

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

«24» марта 2016 г

## 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

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

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











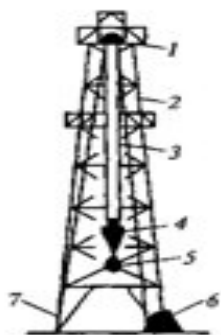


Рис. 2.2. Спускоподъемное оборудование буровой установки;

1 — кранблок; 2 — вышка;  
3 — талевый канат; 4 — талевый блок; 5 — крюк; 6 — буровая лебедка; 7 — неподвижный 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 привышечных 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

										Лист
										8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

редукторного и насосного сараев в зависимости от конкретных условий обшиваются досками, гофрированным железом, камышитовыми щитами, резиноканьями или полиэтиленовой плёнкой. Использование некоторых буровых установок требует 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

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].

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

К ним относятся:

1) при подъеме:

- 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;

										Лист
										10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

ДП-140604.65 ПЗ

- 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 (машинные, 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 неразъемным 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 перекачиваются ролики плашек.

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







### 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  $n = 985$  мин<sup>-1</sup> обеспечивает движение буровой колонны со скоростью  $V = 3,15$  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 маслоуказательный щуп 6, а в другой маслозаливная пробка 7. На выходном (тихоходном) валу редуктора через шпонку посажена ступица зубчатой муфты 5 промежуточного вала [3].

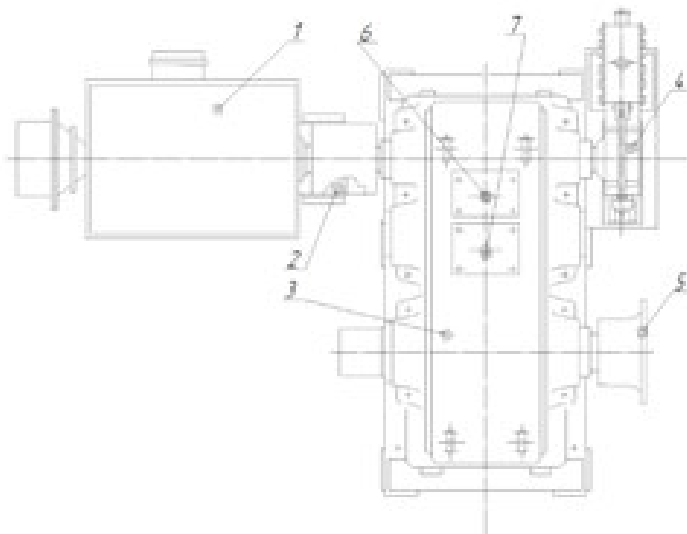


Рисунок 1.3.1 - Привод буровой установки

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

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





















высот оси вращения обмотка статора выполнена из круглого провода и пазы статора полузакрытые. При  $h = 280...355$  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 подъема подзема буровой колонны, м  $H_{prod} = 0$
2. Угол подъема, град.  $\beta = 0$
3. Производительность, т/час  $Q = 1500$
4. Скорость движения колонны, м/с  $v = 3,15$
5. Вес вращающихся частей роlikоопоры верхней ветви, кг  $G_B = 44$
6. Вес вращающихся частей роlikоопоры нижней ветви, кг  $G_H = 21$
7. Шаг установки роlikов на верхней ветви, м  $LPB = 1,25$
8. Шаг установки роlikов на нижней ветви, м  $LPH = 2,5$
9. Коэффициент учёта дополнительных сопротивлений  $K_D = 1,05$
10. Коэффициент сопротивления движению по роlikоопорам  $CCOP = 0,032$
11. Мощность на первом барабане, кВт  $N_1 = 250$
12. Мощность на втором барабане, кВт  $N_2 = 500$
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 динамичности  $K_D = 0,85$
18. Кратность пускового момента  $K_P = 1,4$
19. Коэффициент угла установки  $K_1 = 1,1$
20. Коэффициент снижения производительности  $K_\beta = 0,85$

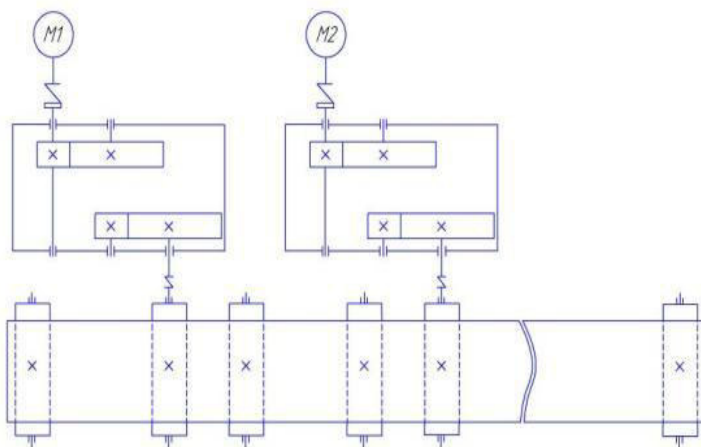


Рисунок 3.1.1 - Кинематическая схема





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









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

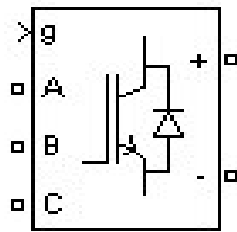


Рисунок 3.4.1 - Блок The Universal Bridge

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.

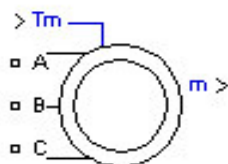


Рисунок 3.4.2 - Machine

Machine - модель асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Из этих блоков собираем модель управления двигателем:

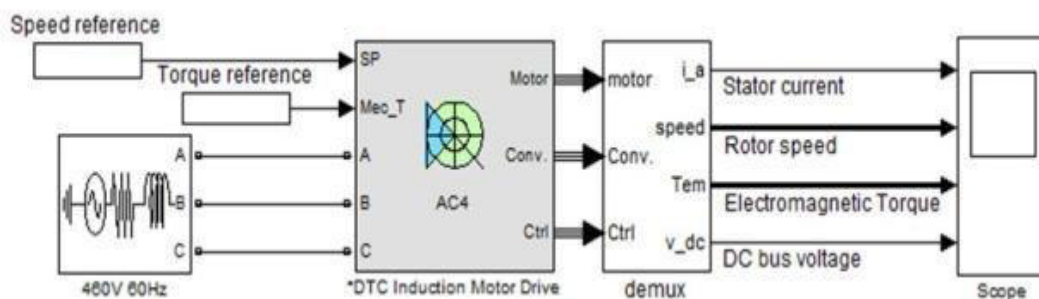


Рисунок 3.4.3 – Модель управления двигателем



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:

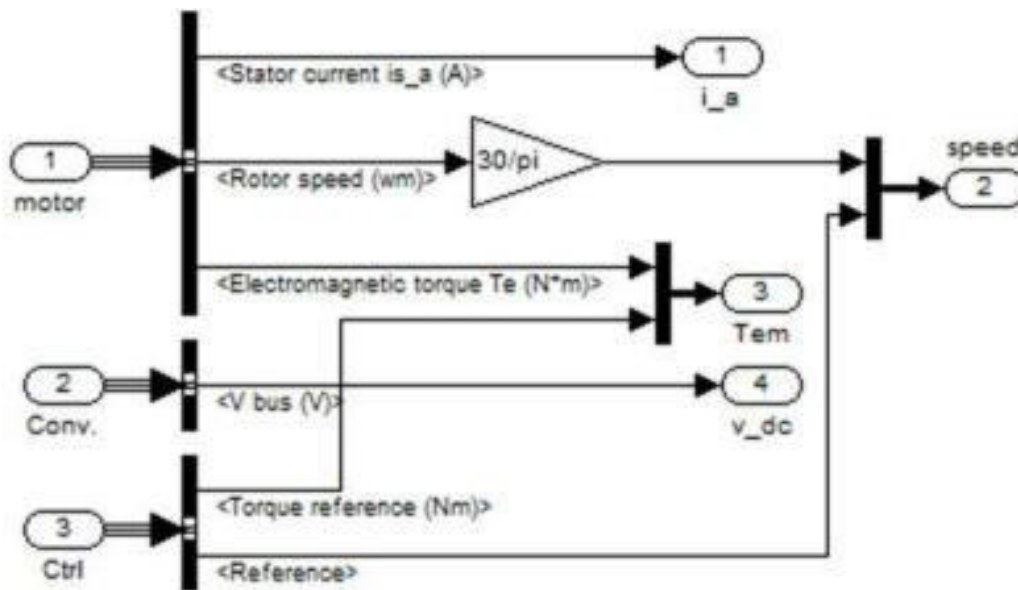


Рисунок 3.4.6 - Субсистема Demux

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

ПИД-регулятор - пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор. ПИД-регулятор состоит соответственно из пропорционального (Кп), интегрального (Ки/s) и дифференциального (Кдс) звена, у каждого из них свой коэффициент усиления.

В результате моделирования получаем следующие характеристики системы

ПЧ-АД:

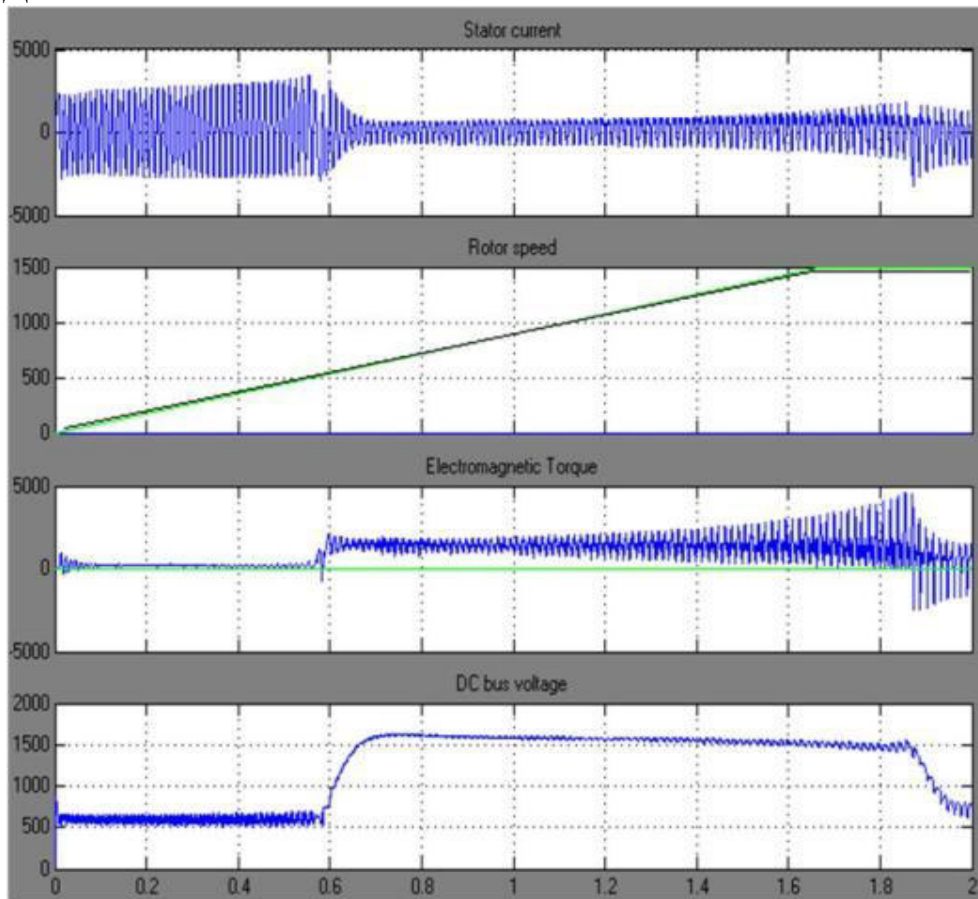


Рисунок 3.4.7 - Характеристики системы ПЧ-АД

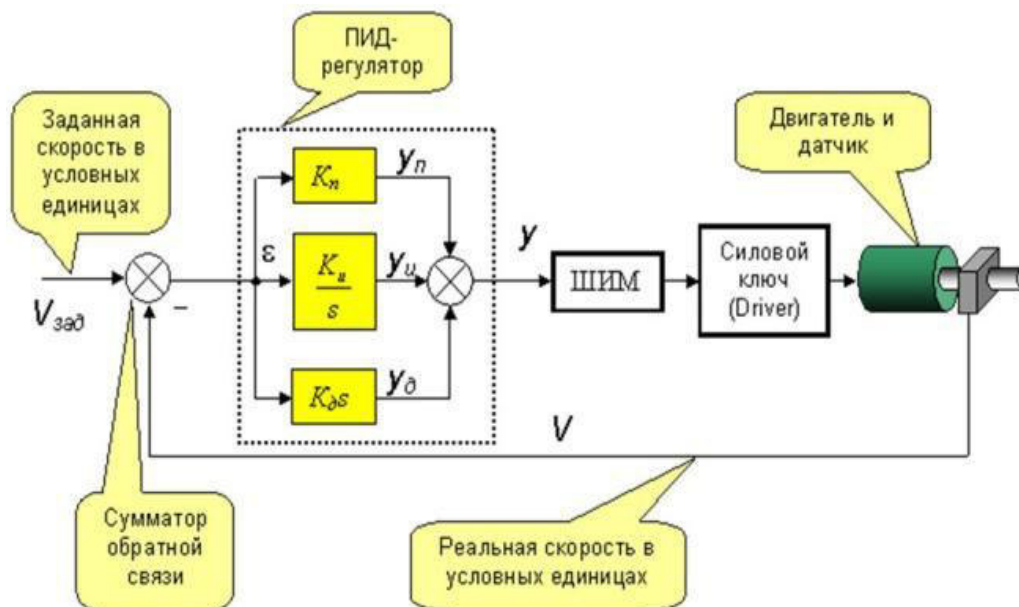


Рисунок 3.4.8 - Структурная схема системы управления с ПИД-регулятором

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ДП-140604.65 ПЗ

Лист

34

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 математическое выражение. 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  $K_d$  и формирование выходного сигнала  $y_d$ .

$$y_d(t) = K_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (4)$$

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



















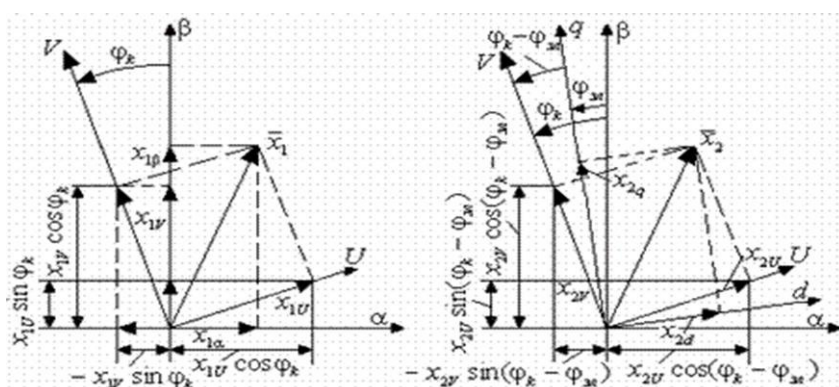
где  $R_1$  и  $R_2$  - активное сопротивление фазы статора и приведённое сопротивление фазы ротора.

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.



а) б)

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  $x_{1p}$  определены как проекции векторов и на ось  $\beta$ ; составляющие вектора - как проекции векторов  $x_{2a}$  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













необходимо, чтобы:

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

Совместим изображающий вектор переменной, с осью  $\alpha$  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:

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

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:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m I_{\mu}^2} = \frac{359,3}{3 \cdot 8,01^2} = 1,87 \quad \text{Ом.} \quad (1)$$

Последовательно включенное индуктивное сопротивление:

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

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

Используем приближенную формулу, так как

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

Активная составляющая тока синхронного холостого хода



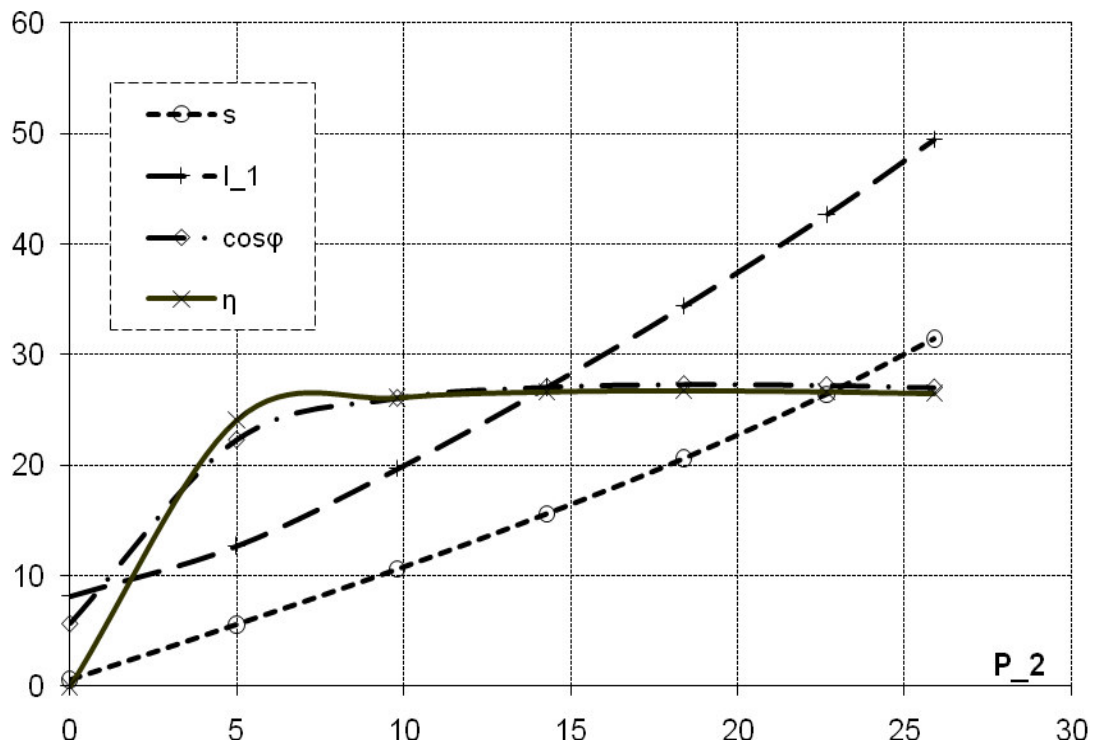


Рисунок 3.6.1 - Рабочие характеристики

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

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

Коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником с обмоткой

$$\lambda'_{п2} = \frac{h_0}{3b_1} \left( 1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2b_1} = \frac{28,4}{3 \cdot 6,1} \cdot \left( 1 - \frac{3,14 \cdot 6,1^2}{8 \cdot 121,1} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 6,1} = 1,74$$

Пусковые параметры  $\Pi = k\pi x_{12} = 2,59 \cdot 26,6 = 68,96$  Ом;

$c_{1\Pi} = 1 + x_{12}/\Pi = 1 + 0,859/68,96 = 1,012$ .

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

Расчетные формулы	Размерность	S					
		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

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
$r'_2 = K_R r'_2_{OM}$	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
$x'_{2 \xi} = K_X x'_2_{OM}$	0	4670	4850	4950	4960	4970	498
$R_{\Pi} = r_1 + c_{\Pi} r'_{2 \xi} / s_{OM}$	0	3510	4400	7390	9161	2351	740
$X_{\Pi} = x_1 + c_{\Pi} x'_{2 \xi}_{OM}$	1	331	351	361	361	361	36
$\Gamma_2 = U_1 / \sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}_A$	159	81154	99142	16134	08119	6699	54
$I_1 = \Gamma_2 \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12 \Pi})^2}}{c_{\Pi} x_{12 \Pi}}_A$	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  $\beta = 45^\circ$

$$hk = (b1 - bш) / 2 = (9,4 - 3,7) / 2 = 2,85 \text{ мм.}$$

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

Расчетные формулы	Размерность	s					
		3					
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
$F_{\text{ПСП}} 0,7 \frac{I_1 k_{\text{нас}} u_{\text{п}}}{a} \times \left( k'_{\beta} + k_{y1} k_{\text{ОБИ}} \frac{Z_1}{Z_2} \right) A$	3892	03719	33153	72925	82437	11919	2
$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{ПСП}} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta C_N \text{ ТЛ}}$	6	446	165	224	844	043	18
$\kappa_{\delta} = f(B_{\Phi\delta})$	-0	400	410	470	490	580	70
$c_{\text{Э1}} = (t_{z1} - b_{\text{III}})(1 - \kappa_{\delta})_{\text{ММ}}$	6	886	736	145	804	833	43
$\lambda_{\text{IIIHAC}} = \lambda_{\text{III}} - \Delta\lambda_{\text{IIIHAC}}$	-0	400	390	380	370	330	27
$\lambda_{\text{ДИHAC}} = \kappa_{\delta} \lambda_{\text{ДИ}}$	-1	331	331	351	361	391	45
$x_{\text{IHAC}} = x_1 \Sigma \lambda_{\text{IHAC}} / \Sigma \lambda_1 \text{ OM}$	1	051	081	221	301	521	84
$c_{\text{IIIHAC}} = 1 + x_{\text{IHAC}} / x_{12\text{II}}$	-0	6310	6350	6530	6630	6930	736
$c_{\text{Э2}} = (t_{z2} - b_{\text{III2}})(1 - \kappa_{\delta})_{\text{ММ}}$	1	011	011	011	011	011	01
$\Delta\lambda_{\text{II2HAC}} = \frac{h_{\text{III2}}}{b_{\text{III2}}} \frac{c_{\text{Э2}}}{c_{\text{Э2}} + b_{\text{III2}}}$	-6	246	115	575	264	383	11
$\lambda_{\text{II2\xi HAC}} = \lambda_{\text{II2\xi}} - \Delta\lambda_{\text{II2HAC}}$	-0	540	540	530	520	500	45
$\lambda_{\text{ДИ2HAC}} = \kappa_{\delta} \lambda_{\text{ДИ2}}$	-2	182	422	572	592	622	68
$x'_{2\xi\text{HAC}} = x'_2 \Sigma \lambda_{2\text{HAC}} / \Sigma \lambda_2 \text{ OM}$	0	840	870	981	041	211	47
$R_{\text{IIHAC}} = r_1 + c_{\text{IIIHAC}} r'_{\xi 2} / s \text{ OM}$	0	3310	3510	3710	3770	3930	416
$X_{\text{IIHAC}} = x_{\text{IHAC}} + c_{\text{IIIHAC}} x'_{\xi 2\text{HAC}} \text{ OM}$	0	350	440	740	911	231	74
$I'_{2\text{HAC}} = U_1 / \sqrt{R_{\text{IIHAC}}^2 + X_{\text{IIHAC}}^2} A$	0	970	991	031	041	091	16

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





Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса

$$кор = (\pi D_a + 8Pr)(1 + 2l_{выл1}) = (3,14 \cdot 278 + 8 \cdot 319)(130 + 2 \cdot 76,5) = 9,69 \cdot 10^5 \text{ мм}^2,$$

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

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя

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

где  $\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1)(P_{с1} + P_{с2}) = 2319,81 + (1,07 - 1)(699,81 + 435,69) = 2399,29$  Вт;

$\Sigma P = 2319,81$  Вт - сумма всех потерь в двигателе.

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды

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

где  $\alpha_B = 20$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C) - коэффициент подогрева воздуха.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды

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

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

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







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

$$W_{0M}(p) = 3p_{\Pi} k_2 \psi_{2н} k_{Д.М} \frac{1}{k_{Д.Т} (T_{\mu M} p + 1)}, \quad (7)$$

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

В этих выражениях  $1/[k_{Д.Т} (T_{\mu M} p + 1)]$  - передаточная функция апериодического звена, которым при расчете параметров регулятора момента заменена передаточная функция замкнутого контура тока  $i\beta$  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

$$\beta_{p.M} = 1/[2T_{\mu M} (3/2)p_{\Pi} k_2 \psi_{2н} k_{Д.М}]. \quad (9)$$

При расчете в эффективных значениях

$$\beta_{p.M} = 1/[2T_{\mu M} 3p_{\Pi} k_2 \psi_{2н.эф} k_{Д.М}]. \quad (10)$$

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

$$k_{p.c} = \frac{k_{Д.М} J}{2T_{\mu \omega} k_{Д.С}}. \quad (11)$$

При настройке на СО регулятор скорости должен быть пропорционально-интегральным. Его коэффициент рассчитывается по формуле

$$k_{p.c} = \frac{k_{Д.М} J}{2T_{\mu \omega} k_{Д.С}}. \quad (12)$$























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

Параметры:

Расчетное сопротивление

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн.}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{103,455}{3 \cdot 2,58^2} = 5,3 Ом$$

Сопротивление взаимной индукции

$$x_{12} = \frac{U_{ном}}{I_\mu} = \frac{220}{2,58} = 84 Ом$$

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

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

Расчетные величины

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

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

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x_2' = 1,0269 \cdot 1,3826 - (-0,0146) \cdot 2,4116 - (-0,03) \cdot 2,2087 = 1,5251 Ом$$

$$b = c_{1a} \cdot r_1 + c_{1p} \cdot x_1 + a' \cdot x_2' = 1,0269 \cdot 1,3826 + (-0,0146) \cdot 2,4116 + 1,0599 \cdot 2,2087 = 4,80369 Ом$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения.

$$P_{ст} + P_{мех} = 124,26 + 77,54 = 201,8 Вт$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений  $S = 0,001; 0,0072; 0,012; 0,0168; 0,0216; 0,024; 0,0292$ , принимаем предварительно, что

$$S_{ном} \approx r_2' = 0,0292$$

Номинальные данные спроектированного двигателя.

$$P_{2ном} = 4 кВт \quad U_{1ном} = 220 / 380 В \quad I_{1ном} = 7,83 А \quad \cos \varphi_{ном} = 0,89 \quad \eta_{ном} = 0,87$$



$$\beta_{\text{дин}}(p) = \frac{M(p)}{\omega(p)} = -\frac{\beta}{1+T_3 p} \quad (2)$$

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

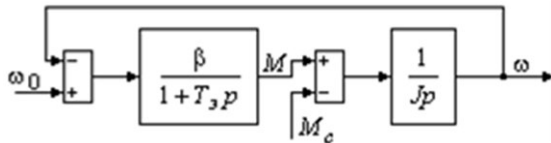


Рисунок 3.11.1 - Структурная схема электропривода с линейной механической характеристикой и с жесткими механическими связями

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

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

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

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:

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

Структурная схема электромеханической системы с двигателем имеет вид

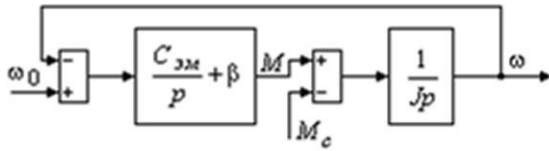


Рисунок 3.11.2 - Структурная схема линейризованного электропривода.

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:

$$\omega(p) = [\omega_0(p) - \omega(p)] \frac{\beta}{1 + T_2 p} \frac{1}{Jp} \quad (7)$$

или

$$\omega(p) \left( 1 + \frac{\beta}{Jp + JT_2 p^2} \right) = \omega_0(p) \frac{\beta}{Jp(1 + T_2 p)} \quad (8)$$

или

$$\omega(p) \left( 1 + \frac{1}{T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p} \right) = \omega_0(p) \frac{\beta}{Jp(1 + T_2 p)} \quad (9)$$

или

$$\omega(p) \frac{T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p + 1}{T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p} = \omega_0(p) \frac{\beta}{Jp(1 + T_2 p)} \quad (10)$$

Отсюда

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{\beta T_{\kappa} p (1 + T_2 p)}{(T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p + 1) Jp (1 + T_2 p)} = \frac{\beta \frac{J}{\beta}}{J(T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p + 1)} \quad (11)$$

$$W_{\infty}(p) = \frac{\omega(p)}{\omega_0(p)} = \frac{1}{T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p + 1}, \quad (12)$$

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

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

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

Характеристическое уравнение системы:

$$T_{\kappa} T_2 p^2 + T_{\kappa} p + 1 = 0 \quad (14)$$

Корни этого уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2T_2} \pm \sqrt{\frac{1}{4T_2^2} - \frac{1}{T_2 T_{\kappa}}} = \frac{1}{T_{\kappa}} \left( -\frac{m}{2} \pm \sqrt{\frac{m^2}{4} - m} \right) \quad (15)$$

где  $m = \frac{T_{\kappa}}{T_2}$ .

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:

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

где 
$$T = \frac{1}{\alpha}$$

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:

$$W_{\omega}(p) = \frac{1}{T_{\kappa} T_1 p^2 + T_{\kappa} p + 1} = \frac{1}{T_1^2 p^2 + 2\xi T_1 p + 1} \quad (17)$$

$$T_1 = \sqrt{T_2 T_{\kappa}}; \quad 2\xi T_1 = T_{\kappa}; \quad \xi = \frac{T_{\kappa}}{2T_1} = \frac{\sqrt{m}}{2} \quad (18)$$

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

$$W_{\omega}(p) = \frac{1}{(\sqrt{T_2 T_{\kappa}} p + 1)^2} \quad (19)$$

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

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

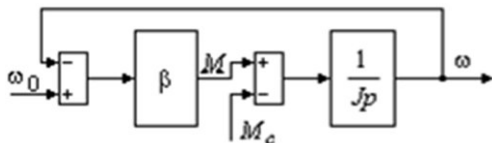


Рисунок 3.11.3 - Структурная схема асинхронного электропривода с линеаризованной механической характеристикой.

Из рисунка после элементарных преобразований:

$$M = \beta(\omega_0 - \omega); \quad M - M_{\epsilon} = \beta T_{\kappa} p \omega; \quad (20)$$

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











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

Подставляем эти значения :

$$r_{щ\partial} = \frac{2}{398} = 0,005(\text{Ом})$$

$$R_{\Sigma} = 1,1 \left[ 1,32(r_{я20} + r_{кo20} + r_{\partial n20})_{\Sigma} + r_{щ\partial} + 1,32(r_{я20} + r_{кo20} + r_{\partial n})_{\partial} + r_{щ\partial} \right] = \\ = 1,1(1,32(0.022195) + 0,003 + \\ + 1,32(0.05855) + 0,005) = 0,127(\text{Ом})$$

Вычислим номинальную ЭДС:

$$E_{нд} = U_{нд} - I_{нд} \cdot 1,32(r_{я20} + r_{кo20} + r_{\partial n20})_{\partial} - \Delta U_{щ} = \\ = 440 - 3.98 \cdot 1,32(0.05855) - 2 = 407.241(\text{В})$$

$$(\Phi_{\Sigma})_{\partial} = \frac{E_{нд}}{\omega_{нд}} = \frac{407.241}{41.86} = 9.728$$

$$K_{\omega} = \frac{1}{(\Phi_{\Sigma})_{\partial}} = \frac{1}{9.728} = 0,102$$

$$\frac{(0,123 + 3.3) \cdot 10^{-3}}{0,127} = 0,0328 \text{ (с)}$$

$$T_M = \frac{JR_{\Sigma}}{(\Phi_{\Sigma})_{\partial}^2} = \frac{37.5 \cdot 0,127}{9.728^2} = 50 \cdot 10^{-3} \text{ (с)}$$

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  $[v_{pac} = 75^{\circ}\text{C}; \rho_{75} = \frac{10^{-6}}{22} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \frac{b_c}{b_n} = 1$   $b_c$  - ширина стержня, м  $b_n$  -



$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{\sigma 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\sigma 2}} \quad (44)$$

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.

$$\lambda_{n2\xi} = \lambda_{n2} - \Delta\lambda_{n2\xi} \quad (45)$$

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

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

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

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

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

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

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

ток в обмотке статора

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

### 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  $k_{нас} = 1,2$

$$F_{н.ср.} = 0,7 \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{n1}}{a} \cdot \left( k'_{\beta} + k_{y1} \cdot k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (1)$$

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

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.

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

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

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,00045}{0,0121 + 0,0151}} = 0,9573$$

коэффициент

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

для  $B_{\phi\delta} = 3,54 Tл$  находим  $k_{\delta} = 0,7$

$k_{\delta}$  - отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния насыщенной машины.

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

$$c_{з1} = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0,0121 - 0,0035) \cdot (1 - 0,7) = 0,0026$$

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_{u1} + 0,58 \cdot h_k}{b_{u1}} \cdot \left( \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1,5 \cdot b_{u1}} \right) \quad (3)$$

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

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{0,0005 + 0,58 \cdot 0,00213}{0,0035} \cdot \left( \frac{0,0026}{0,0026 + 1,5 \cdot 0,0035} \right) = 0,1633$$

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = 1,1795 - 0,1633 = 1,0162$$

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

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

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения.

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1нас} + \lambda_{\partial 1нас} + \lambda_{\lambda 1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{\partial 1} + \lambda_{\lambda 1}} = 2,4116 \cdot \frac{1,0162 + 1,5218 + 1,7256}{1,1795 + 2,174 + 1,7256} = 2,0244 \text{ Ом}$$

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

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{c_{\varepsilon 2} + b_{u2}} \quad (4)$$

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

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{0,0005}{0,001} \cdot \frac{0,0042}{0,0042 + 0,001} = 0,4046$$

$$\lambda_{n2\xi нас} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас} = 0,9386 - 0,4046 = 0,534$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения.

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

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния насыщения.

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

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



## Расчет токов и моментов.

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

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

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

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

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

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

Кратность пускового момента с учетом влияния вытеснения тока и насыщения.

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

Полученный в расчете коэффициент насыщения.

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

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

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

Принимаем

$$S = 0,8 \cdot k_{нас} = 1,18$$

$$S = 0,6 \cdot k_{нас} = 1,16$$

$$S = 0,4 \cdot k_{нас} = 1,14$$

$$S = 0,2 \cdot k_{нас} = 1,12$$

$$S = 0,1 \cdot k_{нас} = 1,1$$

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

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

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 соотношения 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.

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

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям ( $KПД$  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.

					ДП-140604.65 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		
					86	



Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя.

$$\sum P_B = \sum P' - (1-k) \cdot (P_{э\eta} + P_{ст.очн}) - 0,9 \cdot P_{мех} = 668,986 - (1-0,22) \cdot (94,18 + 103,455) - 0,9 \cdot 77,544 = 445,043 \text{ Вт}$$

$$\sum P' = \sum P - (k_\theta - 1) \cdot (P_{э_1} + P_{э_2}) = 611,1041 + (1,15 - 1) \cdot (258,907 + 126,9704) = 668,986 \text{ Вт}$$

$$P_{э\eta} = k_\theta \cdot \frac{P_{э_1} \cdot 2 \cdot l_1}{l_{ср\eta}} = 1,15 \cdot \frac{258,907 \cdot 2 \cdot 0,104}{0,6579} = 94,18 \text{ Вт}$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды.

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

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды.

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

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.

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

где  $k_m$  - коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпус, 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  $Q_B$ .

					ДП-140604.65 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

$$Q'_B > Q_B$$

$$0,0853 > 0,0533$$

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, командоаппарат SA, реле дуговой блокировки КУ2, реле напряжения КУ1, линейные контакторы KM1, KM2, контакторы ускорения KM3-KM7, реле максимального тока FA1, FA2, реле тока управления КА3-КА7, 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 командоаппарата устанавливается в нулевую позицию. При этом замыкается контакт SA-0, и ток, протекающий по цепи: QS2-FU1-SA-0-КА1-КА2-FR1-FR2-KU1-FU2-QS2, вызывает срабатывание реле напряжения КУ1 и замыкание контакта КУ1, шунтирующего контакт командоаппарата SA-0. На этом подготовка схемы к работе завершается.

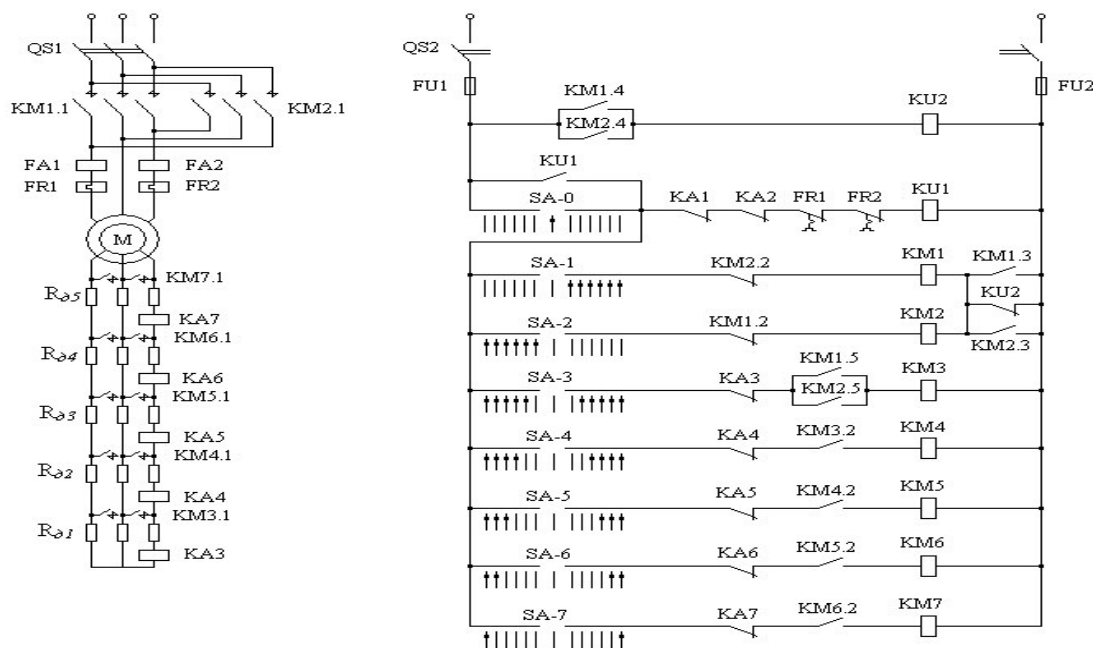


Рисунок 4.1 - Принципиальная реверсивная схема управления асинхронным двигателем с фазным ротором и командоаппаратом.

## 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 установившихся 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 удастся 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

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

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.

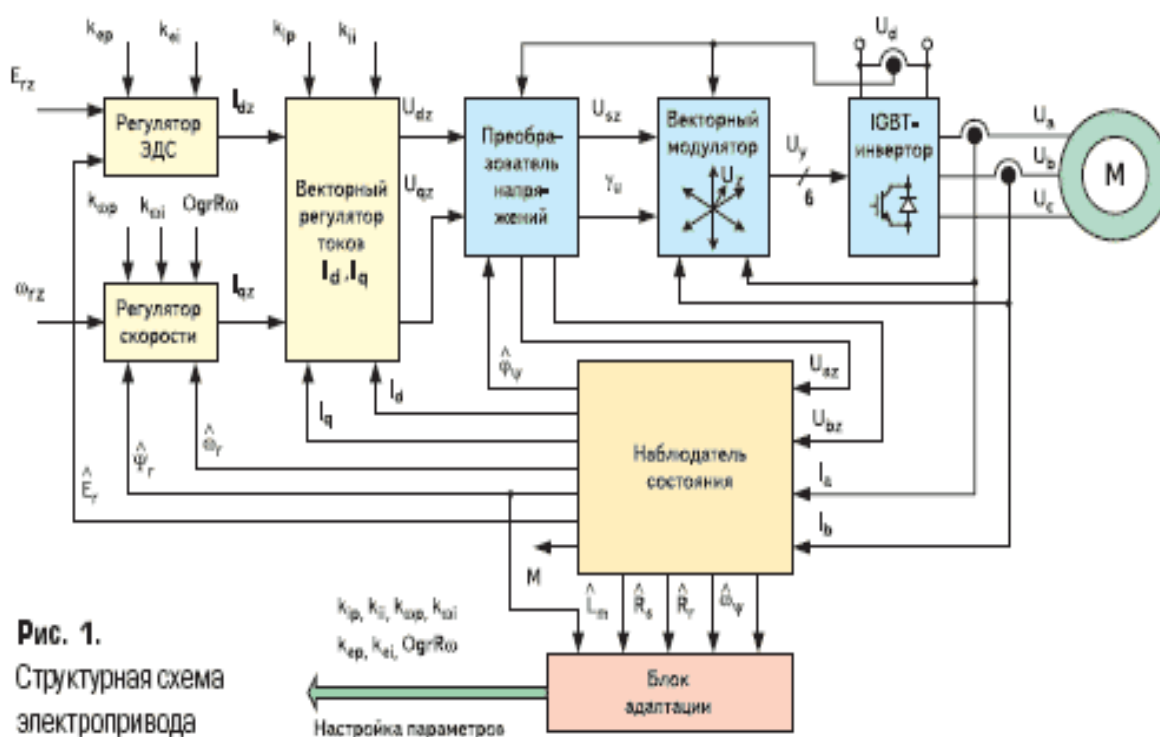
2) Следующей проблемой является чувствительность электропривода к изменению его параметров в процессе работы. Прежде всего это относится к температурным изменениям активных сопротивлений статора и ротора, а также к изменению взаимной индуктивности в зависимости от тока цепи намагничивания. Одним из подходов 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

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-сцепления ротора, и блок компенсации перекрестных





$$\begin{aligned} \omega_{x,k} &= \check{\omega}_{\psi,k-1}; \\ \varphi_{x,k} &= \varphi_{x,k-1} + \omega_{x,k} T_0, \end{aligned}$$

(1)

где  $T_0$  - интервал расчета переменных наблюдателя.

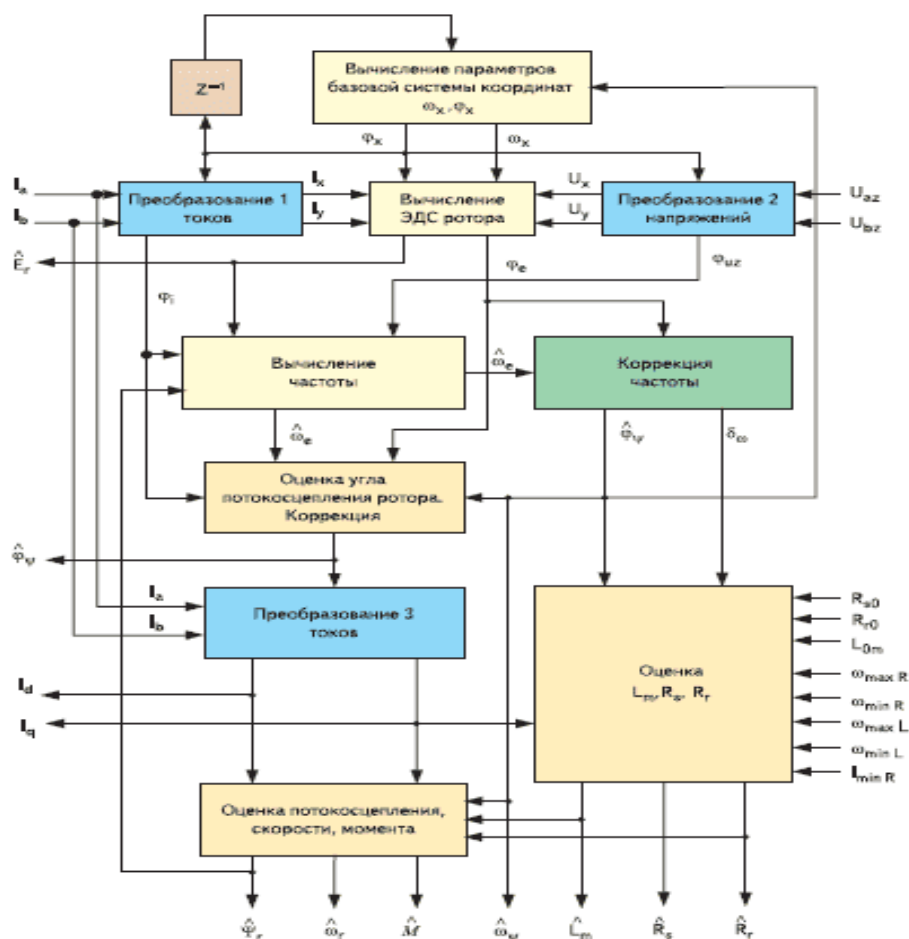


Рисунок 5.3.1 - Структурная схема наблюдателя состояния

Преобразование 1 токов и преобразование 2 напряжений из системы координат (a, b, c) в систему координат (x, y) осуществляются по выражениям:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{2}{\sqrt{3}} [U_{az} \sin(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}) + \\ &\quad + U_{bz} \sin(\varphi_{x,k-1})]; \\ U_y &= \frac{2}{\sqrt{3}} [U_{az} \cos(\varphi_{x,k-1} + \frac{\pi}{3}) + \\ &\quad + U_{bz} \cos(\varphi_{x,k-1})]; \quad (2) \\ I_x &= \frac{2}{\sqrt{3}} [I_a \sin(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3}) + I_b \sin(\varphi_{x,k})]; \\ I_y &= \frac{2}{\sqrt{3}} [I_b \cos(\varphi_{x,k} + \frac{\pi}{3}) + I_b \cos(\varphi_{x,k})]. \quad (3) \end{aligned}$$

(3), (4)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата











Климатический регион (пояс)	Класс условий труда					
	Допустимый	Вредный				Опасный (экстремальный)
		2	3.1	3.2	3.3	
IA (особый)	<u>-3,4</u>	<u>-5,0</u>	<u>-7,9</u>	<u>-10,5</u>	<u>-14,0</u>	<u>-14,0</u>
	-5,9	-8,1	-12,2	-15,3	-20,0	-20,0
IB (IV)	<u>-15,1</u>	<u>-17,3</u>	<u>-20,5</u>	<u>-23,5</u>	<u>-27,5</u>	<u>-27,5</u>
	-18,1	-21,3	-26,2	-29,8	-35,5	-35,5
II (III)	<u>+1,4</u>	<u>0,0</u>	<u>-2,6</u>	<u>-5,1</u>	<u>-8,3</u>	<u>-8,3</u>
	-0,7	-2,7	-6,3	-9,2	-13,5	-13,5
III (II)	<u>+7,0</u>	<u>+5,7</u>	<u>+3,5</u>	<u>+1,2</u>	<u>-1,7</u>	<u>-1,7</u>
	+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 Iб

Климатический регион (пояс)	Класс условий труда					
	Допустимый	Вредный				Опасный (экстремальный)
		2	3.1	3.2	3.3	
IA (особый)	<u>-3,4</u>	<u>-5,0</u>	<u>-7,9</u>	<u>-10,5</u>	<u>-14,0</u>	<u>-14,0</u>
	-5,9	-8,1	-12,2	-15,3	-20,0	-20,0
IB (IV)	<u>-15,1</u>	<u>-17,3</u>	<u>-20,5</u>	<u>-23,5</u>	<u>-27,5</u>	<u>-27,5</u>
	-18,1	-21,3	-26,2	-29,8	-35,5	-35,5
II (III)	<u>+1,4</u>	<u>0,0</u>	<u>-2,6</u>	<u>-5,1</u>	<u>-8,3</u>	<u>-8,3</u>
	-0,7	-2,7	-6,3	-9,2	-13,5	-13,5
III (II)	<u>+7,0</u>	<u>+5,7</u>	<u>+3,5</u>	<u>+1,2</u>	<u>-1,7</u>	<u>-1,7</u>
	+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

Іб	25,8	26,1	26,9	27,9	30,3	30,3
Іа	25,1	25,5	26,2	27,3	29,9	29,9
Іб	23,9	24,2	25,0	26,4	29,1	29,1
ІІІ	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
		3.1	3.2	3.3	3.4	
	2					4
Превышение ПДУ до ...дБ/раз (включительно):						
Шум, эквивалентный уровень звука, дБА	ПДУ	5	15	25	35	35
Вибрация локальная, эквивалентный скорректированный уровень (значение) виброскорости, виброускорения (дБ/раз)	ПДУ	3/1,4	6/2	9/2,8	12/4	12/4
Вибрация общая, эквивалентный скорректированный уровень виброскорости, 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 виброскорости, 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".

- 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

маслобензостойкой подошве;

- рукавицами комбинированные или перчатки;
- перчатки диэлектрические;
- галоши диэлектрические;
- пояс предохранительный;
- очки защитные;
- наушники противοшумные 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 °С. Помещение оборудовано устройствами для обогрева кистей и стоп, температура которых в диапазоне 35–40 °С.

Во избежание переохлаждения работникам не следует во время перерывов в

работе находиться на холоде в течение более 10 мин. при температуре воздуха до -10 °С и не более 5 мин. при температуре воздуха ниже -10 °С.

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, °С;  $V$  – скорость ветра, м/с.

Например, при температуре воздуха -15 оС 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 холоде составляет не более 60 мин.

Работающие на открытой территории в холодный период года обеспечиваются комплектом СИЗ от холода, имеющим теплоизоляцию,

рассчитанной в зависимости от ИПУОО.

Во избежание локального охлаждения тела работников и уменьшения общих теплотерь 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

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 sprыска 13 мм) до горящих 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 асбестового 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.

Создание и использование неснижаемого аварийного страхового запаса запасных частей, оборудования, изделий и материалов производится 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, загрязнённого газами, парами и аэрозольными веществами, 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 тяжёлый 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.

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

Электрозаститные 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 экранизирующие комплекты;
- переносные заземления;
- оградительные 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

					<i>ДП-140604.65 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>107</i>

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 невралгии, головной боли, плохого сна, раздражительности, неприятных ощущений в области сердца и т.д.

Установлено, что находящийся под потенциалом организм 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 молнии. Сооружения предприятий нефтепродуктообеспечения должны быть защищены от прямых ударов молнии, ее вторичных проявлений. При



эксплуатации устройств молниезащиты должно осуществляться систематическое наблюдение за их состоянием.

Защита 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**

Ямало-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 C1 в счёт «разведки» составил – 242,611 млн. тн у.

					<i>ДП-140604.65 ПЗ</i>		<i>Лист</i>
							109
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			

т., в том числе по нефти – 28,639 млн. тн, конденсата - 6,201 млн. тн, газа – 207,771 млрд. м3.

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. м3.

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. Заработная 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
Заработная 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

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 амортиз.(руб.)	1512,62	1308,67	1439,46	4499,28	1415,94
Себестоимость 1тн.нефти без амортиз.(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 добыче 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, заработная 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 вышккомонтажные 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 пласты, 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

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

					ДП-140604.65 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		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;
- преискурантные, 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 биржевые товары оперативно

					ДП-140604.65 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		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 прейскурентные, 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 уторгование 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,

					ДП-140604.65 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		115

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.

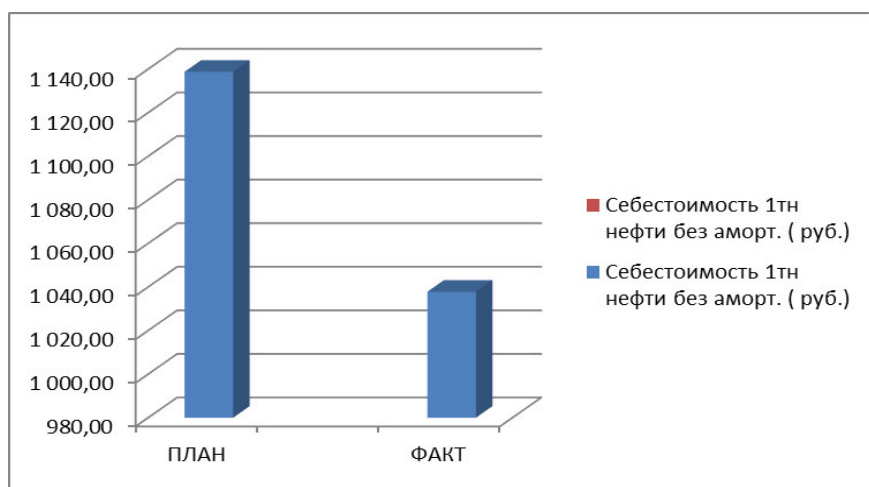


Рисунок 7.2.1





## 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.

					<i>ДП-140604.65 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>118</i>

## 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. отделение, 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) Столов 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) Мощинский 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.

					<i>ДП-140604.65 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>119</i>

- 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™Family, "Vector Control Development Kit". User Manual. UM021402-0407. 2007 by ZiLOG, Inc. All rights reserved. www.zilog.com