-5,0	-7,9	-10,5	-14,0	-14,0
	-5,9	-8,1	-12,2	-15,3	-20,0	-20,0
IB (IV)	-15,1	-17,3	-20,5	-23,5	-27,5	-27,5
	-18,1	-21,3	-26,2	-29,8	-35,5	-35,5
II (III)	+1,4	0,0	-2,6	-5,1	-8,3	-8,3
	-0,7	-2,7	-6,3	-9,2	-13,5	-13,5
III (II)	+7,0	+5,7	+3,5	+1,2	-1,7	-1,7
	+5,3	+3,5	+0,6	-2,1	-5,9	-5,9

В числителе - температура воздуха при отсутствии регламентированных перерывов на обогрев; в знаменателе - при регламентированных перерывах на обогрев (не более чем через 2 часа пребывания на открытой территории).

Таблица 6.1.3 - Класс условий труда по показателю ТНС-индекса (°С) для рабочих помещений с нагревающим микроклиматом независимо от периода года и открытых территорий в теплый период года (верхняя граница)

Категория работ*	Класс условий труда					Опасный (экстрем.)	
	Допустимый*	Вредный					
		3.1	3.2	3.3	3.4		
Ia	26,4	26,6	27,4	28,6	31,0	31,0	

### Продолжение таблицы 6.1.3

Iб	25,8	26,1	26,9	27,9	30,3	30,3
IIа	25,1	25,5	26,2	27,3	29,9	29,9
IIб	23,9	24,2	25,0	26,4	29,1	29,1
III	21,8	22,0	23,4	25,7	27,9	27,9

\* Согласно прилож.1 СанПиН 2.2.4.548-96 "Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений"

- повышенный уровень шума (Табл.6.1.4);
- повышенный уровень вибрации (Табл.6.1.4);

Таблица 6.1.4 - Классы условий труда в зависимости от уровней шума, локальной, общей вибрации, инфра- и ультразвука на рабочем месте

Название фактора, показатель, единица измерения	Класс условий труда					
	Допустимый	Вредный				Опасный
		2	3.1	3.2	3.3	
		3.4	4			
Превышение ПДУ до ...дБ/раз (включительно):						
Шум, эквивалентный уровень звука, дБА	ПДУ	5	15	25	35	35
Вибрация локальная, эквивалентный корректированный уровень (значение) выброскорости, виброускорения (дБ/раз)	ПДУ	3/1,4	6/2	9/2,8	12/4	12/4
Вибрация общая, эквивалентный корректированный уровень выброскорости, виброускорения (дБ/раз)	ПДУ	6/2	12/4	18/6	24/8	24/8
Инфразвук, общий уровень звукового давления, дБ/Лин	ПДУ	5	10	15	20	20
Ультразвук воздушный, уровни звукового давления в 1/3 октавных полосах частот, дБ	ПДУ	10	20	30	40	40
Ультразвук контактный, уровень выброскорости, дБ	ПДУ	5	10	15	20	20

В соответствии с санитарными нормами [СН 2.2.4/2.1.8.562-96](#) "Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки".

В соответствии с санитарными нормами [СН 2.2.4/2.1.8.566-96](#) "Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий".

В соответствии с санитарными нормами [СН 2.2.4/2.1.8.583-96](#) "Инфразвук на рабочих местах, в жилых и общественных помещениях и на территории жилой застройки".

В соответствии с санитарными правилами и нормами [СанПиН 2.2.4/2.1.8.582-96](#)"Гигиенические требования при работах с источниками воздушного и контактного ультразвука промышленного, медицинского и бытового назначения".

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					101

- повышенный уровень электромагнитных полей и излучений;
- расположение рабочего места на значительной высоте относительно поверхности земли;
- физические перегрузки;
- биологические (клещи, гнус и др.) (Табл.6.1.5).

Таблица 6.1.5 - Классы условий труда в зависимости от содержания в воздухе рабочей зоны биологического фактора (превышение ПДК, раз)

Биологический фактор	Класс условий труда					
	допустимый	вредный			опасный	
		2	3.1	3.2	3.3	3.4
Микроорганизмы-продуценты, препараты, содержащие живые клетки и споры микроорганизмов*	ПДК	1,1-10,0	10,1-100,0	100	-	
Патогенные микроорганизмы**	Особо опасные инфекции					+
	Возбудители других инфекционных заболеваний			+	+	

\* В соответствии с гигиеническими нормативами ГН 2.2.6.709-98 "Предельно допустимые концентрации (ПДК) микроорганизмов-продуцентов, бактериальных препаратов и их компонентов в воздухе рабочей зоны" и дополнениями к нему.

\*\* Условия труда отдельных категорий работников относят (без проведения измерений) к определенному классу в соответствии с п.5.2.3.

Для предотвращения несчастных случаев, заболеваний и отравлений, связанных с производством, в соответствии с Типовыми нормами выдачи спецодежды, спецобуви и других СИЗ электромонтер по обслуживанию буровых обеспечен:

- бельем нательным хлопчатобумажным или термостойким;
- ботинками или полусапогами кожаными летними для защиты от температур на маслобензостойкой подошве.

На наружных работах зимой дополнительно выдаются:

- костюм зимний из материала с постоянными термостойкими свойствами типа Номекс;
- подшлемник термостойкий (зимний);
- сапоги кожаные зимние для защиты от повышенных температур на

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП-140604.65 ПЗ	Лист
						102

маслобензостойкой подошве;

- рукавицами комбинированные или перчатки;
- перчатки диэлектрические;
- галоши диэлектрические;
- пояс предохранительный;
- очки защитные;
- наушники противошумные или беруши.

При выполнении работ в условиях повышенного загрязнения, не связанных с риском возникновения электрической дуги, дополнительно:

комбинезон для защиты от общих производственных загрязнений из нетканых материалов типа Тайвек.

На наружных работах, не связанных с риском возникновения электрической дуги, зимой дополнительно:

- полушубок;
- валенки на резиновой подошве;
- шапка-ушанка;
- рукавицы меховые или хлопчатобумажные утепленные.

При выполнении работ в заболоченной местности дополнительно:

- сапоги резиновые болотные;
- плащ прорезиненный.

При выполнении работ на территории природных очагов клещевого энцефалита, персонал обеспечивается костюмами комбинезонами «БИОСТОП ТЕРМОЛЮКС» для защиты от клещей и гнуса. Можно использовать защитную одежду, изготовленную из хлопчатобумажной ткани «Нефтяник».

В целях нормализации теплового состояния при выполнении работ в холодный период года температура воздуха в местах обогрева поддерживается на уровне 21–25 °C. Помещение оборудовано устройствами для обогрева кистей и стоп, температура которых в диапазоне 35–40 °C.

Во избежание переохлаждения работникам не следует во время перерывов в

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	103
					ДП-140604.65 ПЗ	

работе находиться на холода в течение более 10 мин. при температуре воздуха до -10 °C и не более 5 мин. при температуре воздуха ниже -10 °C.

В обеденный перерыв работники обеспечиваются «горячим» питанием.

Интегральный показатель условий охлаждения (обморожения) – ИПУОО определим согласно уравнению:

$$\text{ИПУОО} = 34,654 - 0,4664 \cdot tB + 0,6337 \cdot V,$$

где  $tB$  – температура воздуха, °C;  $V$  – скорость ветра, м/с.

Например, при температуре воздуха -15 °C и скорости ветра – 6 м/с интегральный показатель условий охлаждения составит:

$$\text{ИПУОО} = 34,654 - 0,4664 \cdot (-15) + 0,6337 \cdot 6 = 45,4542.$$

В соответствии с методическими рекомендациями МР 2.2.7.2129-06 при данном значении ИПУОО риск обморожения- умеренный, продолжительность безопасного пребывания на холода составляет не более 60 мин.

Работающие на открытой территории в холодный период года обеспечиваются комплектом СИЗ от холода, имеющим теплоизоляцию,

расчитанной в зависимости от ИПУОО.

Во избежание локального охлаждения тела работников и уменьшения общих теплопотерь с поверхности тела их обеспечивают рукавицами, обувью, головными уборами, имеющими также соответствующую теплоизоляцию.

## 6.2 Пожарная безопасность

Признаки аварии определяются отраслевым нормативно-техническим документом – Инструкцией по предотвращению и ликвидации аварий в электрической части энергосистем (утв. приказом Минэнерго России от 30 июня 2003 г. № 289).

План тушения пожара состоит из текстовой и графической части. В текстовой части плана указаны основные обязанности и действия дежурного персонала и других работников при возникновении пожара и его тушении. Графическая часть плана составляется согласно требованиям по разработке оперативных планов и оперативных карточек по тушению пожаров.

Допускается тушение пожаров в электроустановках, находящихся под напряжением, порошковыми (до 1 кВ или до напряжения, указанного заводом-изготовителем), углекислотными (до 10 кВ) огнетушителями, а если возникший пожар не потушен, то водой с соблюдением требований правил безопасности (в

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

диэлектрических перчатках и ботах, с заземлением пожарного ствола и насоса аварийно-спасательного и пожарного автомобиля путем присоединения их к общему контуру заземления распределительного устройства) и минимально допустимых расстояний согласно табл. 6.2.1.

Таблица 6.2.1 – Минимально допустимые расстояния от действующих электроустановок до насадок пожарных стволов

Номинальное напряжение электроустановки, кВ	Минимально допустимые расстояния от насадки пожарного ствола (при струе воды, подаваемой из пожарных стволов с диаметром спрыска 13 мм) до горячих электроустановок и кабелей, м
До 1 кВ включительно	4,0
От 1 до 10	6,0
От 10 до 35	8,0
От 35 до 110	10,0

Примечание. В период интенсивного таяния снежных масс при температуре окружающего воздуха выше 0 °С указанные расстояния необходимо увеличить на 30 %. Применение соленой и сильно загрязненной воды для тушения пожаров в электроустановках запрещается в связи с ее повышенной электропроводностью.

При возможности оседания копоти и сажи на поверхности изоляции электрооборудования, на проводах, приборах, устройствах защиты и автоматики необходимо отключить оборудование в распределительном устройстве, а в закрытых распределительных устройствах (ГРУ, КРУ, РУСН) – снять напряжение с секции шин для предотвращения их повреждения вследствие коротких замыканий.

Трансформаторное масло, разлившееся в ячейке или в коридоре распределительного устройства, следует тушить тонкораспыленной водой, порошковыми составами, песком или с использованием асBESTового полотна и полотен на основе минеральных волокон.

При пожаре в ГРУ, КРУ, КРУН и РУСН осуществляют контроль за нагревом силовых и контрольных кабелей, расположенных в помещениях под этими распределительными устройствами, и предупредить возможность их загорания.

При пожаре на пунктах (щитах) управления и на панелях с устройствами релейной защиты, автоматики и управления должны приниматься меры по уменьшению объемов повреждения устройств управления, телесигнализации, телеуправления, релейной защиты, автоматики и питающих их кабелей.

Тушение пожаров на пунктах и щитах управления при наличии на них электроустановок напряжением до 400 В включительно допускается проводить под напряжением с применением углекислотных и порошковых огнетушителей.

При необходимости используются индивидуальные средства защиты органов дыхания.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ 105

Создание и использование неснижаемого аварийного страхового запаса запасных частей, оборудования, изделий и материалов производятся в соответствии с нормами НР 34-00-092-86.

### 6.3 Электробезопасность

В состав секции гидроочистки дизельного топлива входят как низковольтные, так и высоковольтные электроприёмники, с напряжением питания 380 и 6000 В соответственно.

Электроустановки напряжением до 1 кВ имеют глухозаземлённую нейтраль, выше 1 кВ – изолированную.

Электрооборудование эксплуатируется как на открытых площадках, так и в помещениях с большой влажностью и повышенной температурой воздуха, загрязненного газами, парами и аэровзвесями веществ, разрушающими изоляцию и токоведущие части оборудования.

Электрический ток не имеет запаха, цвета и бесшумен. Неспособность организма человека обнаруживать его до начала действия приводит к тому, что работающие часто не осознают реально имеющиеся опасности и не принимают своевременно необходимых защитных мер. Статистические данные по электротравматизму показывают, что поражение электрическим током по сравнению с другими видами травматизма невелико, но они носят более тяжелый характер. Основа организации безопасной эксплуатации электрооборудования – высокая техническая грамотность обслуживающего персонала.

При нарушении правил технической эксплуатации электрооборудования и правил безопасности, электрический ток может стать причиной травмы.

Основные причины поражения электрическим током:

- неисправность электрооборудования, проводов и пусковых устройств;
- отсутствие или неудовлетворительное состояние защитных устройств (заземление, зануление);
- отсутствие или неприменение средств индивидуальной защиты;
- несоответствие применяемого оборудования условиям производства.

При воздействии электрического тока происходит нарушение основных физиологических функций организма – дыхания, работы сердца, кровообращения, обмена веществ и т.д.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП-140604.65 ПЗ	Лист 106

Для защиты работающих от поражения электрическим током используют следующие защитные меры:

Технические способы:

- защитное заземление;
- зануление;
- выравнивание потенциалов;
- малое напряжение;
- электрическое разделение сетей;
- защитное отключение;
- изоляция токоведущих частей (рабочая, дополнительная, усиленная, двойная);
- предупредительная сигнализация, блокировка, знаки безопасности.

Электрозащитные средства:

- изолирующие штанги (оперативные, для наложения заземления, измерительные), изолирующие клещи (для операций с предохранителями) и электроизмерительные указатели напряжения, указатели для фазировки и т.д.;
- изолирующие устройства и приспособления для ремонтных работ под напряжением выше 1000 В и слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками для работы в электроустановках напряжением до 1000 В;
- диэлектрические перчатки, боты, галоши, ковры, изолирующие накладки и подставки;
- индивидуальные экранирующие комплекты;
- переносные заземления;
- ограждающие устройства и диэлектрические колпаки;
- плакаты и знаки безопасности.

Назначение защитного заземления – устранение опасности поражения людей электрическим током при появлении напряжения на конструктивных частях оборудования (расчёт заземления см. в части “Электроснабжение”). Причины

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	107
					ДП-140604.65 ПЗ	

действия защитного заземления – снижение до безопасных значений напряжений прикосновений и шага, обусловленных «замыканием на корпус». Контроль и профилактика повреждений изоляции относится к защитным мерам. В порядке профилактики необходимо контролировать состояние сопротивления изоляции проводов относительно земли и друг друга. Более надежной мерой защиты является двойная изоляция.

Сопротивление утечки тока в любой точке оборудования при самых неблагоприятных условиях не превышает 10 Ом.

Оборудование, аппараты, трубопроводы, связанные с приемом и перемещением жидкостей, сыпучих веществ при приеме и выгрузке катализаторов, являющихся источником возникновения статического электричества, защищены в соответствии с требованиями действующих правил защиты от статического электричества в производствах химической и нефтехимической промышленности. Под статическим электричеством принято понимать электрические заряды, находящиеся в состоянии относительного покоя, распределенные на поверхности или в объеме диэлектрика, на поверхности изолированного проводника. Перемещение зарядов статического электричества в пространстве обычно происходит вместе с наэлектризованными телами.

Физиологическое воздействие статического электричества на организм человека может проявляться в форме малого тока, длительно протекающего через тело человека; кратковременного электрического заряда, а также электрического поля, действующего на организм человека. Вызываемые статическим электричеством неприятные ощущения могут явиться причинами развития неврастении, головной боли, плохого сна, раздражительности, неприятных ощущений в области сердца и т.д.

Установлено, что находящийся под потенциалом организма более плотно усваивает газы и пары различных веществ.

Для отвода статического электричества, накапливающегося на людях, особенно при выполнении ручных операций (промывка, чистка) необходимо:

- обеспечить работающих в этих помещениях токоотводящей обувью;
- не допускать применения одежды из синтетических материалов.

Разряды атмосферного электричества способны вызвать взрывы, загорания и разрушения наземных объектов, поэтому необходимо принимать специальные меры защиты от молний. Сооружения предприятий нефтепродуктообеспечения должны быть защищены от прямых ударов молний, ее вторичных проявлений. При

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	108
					ДП-140604.65 ПЗ	

эксплуатации устройств молниезащиты должно осуществляться систематическое наблюдение за их состоянием.

Задача зданий, сооружений и технологического оборудования от прямых ударов молнии выполнена в соответствии со всеми современными нормами и требованиями. По устройству молниезащиты объекты установки в основном относятся ко II категории.

Характер воздействия переменного тока промышленной частоты на организм человека рассмотрен в приложении в виде слайда (обозначение слайда ДП.1804.98.908.09.БЖД).

## 7 Экономическая часть

### 7.1 Экономическая характеристика месторождения

Ямalo-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) часто называют газовым сердцем России. Здесь сосредоточено 70% ее доказанных запасов природного газа и 18% нефти и газового конденсата. В автономном округе открыты 232 месторождения углеродного сырья, из которых только 63 находятся в промышленной разработке, а 19 подготовлены к эксплуатации. На 150 месторождениях ведутся геологоразведочные работы.

Ресурсная база огромна — начальные суммарные ресурсы природного газа в автономном округе оцениваются в 125,3 трлн кубометров, из которых на сегодня добыто 14 трлн. Это, конечно, само по себе много, но за 40 лет с начала промышленной разработки Тазовского месторождения из недр Ямала было извлечено немногим более 11% общей оценки ресурсной базы округа и около 30% запасов газа промышленных категорий, которыми он располагает.

По результатам геологоразведки на территории округа в текущем году поставлено на баланс два новых нефтяных месторождения — Северо-Романское и Северо-Няртольское, а также 19 новых залежей.

«Первооткрывательницей» Северо-Романовского месторождения стала скважина №79 (Северо-Романовский лицензионный участок, ПАО «Газпромнефть – Ноябрьскнефтегаз»

На Северо-Няртольском месторождении стала продуктивной скважина №115 (Восточно-Ярайнерский лицензионный участок, ООО «НГП Восточно-Ярайнерское»). Приток нефти здесь получен при испытании юрского пласта.

Кроме того, на ранее открытых месторождениях по результатам геологоразведочных работ были открыты еще 11 новых залежей нефти, газа и газоконденсата (оперативного подсчёта запасов по ним пока нет).

Прирост запасов по категории С1 в счёт «разведки» составил – 242,611 млн. тн у.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	ДП-140604.65 ПЗ	109

т., в том числе по нефти – 28,639 млн. тн, конденсата - 6,201 млн. тн, газа – 207,771 млрд. м<sup>3</sup>.

Прирост запасов по категории С1 по графе «переоценка» составил 349,871 млн. тн у. т.: нефти - 4,808 млн. тн, конденсата - 12,979 млн. тн, газа - 341,700 млрд. м<sup>3</sup>.

Геологоразведочные работы на территории Ямала в этом году проводили 32 предприятия на 83 лицензионных участках.

В 2015 году фактические затраты по статьям на добычу нефти определялись расчетно исходя из статей затрат цеха добычи нефти.

Эксплуатационные затраты распределялись следующим образом:

1. Статьи затрат, зависящие от объемов добычи нефти по месторождениям: вспомогательные материалы, топливо, пар, вода, сбор и транспорт нефти, подготовка нефти, услуги цехов.

2. Статья, зависящая от объема механизированной (ЭЦН, ШГН) добычи нефти: электроэнергия.

3. Заработка плата и отчисления на соц.страх.

4. Амортизация основных фондов по месторождениям.

5. Транспортные расходы по месторождениям.

6. Затраты по ПРС и КРС.

7. Затраты по прокату ЭПУ по месторождениям.

8. Закачка воды по месторождениям.

В общей сумме затрат наибольший удельный вес составляет:

Амортизация основных фондов 21,08 %

Затраты на подземный ремонт скважин 6,8 %

Затраты на капитальный ремонт скважин 6,84 %

Затраты на электроэнергию 9,0 %

Затраты на закачку воды 16,23 %

Себестоимость 1 тонны нефти составляет 1416,84 руб. (таблица 1).

Таблица 1 – Затраты на добычу нефти

Статьи затрат	Итого по Ваху				
Вспомогательные материалы	4307880,00	5613190,00	2881570,00	50870,00	12853510,00
топливо	830,00	1150,00	-	30,00	2010,00
Услуги ООО «Энергонефть» электроэнергия	108947010,00	150512120,00	65690270,00	1200530,00	326349920,00
Заработка плата и отчисления соц.страх.	15096430,00	19552550,00	13933040,00	648050,00	49230070,00
Амортизация основных фондов	265795410,00	340511000,00	142937590,00	14884920,00	764128930,00
Транспортные расходы	12930650,00	16567010,00	7747000,00	828670,00	38073340,00
Услуг ООО «ЭПУ»	38353170,00	50581960,00	21062050,00	-	109997170,00
Услуги ООО «Энергонефть» пар,вода	662370,00	886100,00	930320,00	6680,00	2485470,00

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ДП-140604.65 ПЗ

Лист

110

## Продолжение таблицы 1

Закачка воды	259765130,00	228178020,00	89794020,00	10306380,00	588583540,00
Подготовка нефти	31062440,00	41282680,00	17218070,00	328700,00	89891890,00
Сбор и транспортировка нефти	13408050,00	17741580,00	7413620,00	146360,00	38709610,00
Услуги ООО «ПРС»	109991150,00	81591360,00	47266690,00	7892430,00	246741620,00
Услуги цехов	1619550,00	2174050,00	857320,00	14800,00	4665720,00
Услуги ООО «ПРС»	77069160,00	92950780,00	70739030,00	7334420,00	248093380,00
Общепроизводственные расходы	382441050,00	507577770,00	211824050,00	4086870,00	1105929750,00
Итого затрат с амортизацией	1321450290,00	1556261310,00	700294650,00	47729690,00	3625735930,00
Итого затрат без амортизации	1055654880,00	1215750310,00	557357050,00	32844770,00	2861607000,00
Добыча нефти (тыс.тн.)	697,90	929,00	387,20	7,30	2021,00
Мех.добыча (тыс.тн.)	670,12	927,01	382,84	7,30	1987,00
Закачка воды (млн.м <sup>3</sup> )	2486,00	1183,00	857,00	98,00	5624,00
Себестоимость 1тн.нефти с аморт.(руб.)	1512,62	1308,67	1439,46	4499,28	1415,94
Себестоимость 1тн.нефти без аморт.(руб.)	1131,77	942,13	1070,30	2460,25	1037,84
Скв.-мест числившиеся	1893,50	2423,70	1016,40	103,70	5437,00
ЭЦН (среднедействующий)	44,00	58,00	20,00	-	122,00
Кол-во ПРС	520,00	388,00	224,00	37,00	1169,00
Среднедействующий фонд	156,00	199,00	84,00	9,00	448,00
Кол-во КРС (в том числе ГРП)	23,00	27,00	19,00	2,00	71,00
Численность	19,00	25,00	22,00	1,00	67,00

## 7.2 Анализ мероприятий по снижению себестоимости 1 тонны добычи нефти путем проведения закупочных процедур

В настоящее время, основной экономической задачей при разработке месторождения является снижение себестоимости добычи 1 тонны нефти. Управление затратами в добывче нефти включает анализ затрат, экономико-математическое моделирование себестоимости добычи нефти и научный поиск резервов снижения себестоимости продукции.

В промысловой себестоимости добычи нефти большим удельным весом характеризуются условно-постоянные затраты - амортизация скважин и прочих основных средств, цеховые и общепромысловые расходы, заработка плата, затраты на освоение и подготовку производства, на содержание и эксплуатацию оборудования и др. Эта особенность структуры позволяет снижать себестоимость главным образом за счет роста объемов добычи нефти и газа.

Структура себестоимости нефти и газа по районам имеет большие различия, связанные с природно-географическими особенностями. К ним относятся месторасположение, рельеф местности, климат, характер почвы и растительности, водные и энергетические ресурсы, ресурсы строительных материалов. В сложных экономико-географических условиях применяют кустовое наклонно-направленное бурение, что снижает затраты на подготовительные и вышкомонтажные работы.

Глубина скважин - один из ведущих факторов экономики разработки. С увеличением глубины скважин возрастают капитальные вложения в бурение скважин и их оборудование для эксплуатации, что отражается на амортизации скважин и прочих основных средств. Эксплуатация глубоких скважин отличается также повышенными затратами на оплату труда, энергию, текущий ремонт основных средств и по увеличению отдачи пластов.

Существенно влияют на технику и организацию работ, а, следовательно, и на себестоимость добычи нефти поступление из пласта в ствол скважины вместе с нефтью и газом значительного количества песка, отложения парафина, корродирующие свойства среды в скважинах, расположение нефтяных месторождений в море.

Работы по ликвидации песчаных пробок ведут к простоям скважин, снижению добычи нефти и требуют значительных затрат. Добыча парафинистой нефти требует специальных издержек, связанных с борьбой с отложениями парафина в подъемных трубах, выкидных манифольдах, трапах, промысловых нефтепроводах и на забоях скважин.

На экономику добычи нефти влияет также коррозия пластовой водой насосно-компрессорных труб, насосных штанг, глубинных насосов, нефтепроводных труб и др.

Производительность нефтяных пластов и скважин - один из главных факторов, определяющих уровень себестоимости и другие экономические показатели. Она зависит от комплекса природных условий и от уровня техники и технологии нефтедобычи. На увеличение дебитов скважин особенно влияют применение методов воздействия на пластины, а также интенсификация добычи нефти путем воздействия на призабойную зону скважин.

Стадия разработки нефтяных залежей - один из определяющих факторов ее экономики. Разработка нефтяных месторождений представляет собой сложный производственный процесс, протекающий в течение длительного периода при изменении условий эксплуатации и ухудшении всех показателей нефтедобычи.

Главные пути снижения себестоимости добычи нефти и газа - технический прогресс, совершенствование организации производства и труда, повышение надежности геологоразведки, долговечности скважин и нефтепромыслового оборудования.

Одним из важных направлений снижения себестоимости добычи нефти и

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	ДП-140604.65 ПЗ	112

газа является сокращение затрат на материалы, топливо, энергию и приобретаемые услуги. Сокращение затрат на материалы, в частности, достигается расширением и совершенствованием искусственного воздействия на нефтяные пласты с целью повышения их нефтеотдачи.

Сокращение затрат на приобретаемые услуги достигается путем проведения закупочных процедур. Основным фактором, определяющим стоимость услуг, является расчет начальной максимальной цены по Лоту.

В Методических указаниях описаны механизмы и порядок расчета начальной (максимальной) цены договора (цены лота) для размещения заказов путем проведения закупок на поставку товаров, выполнение работ, оказание услуг.

Начальная (максимальная) цена договора (лота) указывается при проведении открытых закупок в извещениях о закупке и в соответствующей документации, а при проведении закрытых закупок - в приглашениях, рассылаемых потенциальным участникам закупок и в документации.

Расчет ориентировочной цены продукции должен осуществляться заказчиком в процессе определения потребности в товарах, работах, услугах при составлении РПЗ.

Более точный расчет начальной (максимальной) цены договора (цены лота) должен производиться при подготовке технических требований, спецификаций и технических заданий на поставку товаров, выполнение работ, оказание услуг, являющихся предметом договора, и подготовке соответствующей документации о закупке.

Расчет начальной (максимальной) цены договора (цены лота) может производиться при необходимости с привлечением экспертов в области предмета договора и ценообразования, а также компаний, занимающихся осмечиванием, специализированных организаций, маркетинговых и ценовых фирм.

Расчет начальной (максимальной) цены договора (цены лота) производится на основании ценовой информации. В качестве источников ценовой информации могут использоваться:

- цены заключенных сделок (договоров, соглашений, счетов-фактур) как уже выполненных, так и действующих, получаемых из текстов договоров, реестров договоров или из других источников, вызывающих доверие;

- прейскурантные, или каталожные, цены - цены производителей, поставщиков, подрядчиков, исполнителей, публикуемые ими в печатном виде или в Интернете в собственных или сборных прейскурантах, каталогах, бюллетенях;

- оферентные цены - цены не выигравших участников закупки, содержащиеся в протоколах проведения закупок;

- справочные цены на товары, работы, услуги, публикуемые в следующих изданиях: российских и зарубежных информационно-справочных изданиях (бюллетенях) о ценах на товары, работы, услуги, выпускаемых в печатной и электронной форме или размещаемых в сети Интернет; специализированных

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	ДП-140604.65 ПЗ	113

журналах, статистических и аналитических обзорах, других печатных и интернет-изданиях;

- базисные цены - данные, содержащиеся в отраслевых нормативных справочниках;

- утвержденные тарифы, цены или предельные цены - цены на продукцию, для которой производится государственное регулирование цен и тарифов (постановления, приказы, иные нормативные правовые акты органов государственной власти, уполномоченных на осуществление государственного регулирования цен в соответствующей сфере);

- статистические внешнеторговые цены.

Точность получаемых расчетов начальной (максимальной) цены зависит от достоверности используемых конъюнктурных данных. По приоритетности для использования в расчетах рекомендуется следующая последовательность источников информации:

- контрактные, биржевые;
- прейскурантные, котировочные и оферентные;
- справочные и базисные;
- внешнеторговые и прочие цены спотовых сделок.

Рыночный уровень цен формируют цены фактических сделок (договоров). При этом цены сделок на одни и те же товары могут различаться в зависимости от условий совершения сделок:

- установленные в экспортных и импортных операциях;
- в условиях оплаты наличными;
- формирующиеся в рамках обычных коммерческих сделок;
- получаемые по результатам размещения заказов на закупку;
- получаемые по результатам аукционов на продажу.

Ниже перечислены особенности цен разных видов, которые могут использоваться в качестве исходных данных для расчетов.

Контрактная цена - это конкретная цена фактической сделки, которая зафиксирована в контракте (договоре, соглашении и т. п.) и свидетельствует о взаимном согласии продавца и покупателя по всем условиям договора. Контрактная цена действительна на весь период действия контракта (договора, соглашения), если ее не подвергли пересмотру в ходе выполнения договора. Усредненная по нескольким сделкам контрактная цена является самым точным определением рыночного уровня цен.

Контрактные цены, являясь ценами конкретных сделок, могут нести в себе дополнительные наценки, поправки, скидки, транспортные составляющие и другие корректировки.

Биржевая цена - это тоже цена фактической сделки, но заключенной по результатам торгов на товарных биржах. К биржевым товарам относятся в основном сырье и полуфабрикаты. Цены на бирьевые товары оперативно

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ДП-140604.65 ПЗ	Лист 114

отражают изменения, происходящие на рынке данного товара. Биржевые цены регистрируются и публикуются в специальных бюллетенях. Для использования биржевых цен в расчетах следует учитывать уровень ценовых трендов биржи.

Оферентные, или прейскурантные, цены отражают уровень цен продавца, по которым продавец желает продать (это не означает, что покупатель готов по этим ценам купить). Котировочные цены являются желаемыми ценами продавца и могут характеризовать цену покупки единичного экземпляра на условиях продавца, в которую заложены возможные скидки на у торгование и оптовые поставки.

Справочные, или базисные, цены – это цены, формируемые специализированными организациями (частными коммерческими и некоммерческими компаниями, государственными и муниципальными учреждениями) на основе анализа конъюнктуры рынка путем системного сбора и обработки ценовой информации. Обычно они публикуются в справочных изданиях или в сети Интернет и периодически обновляются. Некоторые справочники не обновляют цены, а публикуют индексы на определенную дату к ранее опубликованным ценам, показывающие тенденции изменения цены. Круг товаров, попадающих в ценовые справочники, в основном охватывает небиржевые товары. Как правило, справочные цены несколько отстают от рынка, что связано с затратами времени на обработку ценовой информации и последующую публикацию. Однако справочные цены довольно точно отражают динамику цен на данном рынке и тенденции.

Определение начальной (максимальной) цены договора (цены лота) рекомендуется проводить с использованием одного или нескольких методов:

- рыночного;
- по аналогам;
- ресурсного (сметного);
- по удельным показателям с использованием шкалирования (параметрический метод).

Довольно часто на практике применяются производные или смешанные методы на основе указанных.

Рыночный метод определения начальной (максимальной) цены договора (цены лота) предполагает анализ конъюнктуры рынка на наличие предложений, спроса или сделок по конкретной продукции с определенными параметрами, которую собирается закупить заказчик. В целях расчета собирается и обобщается информация о ценах на конкретную продукцию. На основе найденных данных путем вычисления средневзвешенной величины и применения различных корректировок на условия конкретных сделок вычисляется ориентировочный уровень чистой цены на продукцию, которая затем приводится к условиям предполагаемого к заключению договора.

Одним из разновидностей рыночного является метод определения начальной (максимальной) цены договора (цены лота) по аналогам. Этот способ используют,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист	115
					ДП-140604.65 ПЗ	

когда предполагаемый к закупке предмет договора не представлен на рынке или невозможно найти конъюнктурные данные о его рыночных ценах, но присутствует похожая продукция, имеющая небольшие отличия в функциональных и качественных характеристиках. В этом случае так же, как и при рыночном способе определения цены, проводится исследование и анализ рынка на наличие цен предложений, спроса или фактических сделок на аналогичную или схожую продукцию, которые затем путем применения поправок на различие в характеристиках и дополнительных свойствах приводятся к требованиям по закупаемой продукции.

Ресурсный, или затратный, метод, определения начальной (максимальной) цены договора (цены лота) применяется в основном в строительстве, а также при расчетах цен на сложное комплектное оборудование или на комплексные работы, услуги. В общем понимании цена предмета закупки составляется путем набора и сложения (калькуляции) цен его составляющих (работ, товаров, оборудования, стоимости машин и механизмов) с учетом их объемов. Для товара суммируются затраты материалов и запчастей, а также трудозатраты по его производству (сборке). Для оценки работ и услуг составляются списки узкоспециализированных задач, определяется нормативное или оценочное время на их исполнение, которое умножается на среднюю цену рабочей силы. Полученные трудозатраты суммируются с сопутствующими оценочными затратами на используемые при выполнении работ, оказании услуг товары, расходные материалы, машины и механизмы (ПСД).

Данный способ самый трудоемкий, но наиболее точный.

У каждого из указанных способов расчета цены есть недостатки и погрешности, поэтому в целях более точного определения начальной (максимальной) цены рекомендуется проверять результаты, полученные одним способом, расчетом другим способом. Если результаты расчетов разными методами различаются в пределах 3-5%, то можно утверждать, что оценка верна.

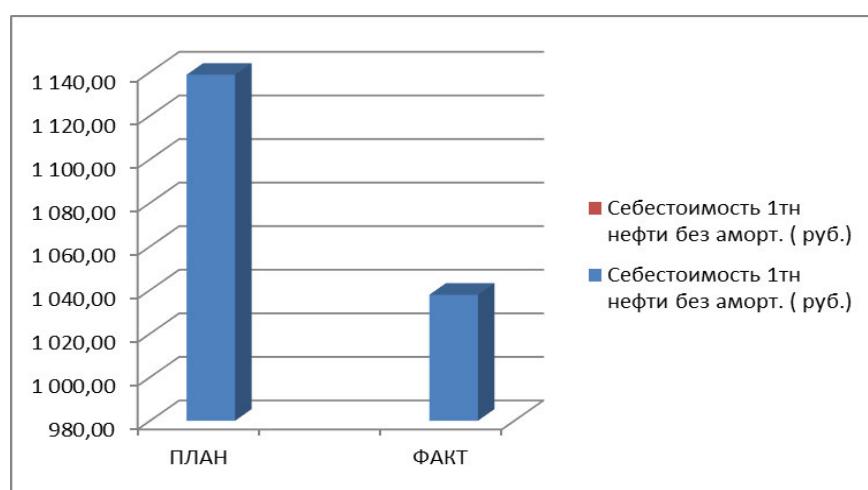


Рисунок 7.2.1

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ

В таблице приведены данные по экономии себестоимости добычи 1 тонны нефти за период.

Таблица 2 – Анализ экономии себестоимости 1 тонны нефти путем проведения закупочных процедур

Статьи затрат	план	факт	отклонение	
			Руб.	%
Вспомогательные материалы	14781536,50	12853510,00	1928026,50	13,04
топливо	2010,00	2010,00	-	-
Услуги ООО «Энергонефть» электроэнергия	326349920,00	326349920,00	-	-
Заработка плата и отчисл.соц.страх.	49230070,00	49230070,00	-	-
Амортизация основных фондов	764128930,00	764128930,00	-	-
Транспортные расходы	45688008,00	38073340,00	7614668,00	16,67
Услуги ООО «ЭПУ»	131996604,00	109997170,00	21999434,00	16,67
Услуги ООО «Энергонефть» пар,вода	2734017,00	2485470,00	2485470,00	9,09
Закачка воды	588583540,00	588583540,00	-	-
Подготовка нефти	89891890,00	89891890,00	-	-
Сбор и транспортировка нефти	38709610,00	38709610,00	-	-
Услуги ООО «ПРС»	308427025,00	246741620,00	61685405,00	20,00
Общепроизводственные расходы	1216522725,00	1105929750,00	110592975,00	9,09
Итого затрат с амортизацией:	3829804985,50	3625735930,00	204069055,50	5,33
Итого затрат без амортизации:	3065676055,50	2861607000,00	204069055,50	6,66
Добыча нефти (тыс.тн.)	2021,00	2021,00	-	-
Мех.добыча (тыс.тн.)	1987,00	1987,00	-	-
Закачка воды (млн.м <sup>3</sup> )	5624,00	5624,00	-	-
Себестоимость 1т нефти с аморт. (руб.)	1516,91	1415,94	100,97	6,66
Себестоимость 1т нефти без аморт. (руб.)	1138,82	1037,84	100,97	8,87

При проведении Закупочных процедур снижение фактической себестоимости от плановой себестоимости по году составило 204 069 055,50 руб., или 6,66%.

Экономия была достигнута по статьям затрат транспортные расходы, услуги ООО «ЭПУ», услуги ООО «Энергонефть», услуги ООО «ПРС», по общепроизводственным расходам.

## **Заключение**

В ходе работы над дипломным проектом была спроектирована и рассчитана система управления двигателем буровой установки по системе ПЧ-АД. По заданным значениям был произведен расчет и построена технограмма движения.

Следующим этапом в работе была проведена проверка расчетного двигателя по условию нагрева и перегрузочную способность.

Далее были построены функциональная и структурная схемы, с помощью которых были рассчитаны параметры для построения математической модели в среде MatLab.

Исследование, проведенное в проекте полученной виртуальной модели, позволило изучить динамические и статические характеристики системы управления электропривода постоянного тока по системе ПЧ-АД под нагрузкой и при холостом ходе.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

*ДП-140604.65 ПЗ*

*Лист*

*118*

## **Список использованных источников**

- 1) Асинхронные двигатели серии 4А. Справочник. А. Э. Кравчик, 1982г. - 504с.
- 2) Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. - Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. - 392 с., ил.
- 3) Спиваковский А. О., Дьячков В.К. Транспортирующие машины: Учеб. пособие для машиностроительных вузов.- 3-е изд.- М.: Машиностроение, 1983.- 487с.
- 4) Иванов И.И., Равдоник В.С. Электротехника: Учебник для вузов. - М.: Высшая школа, 1984. - 375 с.
- 5) Чурюкин В.А., Яшков Ю.К. Обозначение конструкторской документации: Ученое пособие. - Челябинск: ЧГТУ, 1986. - 61 с.
- 6) Зенков Р. Л., Ивашков И. И., Колобов Л. Н. Машины непрерывного транспорта. - 2 -е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1987. - 432 с.: ил.
- 7) Рудаков В. В. и др. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. В. В. Рудаков, И. М. Столяров, В. А. Дартау. - Л. Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987, - 136 с.
- 8) Чулков Н.Н. Расчет приводов карьерных машин. - М.: Недра. 1987. - 196с.
- 9) Копылов И. П., Клокова Б. К. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Т. 1 и 2.-М.: Энергоатомиздат, 1988.-456 с:
- 10) Соловьев Л.И., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 224 с.
- 11) Токарев Б.Ф. Электрические машины: Учебник для техникумов - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 672 с.
- 12) И.П. Копылов. Проектирование электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1993г. - 454с.
- 13) Электродвигатели и электрооборудование. Каталог. Ч1 - М.: ИКФ «Каталог», 1994.
- 14) Электродвигатели и электрооборудование. Каталог. Ч3 - М.: ИКФ «Каталог», 1996.
- 15) Мошинский Ю.А. и др., "Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным". Ж.: "Электричество" в №4/98. 1998, стр. 38-42.
- 16) Гольдберг О.Д. Гурин Я.С. Проектирование электрических машин. - 2-е изд. перераб и доп. - М.: Высшая школа. - 2001.
- 17) Ефимченко С.И., Учебное пособие: Расчеты ресурса несущих элементов буровых установок, Москва 2001г.
- 18) Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. - 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 2001г. - 704с.
- 19) Заякин С. Частотный преобразователь в системах водоснабжения: Электротехническое оборудование //Оборудование: Рынок, предложение, цены. - 2005. - №1. - 140 с.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Лист
					ДП-140604.65 ПЗ 119

- 20) Кимкетов М. Устройство защиты электродвигателя от перегрузки без оперативного питания //Главный энергетик. - 2005. - № 11. - 115 с.
- 21) Полузадов В.Н., Дружинин А.В., Проектирование трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. - 202с.
- 22) Полузадов В.Н. Электрические машины. Часть 3. Асинхронные машины: Конспект лекций. 2-е издание, исправленное и дополненное. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. - 87 с.
- 23) Алексеев В.В., А471. Электрические машины. Моделирование электрических машин приводов горного оборудования: Учеб. пособие / В.В. Алексеев, А.Е. Козярук, Э.А. Загривный. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет). СПб, 2006. - 58 с.
- 24) Александров К.К. Электротехнические чертежи и схемы/ К.К. Александров, Е.Г. Кузьмина. - 3-е изд., стереот. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 300с., ил.
- 25) Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. 3-е изд., испр. М. : Издательский центр «Академия», 2007. - 576 с.
- 26) Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П. Проектирование электрических машин: Учебное пособие для вузов - 3-е изд. перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2007. - 757 с.
- 27) Копылов И.П. Электрические машины: Учеб. для вузов. - 2-е изд., перераб. - М.: Высш. шк.; Логос; 2008. - 607 с.
- 28) Москаленко В.В.Справочник электромонтера 2008 г., 2-е изд., 288 стр.
- 29) Терехов В.М. Системы управления электроприводов: учебник для студ. вузов/ В.М. Терехов, О.И. Осипов; под ред. В.М. Терехова. - 3-е изд., стер. - М.: Издательский центр "Академия", 2008. - 304с.
- 30) Конспект лекций: Автоматизированный электропривод. УГГУ. Елисеев В.В. 2009г. - 80с.
- 31) Юшков И.Р., Хижняк Г.П., Илюшин П.Ю. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, изд. Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2013. - 219с.
- 32) Электропривод переменного тока с управляемым преобразователем частоты - современное состояние. Карякин А.Л. УГГУ - 7
- 33) Z8 Encore! MC<sup>TM</sup>Family, "Vector Control Development Kit". User Manual. UM021402-0407. 2007 by ZiLOG, Inc. All rights reserved. www.zilog.com

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ДП-140604.65 ПЗ

Лист  
120