

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

кафедра Электротехника и Автоматизация электрических установок

«Допущен к защите»
Заведующий кафедрой _____

(Ф.И.О., ученая степень, звание)

« _____ » _____ 20 _____ г.
(подпись)

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

На тему: Разработка стандарта для управления
электротехническими процессами и подстанции
мощности крана

Специальность Электротехника

Выполнил (а) Аманжолов А.Т.
(Фамилия и инициалы) группа _____

Научный руководитель Алексеев С.Б. доктор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

Консультанты:

по экономической части:

Жакупов А.А. к.э.н. профессор
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
« _____ » _____ 20 _____ г.
(подпись)

по безопасности жизнедеятельности:

Мурташева Т.С. к.т.н., старший преподаватель
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
Мурташева « 07 » 06 20 16 г.
(подпись)

Нормоконтролер: Кузнецов Ю.В. старший преподаватель
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
Кузнецов « 05 » 06 20 16 г.
(подпись)

Рецензент: Туринский С.М. директор ТОО «РАДО»
(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)
« _____ » _____ 20 _____ г.
(подпись)

Алматы 2016г.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество
АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

Факультет Электроэнергетический
Специальность Электроэнергетика
Кафедра Электропривод и Автоматизация промышленных установок

ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Студент Аманжолдин Абил Талович
(фамилия, имя, отчество)

Тема проекта Разработка схемы для управления
электроприводом двигателя и двигателя
механического привода

утверждена приказом ректора № 148 от «19» октября 20__ г.
Срок сдачи законченной работы «__» __ 20__ г.
Исходные данные к проекту требуемые параметры результатов
проектирования (исследования) и исходные данные объекта

Тип электродвигателя - 4AA56B4У3

$$P_n = 0,18 \text{ кВт}$$

$$I_n = 0,427 \text{ А}$$

$$n_n = 1356 \text{ об/мин}$$

Перечень подлежащих разработке дипломного проекта вопросов или
краткое содержание дипломного проекта:

- 1 Разработка системы управления переключением шестов
- 2 Расчет механических характеристик частотно-регулируе-
мого электропривода
- 3 Расчет и выбор элементов силовой схемы
- 4 Моделирование системы ПЧ-Дв
- 5 Безопасность жизнедеятельности труда
- 6 Экономическая часть

Г Р А Ф И К
подготовки дипломного проекта

№ п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1	Разработка системы управления переобъемом моста	04.02 - 28.02	
1.1	Основные требования к элек. управлению	04.02 - 18.02	
1.2	Структура лабораторного мостового crane	18.02 - 28.02	
2	Расчет механических характеристик частотно-регулируемого электропривода	28.02 - 10.03	
3	Расчет и выбор элементов силовой цепи	10.03 - 30.04	
3.1	Расчет силовых элементов инвертора и выпрямителя	10.03 - 05.04	
3.2	Выбор серийного преобразователя частоты	05.04 - 30.04	
4	Моделирование системы ПЧ - АД	30.04 - 10.05	
5	БЖД	10.05 - 20.05	
6	Экономические расчеты	20.05 - 30.05	

Дата выдачи задания « » _____ 20__ г.

Заведующий кафедрой _____
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель _____
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению студент _____
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Аннотация

В дипломном проекте приводится разработка электрических схем управления механизмами тележки и подъема лабораторного мостового крана, предназначенного для ознакомления студентов с современным оборудованием и средствами автоматизации. Дается описание функциональной схемы, обеспечивающей программный выход подъемного механизма в заданную точку, обосновывается выбор электропривода по системе ПЧ-АД и расчет механических характеристик при частотном регулировании. На основе расчета силовых элементов ПЧ производится выбор серийного преобразователя. Рассмотрены вопросы охраны труда и экономики. Андатпа

Дипломдық жобада арба механизмдерін басқарудың электр сұлбалары мен студенттерге заманауи жабдықтар мен автоматтандыру құрылғыларымен таныстыруға арналған зертханалық көпірлі кранды көтерудің әзірленуі келтірілген. Белгіленген нүктедегі көтерілу механизмінің бағдарламалық шығуын қамтамасыз ететін функционалды сұлбаның жүйеленіп баяндалынуы беріліп, АҚ-ЖТ (ассинхронды қозғалтқыш жиілігінің түрлендірушісі) жүйесі бойынша электржетек таңдауы мен жиіліктік реттеу барысындағы механикалық сипаттамалардың есептелінуі өз орнын тапты. ЖТ күштік элементтерінің есептелінуі негізінде сериялық түрлендіргіш таңдауы жүргізілінеді. Еңбекті қорғау және экономика сұрақтары да қарастырылған.

Annotation

Diploma project provides the development of electric charts of management, which is driven by the mechanisms of light cart, and rising of the laboratory-travelling crane intended for the acquaintance of students with a modern equipment and facilities of automation. There is given the description of functional diagram providing the programmatic exit of lifting mechanism in the set point, the choice of electromechanic by system of transformer of frequency of induction motor and calculation of mechanical descriptions are grounded at the frequency adjusting. On the basis of calculation of power elements transformer of frequency of the choice of serial transformer is produced. The questions of labour and economy protection are considered.

Содержание

Введение	11
1 Разработка системы управления передвижением моста	12
1.1 Основные требования к электроприводу моста и системы управления	12
1.2 Устройство лабораторного мостового крана.	13
2. Расчет механических характеристик частотно-регулируемого электропривода	23
2.1 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1= 50$ Гц)	23
2.2 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1= 40$ Гц)	28
2.3 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1= 30$ Гц)	30
2.4 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1= 20$ Гц)	31
2.5 Механические характеристики с сохранением постоянства перегрузочной способности	34
3. Расчет и выбор элементов силовой схемы	43
3.1 Расчет силовых элементов инвертора и выпрямителя	43
3.2 Выбор серийного преобразователя частоты	47
4. Моделирование системы ПЧ-АД.	52
4.1 Математическая модель системы ПЧ-АД	52
4.2 Виртуальная модель ПЧ- АД в программной среде Matlab	55
4.3 Осциллограммы процессов при пуске и набросе нагрузки	56
5 Безопасность жизнедеятельности труда	61
5.1 Анализ условий труда	61
5.2 Расчет шума	63
6 Экономическая часть	69
6.1 Расчет капитала вложений и эксплуатационных издержек	69
6.2 Расчет экономической эффективности	75
Заключение	76
Список используемой литературы	77

Введение

Мостовые краны являются одним из главных устройств цехов, предназначенные для перемещения грузов и оборудования в ходе производства.

Электроприводы мостовых кранов в основном оборудованы нерегулируемым по частоте вращения асинхронным электродвигателем (управление релейно-контакторное). В последнее время возникла возможность оборудования мостовыми кранами все системы управления, позволяющие создать условия безопасного, удобного и более эффективного управления всем технологическим процессом. Это обусловлено развитием микропроцессорной техники.

С этой целью могут быть использованы микроконтроллеры, панели оператора позволяющие отображать ход выполнения технологического процесса, программные реле. Нерегулируемые электропривода механизмов мостового крана оснащены на регулируемые электроприводами по системам ПЧ-АД, позволяющие осуществить плавный пуск и передвижение механизмов мостового крана. В то же время появилась возможность программного управления механизмами крана, с обеспечением выхода в заданную точку в автоматическом режиме. При этом взаимодействие между элементами системы управления и регулирования электроприводов осуществляется с применением интерфейсов связи RS-485 и др.

С целью обучения студентов современным технологиям в автоматизации в лаборатории кафедры ЭиАПУ реализована механическая часть мостового крана, содержащая механизм передвижения моста и тележки с подъемным механизмом. Установлены несущие балки, редуктора и двигатели. Необходимо провести расчет мощности двигателей для крана, и сравнить с уже установленными электродвигателями. Для обеспечения программированного выхода подъемных механизмов в заданную точку, на элементах конструкции мостового крана установлены датчики, контролируемые положения механизмов крана.

В дипломном проекте ставится задача разработки электрических схем управления электродвигателями моста, обеспечивающие их синхронизацию, разработка конструкции стенда и размещение необходимого оборудования с целью проведения учебных занятий.

1 Разработка системы управления передвижением моста

1.1 Основные требования к электроприводу моста и системы управления

Перечислим их:

а) безопасность, устойчивость. В продолжение определенного времени и в определенных условиях электропривод должен стабильно, без перебоев осуществить набор команд. Это важнейшее требование, ибо без этого другие его качества могут стать ненужными. В различных сферах использования электродвигателя различные требования по надежности. Рассмотрим это на примере компрессора бытового холодильника. Продолжительность его работы не должна быть очень длительным; при сбое не должна привести к тяжелым последствиям;

б) четкость, неукоснительность, конкретность. Под этими качествами подразумеваем отличия между фактическими параметрами и установленными. Эти параметры должны быть в пределах разрешенных значений. В качестве примера можно привести электропривод звукозаписывающих устройств: главное условие – постоянная заданная скорость вращения;

в) быстрота действия. Это свойство электродвигателя тесно связано с вышеописанным требованием. Обозначает стремительную восприимчивость к разным подающимся сигналам. К примеру, следящий электропривод. Чем быстрее последует ответ от привода при учащенном изменении регулирующего сигнала, тем сама вероятность ошибки будет ниже;

г) энергетическая высокоэффективность. Расход электричества электроприводом является, чуть ли, не главным критерием при выборе электропривода, особенно в тех случаях, когда речь идет о больших мощностях, о продолжительном режиме пользования электроприводом или когда имеем дело с переносной аппаратурой. Важно выбирать электродвигатель с высоким значением коэффициента полезного действия, так как различные физические явления, происходящие с электродвигателем, обусловлены именно потерями;

д) все прочие свойства. Например, размер, материал, форма.

Электродвигатели обладают рядом свойств, что позволяет их по схожим свойствам разделить на две категории:

а) по первой категории свойств электродвигатели подразделяются относительно метода регулирования – ручной, автоматический и полуавтоматический методы:

1) при ручном регулировании диспетчеру приходится непосредственно иметь дело с простейшими компонентами регулирования. Есть ряд недостатков, таких как необходимость присутствия диспетчера при регулировании, близкое расположение этих регуляторов к непосредственно самим электродвигателям, в большинстве случаев невысокая надежность; при

полуавтоматическом регулировании диспетчер имеет возможность пользоваться;

2) автоматическими приборами, которые выполняют лишь определенную часть операций. При полуавтоматическом методе регулирования отпадает нужда непрерывного присутствия человека при проведении операции, увеличивается надежность. Отрицательная черта такого регулирования заключается в относительно низкой скорости действия, так как диспетчеру необходимо время для выбора режима. Не стоит забывать и про человеческий фактор, что отнюдь не добавляет привлекательности полуавтоматическому методу регулирования;

3) и последний по счету, но не по важности и сложности метод регулирования – автоматический. Все без исключения процедуры протекают без какого-либо вмешательства человека в производство. Этот метод требует максимальную надежность и быстрдействие.

б) во второй категории мы будем подразделять электродвигатели по разновидности выполняемых процессов. Всего выявили 6 подразделений:

1) к этой группе относятся нерегулируемые электроприводы. Судя по названию можно говорить о неконтролируемости скорости этих приводов. Эти двигатели обеспечивают остановку, автоматический запуск и реверс. Применяются в вентиляционных и насосных системах;

2) регулируемые электродвигатели. Позволяют изменять темп вращения. Применяются в подъемных и транспортных механизмах;

3) к этой группе двигателей отнесем те, для которых непостоянные промышленные условия не могут быть помехой для надежности и безостановочности всего производственного процесса. Наличие обратной связи является главной отличительной чертой электродвигателей относящихся к этой группе;

4) сюда мы отнесем электроприводы, производящие сверхточное отслеживание сигнала управления. Используем для отслеживания изменения температуры, уровень воды, расстояние, скорость;

5) электродвигатели, работающие по предварительному программному плану. Включает в себя все вышеперечисленные группы;

б) автоматические, саморегулирующиеся системы. Вбирают в себя все свойства вышеперечисленных категорий для создания более, подходящего, оптимального режима работы.

1.2 Устройство лабораторного мостового крана.

1.2.1 Функциональная схема мостового крана

На рисунке 1.1 запечатлена функциональная схема. На ней отображено строение лабораторного мостового крана

Для управления мостовым краном с обеспечением выхода в заданую точку должны быть решена следующая задача. Задача синхронизации электродвигателей моста на основе схемы электрического вала, с целью

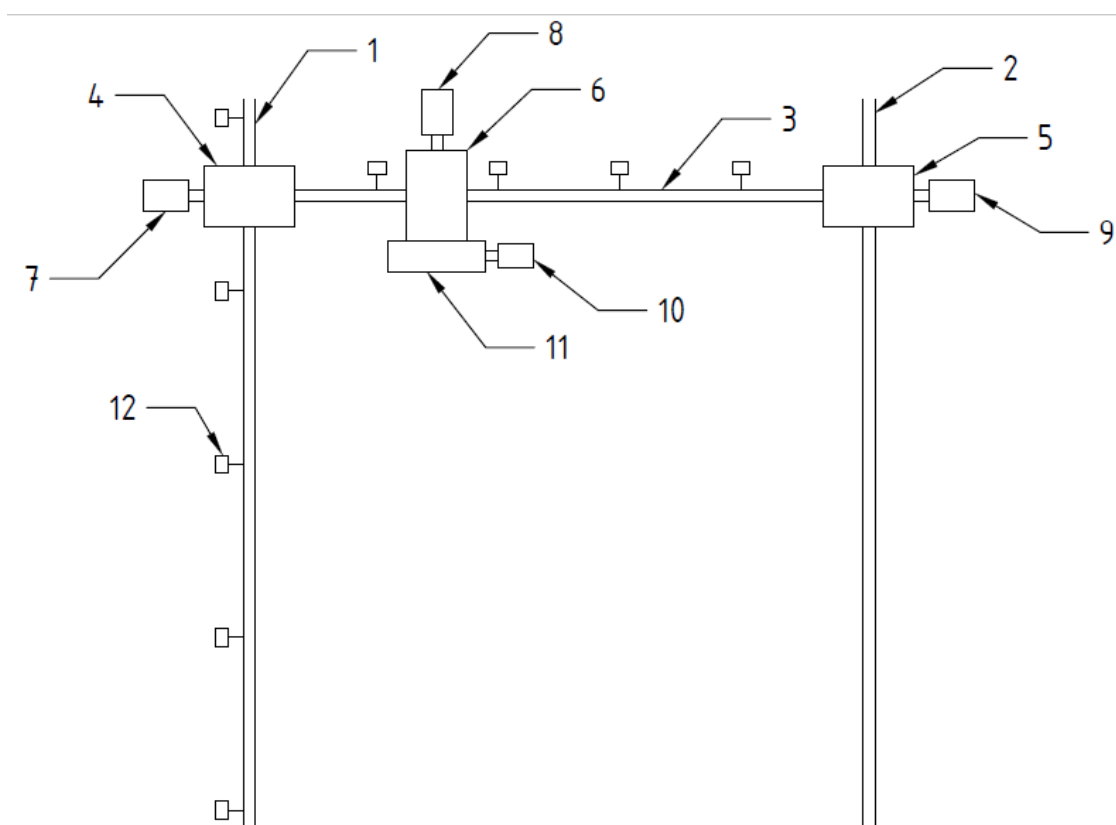
ознакомления студента с простейшими методами электрической синхронизации двух двигателей моста и на более современном методе на базе преобразователей частоты.

Рассмотрим работу мостового крана по функциональной схеме. Предположим, что подъемный механизм крана находится в какой либо из точек пространства лаборатории, определяемый датчиком положения, находящимся на элементах конструкции.

Сигнал датчиков поступают на входы микроконтролера, в котором реализуется программа, обеспечивающая пуск электропривода, контроль и сигнализацию о положении элементов механизмов мостового крана. На панели оператора или компьютера дается информация о нахождении подъемного механизма.

Задание новой координаты производится в панели оператора. При нажатии кнопки пуск механизм подъема выходит в заданную точку. Так же после реализации стенда будет доступна возможность перепрограммировать контролер управления.

В процессе работы на стенде студент должен иметь возможность ознакомиться с принципами управления электроприводов мостового крана и электрическими схемами. А так же получить навык программирования в заданой промной среде.



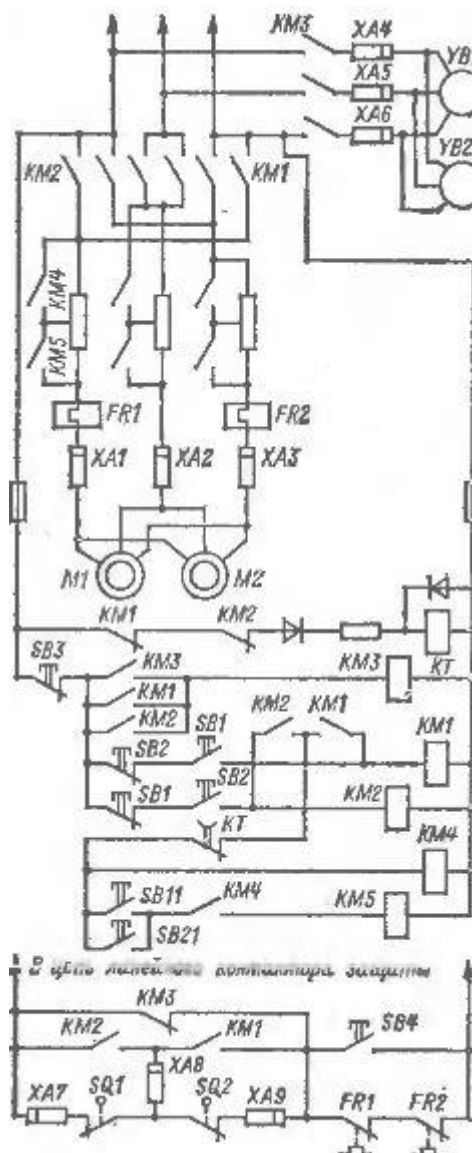
1 – левая опорная балка; 2 – правая опорная балка; 3 – опорная балка тележки; 4,5 – механизмы передвижения моста; 6 – механизм передвижения

тележки; 7,8,9,10 – электродвигатели механизмов передвижения; 11 – механизм подъема; 12 – концевые выключатели

Рисунок 1.1 – Функциональная схема мостового крана

1.2.2 Электрические схемы управления электроприводами тележки и подъема

На рисунке 1.2 представлена схема электропривода передвижения при управлении короткозамкнутым односкоростным двигателем.



M1, M2— электродвигатели, YB1, YB2 — электромагниты тормозов или электрогидравлические толкатели, M1, KM2 — контакторы направления движения, KM4, KM5 — контакторы резисторов в цепи статоров, KM3 — контактор тормозов, KT — реле контроля времени пуска, FR1, FR2— тепловые реле, SQ1, SQ2 — концевые выключатели, SB1, SB2 — кнопки направления движения (двухходовые), SB11, SB21 — кнопки пуска, SB3 —

кнопка прекращения свободного выбега, SB4 — кнопка шунтирования тепловой защиты, ХА1—ХА9 — контакты токопереходных троллеев

Рисунок 1.2 – Схема электропривода (с односкоростным короткозамкнутым двигателем) механизма передвижения крана при управлении с пола

Эта схема предназначается для приводов тележек кранов грузоподъемностью 3—20 т и приводов мостов кранов грузоподъемностью 2—5 т. Обмотки статора короткозамкнутого двигателя получают питание от сети через две ступени резисторов. Механические характеристики электропривода приведены на рисунке 1.3.

Управление электроприводом — от подвесных кнопочных постов. В управлении участвуют две основные двухходовые кнопки SB1 и SB2 дающие команду на движение в двух направлениях. Переход на положение без регулирующих резисторов осуществляется при подаче команд кнопками SB11, SB21.

При включении двигателя через контакты контакторов КМ1, КМ2 подается питание на привод тормоза YB через контакты КМ3. После отключения электродвигателя привод тормоза продолжает получать питание, и механизм имеет свободный выбег. Для отключения тормоза используется кнопка SB3, общая для механизма тележки и моста. При срабатывании конечных выключателей SQ1 и SQ2 происходит отключение линейного контактора защиты и накладывается механический тормоз.

Для обеспечения электрического торможения противовключением после свободного выбега, используется реле времени КТ с выдержкой времени 2—3 с, задерживающее привод на положении с минимальным пусковым (тормозным) моментом.

На рисунке 1.5 представлена схема электропривода передвижения мостового крана (тележки) с использованием двухскоростных короткозамкнутых электродвигателей. Электродвигатель имеет две отдельные обмотки с соотношением числа полюсов:

- $2p=6/16$;
- $2p=4/16$;
- $2p=4/12$.

Кнопкой SB1 или SB2 включаются контакторы направления КМ1, КМ2, а также контактор малой скорости КМ4. После подачи питания к тихоходной обмотке двигателя через контактор КМ3 получает питание привод тормоза YB1, YB2. Для перехода на большую скорость двухходовыми кнопками SB замыкаются контакты SB11, SB21 (второе положение) и включается контактор КМ6.

Обмотка большой скорости подключается к сети через резистор одновременно с тихоходной обмоткой. Затем тихоходная обмотка отключается. По истечении выдержки времени реле КТ (2—5 с) включается

контактор КМ5 и двигатель выходит на свою естественную характеристику быстроходного режима (рисунок 1.4).

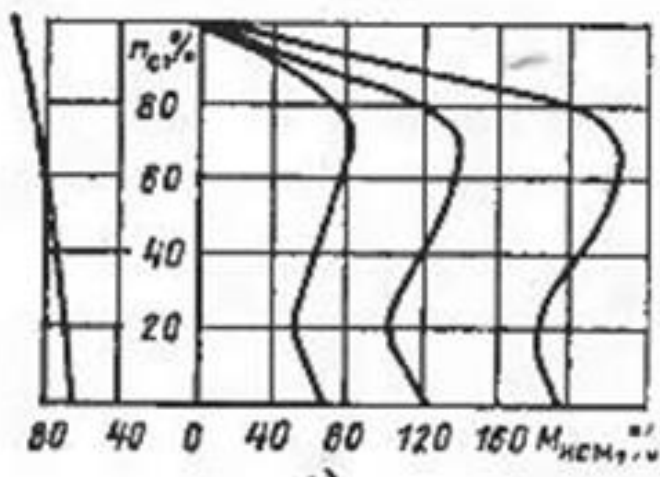


Рисунок 1.3 – Механическая характеристика к схеме электропривода (с односкоростным короткозамкнутым двигателем) механизма передвижения крана при управлении с пола

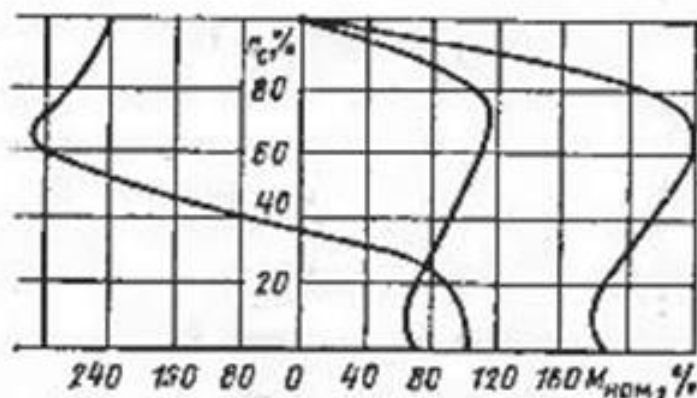


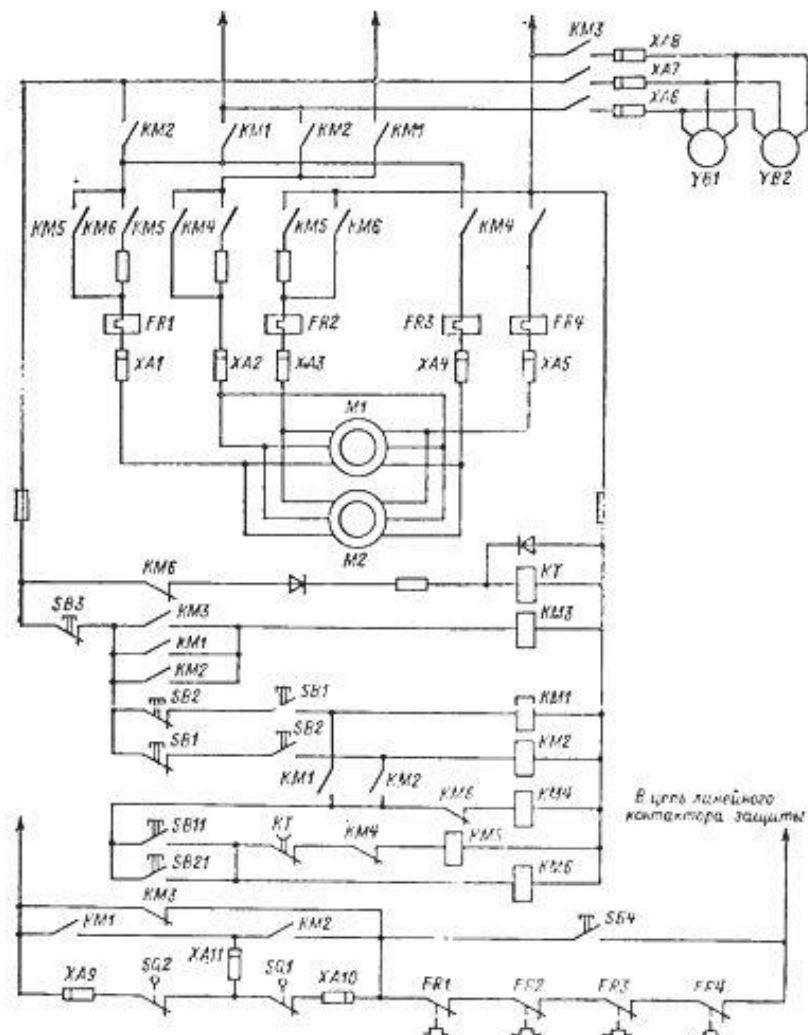
Рисунок 1.4 – Механическая характеристика к схеме электропривода (с двухскоростным короткозамкнутым двигателем) механизма передвижения крана при управлении с пола

При отключении двигателя от сети привод тормоза продолжает получать питание и имеет место свободный выбег. Электрическое торможение может быть осуществлено при переходе с большой скорости на малую. Для отключения тормоза достаточно нажать кнопку SB3.

При срабатывании конечной защиты за счет размыкания линейного контактора защитной панели происходит отключение электродвигателя и наложение механического тормоза. Механизм тормозится с максимальной интенсивностью.

Благодаря применению резисторов в цепи быстроходной обмотки осуществляется сравнительно плавный пуск под контролем реле времени КТ, однако тормозной момент тихоходной обмотки не ограничивается, и в этом

случае плавность торможения может быть достигнута несколькими импульсными включениями кнопки SB1 или SB2.

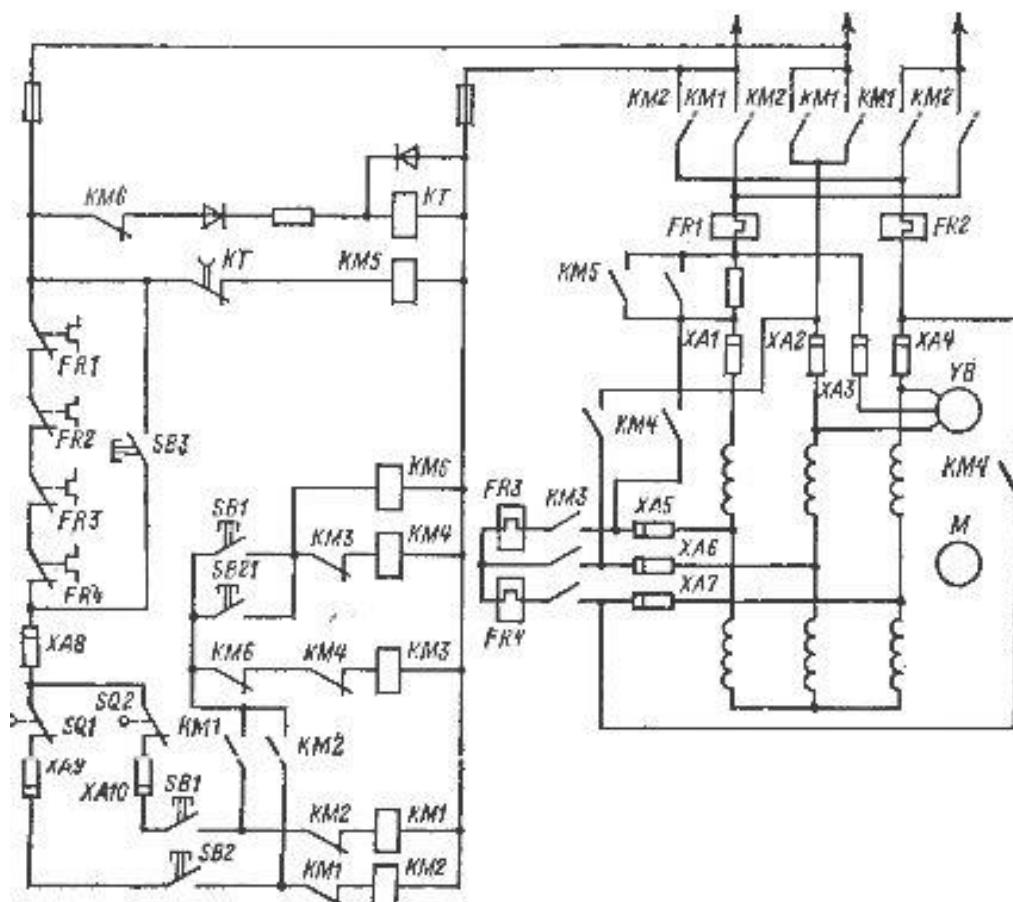


M1, M2 — электродвигатели, YB1, YB2 — приводы тормозов, KM1, KM12 — контакторы направления движения, KM3 — контактор тормозов, KM4 — контактор малой скорости, KM5 — контактор большой скорости, KM6 — контактор резисторов в цепи статора, FR1, FR2, FR3 — тепловые реле, KT — реле времени контроля пуска, SQ1, SQ2 - конечные выключатели, SB1, SB2 — кнопки направления движения (двухходовые): SB11, SB21 — кнопки большой скорости (второе положение кнопок SB1, SB2), SB3 — кнопка прекращения свободного выбега, SB4 — кнопка шунтирования тепловой защиты, XA1-XЛ11 — контакты токопереходных троллеев

Рисунок 1.5 – Схема электропривода (с двухскоростным короткозамкнутым двигателем) механизма передвижения крана при управлении с пола

На рисунке 1.6 представлена схема механизма передвижения мостового крана с использованием двухскоростного двигателя без свободного выбега.

Схема отличается от рассмотренной последовательным включением тихоходной и быстроходной обмоток и некоторым ограничением тормозного момента при последовательном включении обмоток. Схема рекомендуется для мостовых кранов, эксплуатирующихся на открытом воздухе.

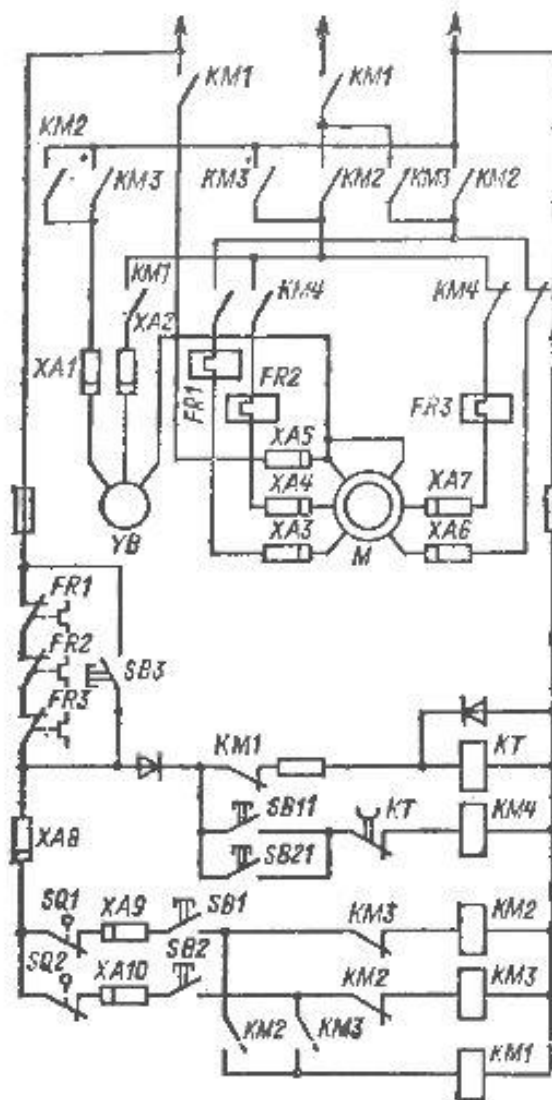


М — электродвигатель, YB — привод тормоза, KM1, KM2 — контакторы направления движения, KM3 — контактор малой скорости, KM4 — контактор большой скорости, KM5 — контактор резистора большой скорости, KT — реле контроля времени пуска, FR4 — тепловые реле, SQ1, SQ2 — конечные выключатели, SB1, SB2 — кнопки направления движения, SB11, SB21 — кнопки большой скорости, SB3 — кнопка шунтирования тепловых реле, XA1-XA10 — контакты токопереходных троллеев

Рисунок 1.6 – Схема электропривода (с двухскоростным короткозамкнутым двигателем) механизма передвижения крана

При нажатии кнопки SB11(SB21) получает питание катушка контактора KM4, происходит переключение с малой скорости на большую при минимальном перерыве питания. При этом не может быть положения, когда быстроходная и тихоходная обмотки отключены. Переход с тихоходной обмотки на быстроходную происходит под контролем реле времени KT. При срабатывании конечной защиты происходит двойное отключение обмоток

двигателя и тормоза.



М — электродвигатель, YB — обмотка тормоза, KM1 — лилейный контактор, KM2— KM3—контакторы направления движения, KM4 — контактор переключения скоростей, FR1—FR3 — тепловые реле, КТ — реле контроля разгона, SQ1, SQ2— конечные выключатели, SB1, SB2 — кнопки направления (двухходовые). SB3 — кнопка шунтирования тепловых реле, SB11, SB21 — кнопки большой скорости (второе положение кнопок SB1, SB2), XA1 - XA10 — контакты токопереходных троллеев.

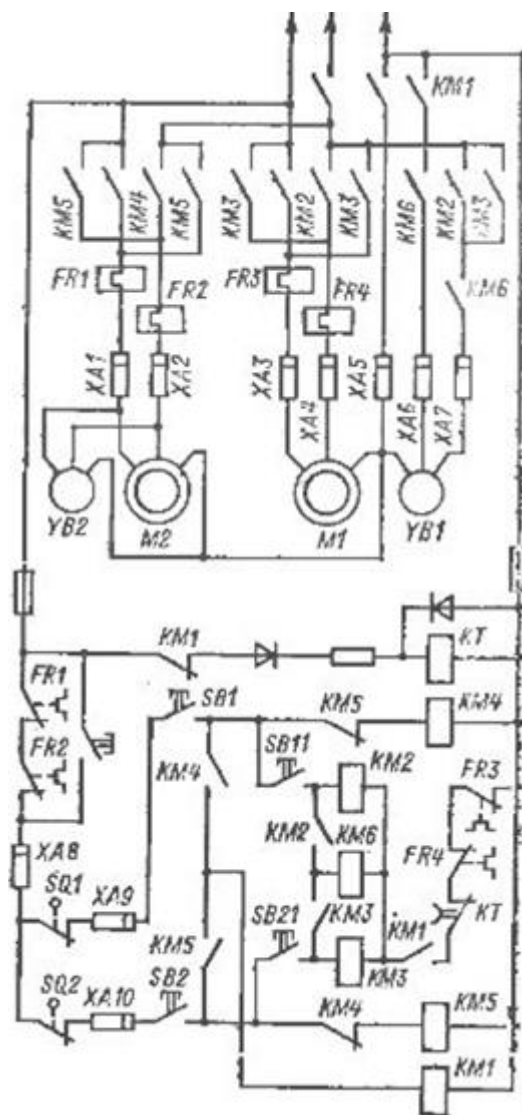
Рисунок 1.7 – Схема электропривода (с двухскоростным короткозамкнутым двигателем) механизма подъема при управлении с пола

На рисунке 1.7 представлена схема управления электроприводом подъема с использованием двухскоростного короткозамкнутого электродвигателя с двумя независимыми обмотками с соотношением чисел полюсов 4/24 и 6/16. Схема построена по принципу двойного разрыва двумя

независимыми аппаратами главной цепи обмоток электродвигателя и цепей привода тормоза, что обеспечивает необходимую надежность привода подъема.

Тихоходная обмотка электродвигателя получает питание через контакты линейного контактора КМ1, контакты контакторов направления КМ2, КМ3 и размыкающие контакты контактора КМ4 после нажатия соответствующей кнопки SB1, SB2 (первое положение).

На рисунке 1.8 представлена схема электропривода механизма подъема с двумя короткозамкнутыми электродвигателями, соединенными между собой и с редуктором через планетарную передачу с передаточным числом 6—8. Электродвигатель малой скорости М2 включается на все время работы механизма. Электродвигатель большой скорости включается на время работы большой скорости. Электродвигатель малой скорости имеет встроенный тормоз.



М1 — электродвигатель большой скорости, М2 — электродвигатель

малой скорости, YB1 — обмотка тормоза большой скорости, YB2 — обмотка тормоза двигателя малой скорости, KM1 — линейный контактор, KM2—KM3 — контакторы направления большой скорости, KM4, KM5 — контакторы направления малой скорости, KM6—контактор тормоза большой скорости, KT — реле контроля времени пуска, SQ1, SQ2 — конечные выключатели, FR1—FR4 — тепловые реле, SB1, SB2-двухходовые кнопки направления, SB11, SB21 — кнопки большой скорости (второе положение кнопок SB1, SB2), XA1— XA10 — контакты токопереходных троллеев.

Рисунок 1.8 – Схема электропривода механизма подъема при управлении с пола

Электродвигатель большой скорости имеет отдельный тормоз с приводом от электрогидравлического толкателя. При нажатии кнопки направления SB1(SB2) получает питание катушка контактора KM4 (KM5) и включается электродвигатель малой скорости. Одновременно включается общий линейный контактор KM1.

При нажатии кнопки SB1(SB2) до упора замыкаются контакты SB11(SB21), получают питание катушки контактора KM2(KM3) и KM6, но после того как истечет время пуска на малой скорости под контролем реле KT, включается двигатель большой скорости.

При замедлении подъема или спуска после отключения двигателя большой скорости затормаживание до малой скорости осуществляется тормозом YB1. После срабатывания конечных выключателей SQ1 и SQ2 происходит отключение электропривода с двойным разрывом цепи двигателя и приводов тормозов.

Все описанные схемы в соответствии обеспечивают включение механизмов крана при управлении с пола только при постоянном нажатии на кнопку. При отключении любого вида защиты механизм останавливается вне зависимости от состояния кнопочного аппарата управления.

Рассмотренные схемы рисунков 1.4, 1.5, 1.7 могут быть скомпонованы из стандартных магнитных пускателей типа ПМА, ПМЛ и реле времени. Исключение составляет схема изображенная на рисунке 1.2, в которой в качестве контактора переключения скоростей используется контактор постоянного тока МК1-22, 40 А, 380 В, катушка 220 В. По указанным схемам разрабатываются панели управления для двигателей передвижения мощностью от 0,8 до 2х8,5 кВт и панели управления для двигателей подъема мощностью от 10 до 22 кВт.

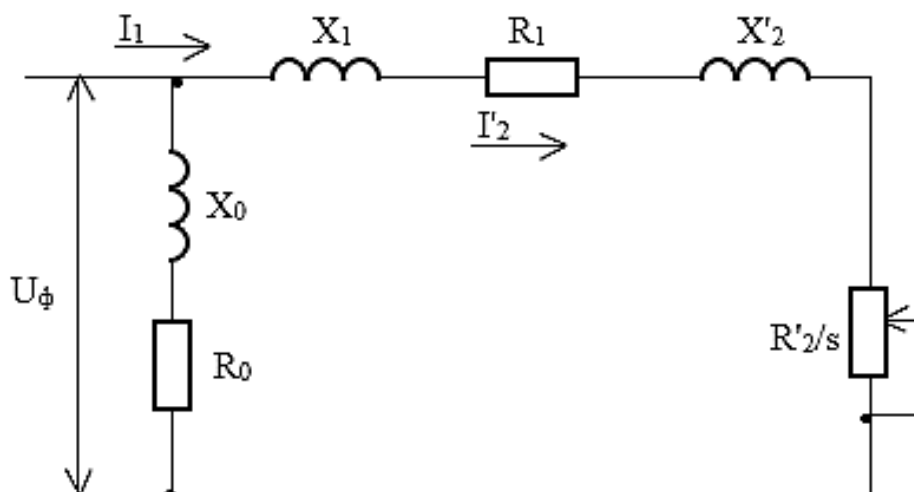
2. Расчет механических характеристик частотно-регулируемого электропривода

2.1 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1=50$ Гц)

Под механическими характеристиками понимаем зависимость частоты вращения ротора от момента на валу. Механические характеристики используем для анализа статического и динамического режимов электроприводов.

Расчет произведен на основе [17]. Для вывода уравнения механической характеристики асинхронного двигателя нужно изобразить его Г-образную упрощенную схему замещения в статических режимах [17], которая изображена на рисунке 2.1.

При данной схеме замещения контур намагничивания подключают к зажимам питающего напряжения, что не вносит существенных изменений, которые могут повлиять на точность расчетов.



U_ϕ – первичное напряжение; I_1 – фазный ток статора; I'_2 – приведенный ток статора; X_1 и X'_2 – первичное и вторичное приведенные реактивные сопротивления рассеяния; R_0 и X_0 – активное и реактивное сопротивления контура намагничивания; s – скольжение двигателя; R_1 и R'_2 – первичное и вторичное приведенные активные сопротивления.

Рисунок 2.1 – Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя

Расчет проводится в абсолютных величинах, следовательно, нужно привести относительные параметры двигателя к абсолютным величинам.

Для расчета механической характеристики из справочника [27] берутся основные технические данные электродвигателя соединяющего ленточного конвейера (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Параметры асинхронного двигателя 4АА56В4У3

Мощность P_H , кВт	0,18
Номинальный ток I_H , А	0,427
Номинальное напряжение U_H , В	380
Синхронная скорость вращения n_H , об/мин	1500
Номинальная скорость вращения n , об/мин	1366
Главное индуктивное сопротивление, $X_{\text{нотн}}$	1,3
Активное сопротивление статора $R_{1\text{отн}}$, о.е.	0,18
Реактивное сопротивление статора $X_{1\text{отн}}$, о.е.	0,09
Активное сопротивление ротора $R'_{2\text{отн}}$, о.е.	0,16
Реактивное сопротивление ротора $X'_{2\text{отн}}$, о.е.	0,17
$\cos\varphi$	0,64
КПД, %	64
Номинальное скольжение $s_{\text{ном}}$, %	8,9
Критическое скольжение s_k , %	50,5
Отношение начального пускового момента к номинальному, $m_{\text{п}}=M_{\text{п}}/M_H$	2,1
Отношение минимального момента к номинальному, $m_{\text{м}}=M_{\text{мин}}/M_H$	1,5
Отношение максимального момента к номинальному, $m_k=M_k/M_H$	2,2

Во-первых, находим номинальный ток электродвигателя:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_H \cos\varphi \eta}, \quad (2.1)$$

$$I_H = \frac{0,18 \cdot 10^3}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,64 \cdot 0,64} = 0,668 \text{ А.}$$

Затем производим расчет базового сопротивления:

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{\text{ф}}}{I_H}, \quad (2.2)$$

$$R_{\text{б}} = \frac{220}{0,668} = 329,34 \text{ Ом.}$$

где $U_{\text{ф}}$ – фазное напряжение сети, которое равно 220 В.

Чтобы найти сопротивления асинхронного двигателя в абсолютных единицах нужно их значения в относительных единицах умножить на полученное базовое сопротивление (формулы (2.3) и (2.4)):

$$R_n = R_{\text{нотн}} R_{\text{б}}, \quad (2.3)$$

$$X_n = X_{\text{нотн}} R_{\text{б}}, \quad (2.4)$$

$$R_1 = R_{1\text{отн}} R_{\text{б}} = 0,18 \cdot 329,34 = 59,28 \text{ Ом,}$$

$$X_1 = X_{1\text{отн}} R_6 = 0,09 \cdot 329,34 = 29,64 \text{ Ом},$$

$$R'_2 = R'_{2\text{отн}} R_6 = 0,16 \cdot 329,34 = 52,69 \text{ Ом},$$

$$X'_2 = X'_{2\text{отн}} R_6 = 0,17 \cdot 329,34 = 55,98 \text{ Ом},$$

$$X_\mu = X_{\mu\text{отн}} R_6 = 1,3 \cdot 329,34 = 428,142 \text{ Ом}.$$

При построении модели ПЧ-АД в программной среде Matlab, необходимы будут значения индуктивностей статора L_S , ротора L_R и главного индуктивного сопротивления L_μ . Определим их по следующей общей формуле:

$$L = \frac{X}{\omega}. \quad (2.5)$$

Далее рассчитываем значение индуктивностей по формуле (2.5):

$$L_S = \frac{X_1}{\omega},$$

$$L_S = \frac{29,61}{157} = 0,188 \text{ Гн},$$

$$L_R = \frac{X'_2}{\omega},$$

$$L_R = \frac{55,98}{157} = 0,356 \text{ Гн},$$

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega},$$

$$L_\mu = \frac{428,142}{157} = 2,727 \text{ Гн}.$$

Вращающий момент асинхронного электродвигателя, согласно схеме замещения, определяется следующим выражением:

$$M = \frac{3U_\phi^2 R'_2}{\omega_0 s \left[(R_1 + \frac{R'_2}{s})^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}. \quad (2.5)$$

Для расчета механической характеристики $M = f(s)$ необходимо применить формула Клосса, которая характеризует зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения. Формулу Клосса применяют в тех случаях, когда используется электропривод с асинхронным двигателем. Пользуясь данной формулой, можно легко построить график механической характеристики, ссылаясь только на паспортные данные асинхронного двигателя.

Формула Клосса выглядит следующим образом:

$$M_{\text{д}} = \frac{2M_k(1 + as_k)}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2as_k}. \quad (2.6)$$

Величина максимального (критического) момента двигателя M_k прямо пропорциональна квадрату напряжения, подводимого к статору, и определяется по следующей формуле:

$$M_k = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2} \right]}, \quad (2.7)$$

$$M_k = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157 \cdot (59,28 + \sqrt{59,28^2 + (29,64 + 55,98)^2})} = 2,83 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическое скольжение s_k , при котором двигатель развивает максимальный (критический) момент, рассчитывается как:

$$s_k = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}, \quad (2.8)$$

$$s_k = \frac{52,69}{\sqrt{59,28^2 + (29,64 + 55,98)^2}} = 0,506.$$

Угловая синхронная скорость ω_0 рассчитывается по следующей формуле:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30}, \quad (2.9)$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157 \text{ рад/с},$$

$$a = \frac{R_1}{R'_2}, \quad (2.10)$$

$$a = \frac{59,28}{52,69} = 1,125.$$

Если подставить рассчитанные параметры M_k , s_k и a в формулу (2.6) получим выражение естественной механической характеристики $M = f(s)$ электродвигателя:

$$M_D = \frac{8,881}{\frac{s^2 + 0,256}{0,506 \cdot s} + 1,125}.$$

Найдем номинальный момент двигателя по формуле (2.6), подставив в нее номинальное скольжение $s_{\text{НОМ}}$:

$$M_H = \frac{8,881}{\frac{0,089^2 + 0,256}{0,506 \cdot 0,089} + 1,125} = 1,271 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальным моментом называется момент, возникающий на валу двигателя при номинальной мощности и номинальных оборотах.

Для проверки вычислений, номинальный момент можно найти по другой формуле и сравнить значения:

$$M_{\text{НОМ}} = 9570 \cdot \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_c(1 - s_{\text{НОМ}})}, \quad (2.11)$$

$$M_{\text{НОМ}} = 9570 \cdot \frac{0,18}{1500 \cdot (1 - 0,089)} = 1,261 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Также необходимо найти начальный пусковой момент асинхронного двигателя по следующей формуле, когда скольжение $s = 1$:

$$M_{\text{п}} = \frac{2M_k(1 + as_k)s_k}{1 + s_k^2(1 + 2a)}, \quad (2.11)$$

$$M_{\text{п}} = \frac{2 \cdot 2,83 \cdot (1 + 1,125 \cdot 0,506) \cdot 0,506}{1 + 0,506^2 \cdot (1 + 2 \cdot 1,125)} = 2,56 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Важно учесть, чтобы пусковой момент был больше чем статический момент нагрузки, подключенной к валу двигателя.

Для построения естественной механической характеристики $\omega = f(M)$ рассчитываются значения угловой скорости для заданных величин скольжения по следующей формуле:

$$\omega = \omega_0 - \omega_0 s. \quad (2.11)$$

Задавая величину скольжения s от 0 до 1, определяют соответствующие моменты асинхронного двигателя и значение угловой скорости, после чего полученные значения заносятся в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_0=50$ Гц

s	0	0,089	0,1	0,2	0,3	0,4	0,506	0,6	0,7	0,8	0,9
M_d	0	$M_H = 1,271$	1,391	2,192	2,608	2,792	$M_K = 2,832$	2,815	2,748	2,66	$M_{II} = 2,56$
ω	157	143,027	141,3	125,6	109,9	94,2	77,558	62,8	47,1	31,4	15,7

2.2 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1= 40$ Гц)

Для расчета искусственной механической характеристики асинхронного двигателя при работе с другой частотой, нужно пересчитать индуктивные сопротивления схемы замещения для заданной частоты по следующей формуле:

$$X = \frac{f_n}{f_c} X_c, \quad (2.12)$$

где X – индуктивное сопротивление схемы замещения для заданной частоты f_n ;

f_c – номинальная частота питания асинхронного двигателя (50 Гц);

X_c – индуктивное сопротивление при номинальное частоте (50 Гц).

Далее определяем индуктивные сопротивления асинхронного электродвигателя для частоты $f_1=40$ Гц по формуле (2.12):

$$X_1 = \frac{40}{50} \cdot 29,64 = 23,712 \text{ Ом},$$

$$X'_2 = \frac{40}{50} \cdot 55,98 = 44,784 \text{ Ом}.$$

Так как нужно сохранять закон $U/f = \text{const}$, пересчитывается также и

напряжение сети по формуле:

$$U_{\phi n} = \frac{f_n}{f_c} U_{\phi}, \quad (2.13)$$

Подставим значения под формулу (2.13):

$$U_{\phi 1} = \frac{40}{50} \cdot 220 = 176 \text{ В.}$$

Определяем максимальный (критический) момент двигателя по формуле (2.7):

$$M_k = \frac{3 \cdot 176^2}{2 \cdot 125,6 \cdot (59,28 + \sqrt{59,28^2 + (23,712 + 44,784)^2})} = 2,468 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Критическое скольжение s_k рассчитывается по формуле (2.8):

$$s_k = \frac{52,69}{\sqrt{59,28^2 + (23,712 + 44,784)^2}} = 0,582.$$

Угловая скорость ω_0 рассчитывается по формуле:

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}, \quad (2.14)$$

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 40}{2} = 125,6 \text{ рад/с.}$$

Получаем выражение искусственной механической характеристики $M = f(s)$ асинхронного двигателя, подставляя рассчитанные параметры в формулу (2.6):

$$M_d = \frac{8,167}{\frac{s^2 + 0,3387}{0,582 \cdot s} + 1,31}.$$

Для построения искусственной механической характеристики $\omega = f(M)$ рассчитываются значения угловой скорости для заданных величин скольжения по формуле (2.11). Задаваясь величиной скольжения s от 0 до 1, определяются соответствующие моменты асинхронного двигателя и значение угловой скорости (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_1=40$ Гц

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,58	0,7	0,8	0,9	1
M_D	0	1,19	1,789	2,169	2,365	2,45	M_k = 2,467	2,442	2,393	2,331	M_n = 2,262
ω	$\frac{125,6}{6}$	113,	100,5	87,9	75,36	62,8	52,75	37,68	25,12	12,56	0

2.3 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1=30$ Гц)

Определяем индуктивные сопротивления асинхронного двигателя для частоты $f_2=30$ Гц по формуле (2.12):

$$X_1 = \frac{30}{50} \cdot 29,64 = 17,784 \text{ Ом},$$

$$X'_2 = \frac{30}{50} \cdot 55,98 = 33,588 \text{ Ом}.$$

Пересчитывается напряжение по формуле (2.13):

$$U_{\phi 2} = \frac{30}{50} \cdot 220 = 132 \text{ В}.$$

Определяем максимальный (критический) момент двигателя по формуле (2.7):

$$M_k = \frac{3 \cdot 132^2}{2 \cdot 94,2 \cdot (59,28 + \sqrt{59,28^2 + (17,784 + 33,588)^2})} = 2,015 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическое скольжение s_k рассчитывается по формуле (2.8):

$$s_k = \frac{52,69}{\sqrt{59,28^2 + (17,784 + 33,588)^2}} = 0,672.$$

Угловая скорость ω_0 рассчитывается по формуле (2.14):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 30}{2} = 94,2 \text{ рад/с}.$$

Получаем выражение искусственной механической характеристики $M = f(s)$ асинхронного двигателя, подставляя рассчитанные параметры в

формулу (2.6):

$$M_{\text{д}} = \frac{7,074}{\frac{s^2 + 0,451}{0,672 \cdot s} + 1,512}.$$

Для построения искусственной механической характеристики $\omega = f(M)$ рассчитаем значения угловой скорости для заданных величин скольжения по формуле (2.11). Задаваясь величиной скольжения s от 0 до 1, определяются моменты электродвигателя и значение угловой скорости (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_2=30$ Гц

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,67	0,8	0,9	1
$M_{\text{д}}$	0	0,844	1,369	1,686	1,868	1,965	2,007	$M_{\text{к}} = 2,015$	1,997	1,966	$M_{\text{п}} = 1,926$
ω	94,2	84,78	75,36	65,94	56,52	47,1	37,68	31,086	18,84	9,42	0

2.4 Механическая характеристика при законе $U/f=\text{const}$ ($f_1=20$ Гц)

Определяем индуктивные сопротивления асинхронного двигателя для частоты $f_3=20$ Гц по формуле (2.12):

$$X_1 = \frac{20}{50} \cdot 29,64 = 11,856 \text{ Ом},$$

$$X'_2 = \frac{20}{50} \cdot 55,98 = 22,392 \text{ Ом}.$$

Пересчитывается напряжение по формуле (2.13):

$$U_{\text{фз}} = \frac{20}{50} \cdot 220 = 88 \text{ В}.$$

Определяем максимальный (критический) момент двигателя по формуле (2.7):

$$M_{\text{к}} = \frac{3 \cdot 88^2}{2 \cdot 62,8 \cdot (59,28 + \sqrt{59,28^2 + (11,856 + 22,392)^2})} = 1,448 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Критическое скольжение $s_{\text{к}}$ рассчитывается по формуле (2.8):

$$s_k = \frac{52,69}{\sqrt{59,28^2 + (11,856 + 22,392)^2}} = 0,77.$$

Угловая скорость ω_0 рассчитывается по формуле (2.14):

$$\omega_0 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 20}{2} = 62,8 \text{ рад/с.}$$

Получаем выражение искусственной механической характеристики $M = f(s)$ асинхронного двигателя, подставляя рассчитанные параметры в формулу (2.6):

$$M_D = \frac{5,403}{\frac{s^2 + 0,5929}{0,77 \cdot s} + 1,7325}.$$

Для построения искусственной механической характеристики $\omega = f(M)$ рассчитываются значения угловой скорости для заданных величин скольжения по формуле (2.11).

Задавая величиной скольжения s от 0 до 1, определяются соответствующие моменты асинхронного двигателя и значение угловой скорости (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_3=20$ Гц

s	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,769	0,9	1
M_D	0	0,565	0,924	1,152	1,293	1,377	1,423	1,444	$M_k =$ 1,447	1,438	$M_n =$ 1,421
ω	62,8	56,52	50,24	43,96	37,68	31,4	25,12	18,84	14,507	6,28	0

На рисунке 2.2 изображены механические характеристики асинхронного двигателя при частотном регулировании скорости при законе управления $U/f = const$ для следующих частот: 50, 40, 30, 20 Гц. На рисунке наглядно видно, что с уменьшением частоты и питающего напряжения уменьшается угловая скорость и критический момент, следовательно, будет происходить снижение перегрузочной способности двигателя.

Данное явление объясняется влиянием падения напряжения на активных сопротивлениях статора. В современных электроприводах имеется компенсация этого падения напряжения при низких скоростях, степень которой можно регулировать. Обычно увеличение напряжения составляет 5-10% от напряжения, необходимого по закону $U/f = const$.

Обеспечение требуемого пускового момента особенно необходимо в

системе ПЧ-АД, так как здесь надо учитывать максимальный ток, допустимый для нормальной работы инвертора [17].

Чтобы повысить пусковой момент, необходимо увеличивать мощность преобразователя, что приведет к неустойчивой работе электродвигателя. Если, повысив мощность, не удастся получить требуемый пусковой момент, то надо повышать как мощность преобразователя частоты, так и мощность асинхронного двигателя.

Компенсация падения напряжения на активных сопротивлениях статора (IR-компенсация) применяется в большинстве современных преобразователях со скалярным управлением, что является важным при постоянном моменте нагрузки. При малой скорости двигателя и номинальном моменте нагрузки доля напряжения, приходящаяся на активные сопротивления статора, настолько велика, что оставшаяся часть напряжения, создающая магнитный поток, не обеспечивает необходимую перегрузочную способность. Поэтому в диапазоне малых частот следует отходить от закона управления U_1/f_1 , аппроксимируя ее несколькими отрезками прямых. Этот метод позволяет компенсировать падение перегрузочной способности. Метод IR-компенсации является приблизительным, не учитывает особенностей конкретного механизма. При его использовании иногда возникает перекомпенсация, которая приводит к большим броскам тока при пуске двигателя [21].

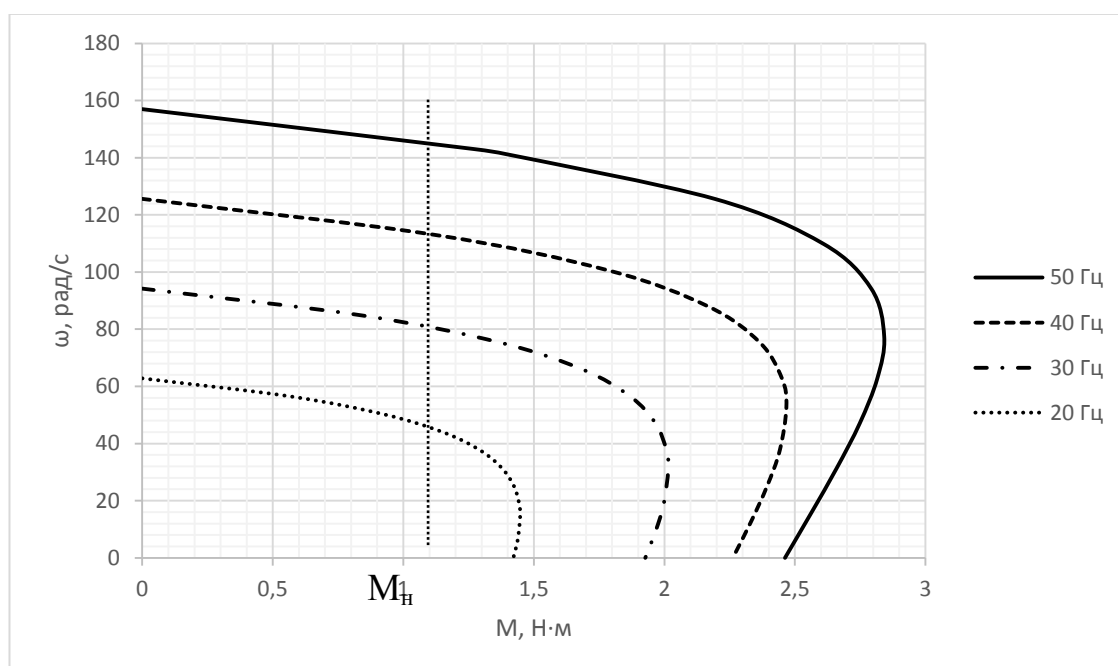


Рисунок 2.2 – Механические характеристики АД при частотном регулировании

Скольжение определяет различие между угловой скоростью вала двигателя и угловой частотой питающего напряжения. Иногда требуется

обеспечить работу механизма с заданной вручную скоростью. При такой задаче можно задать только частоту питающего напряжения, а угловая частота двигателя будет определяться его нагрузкой.

При номинальной частоте питающего напряжения скольжение составляет около 3%, таким значением можно пренебречь. При снижении частоты питающего напряжения величина скольжения растет обратно пропорционально этой частоте и пренебрегать им уже нельзя, поэтому в преобразователях со скалярным управлением используется компенсация скольжения, которая основана на увеличении частоты питающего напряжения по сравнению с заданной. Наиболее простой и распространенный метод такой компенсации базируется на линейной аппроксимации рабочего участка механической характеристики АД и оценке момента нагрузки по измеренным значениям токов.

2.5 Механические характеристики с сохранением постоянства перегрузочной способности

Для того, чтобы работа асинхронного двигателя и электропривода в целом была надежной и кратковременные перегрузки не вызывали остановок двигателя, необходимо наличие перегрузочной способностью

Перегрузочной способностью асинхронного двигателя называется отношение максимального момента M_{max} к номинальному $M_{ном}$.

Для того чтобы исследовать свойства асинхронного двигателя при частотном регулировании нужно использовать Т-образную схему замещения [11], которая изображена на рисунке 2.3.

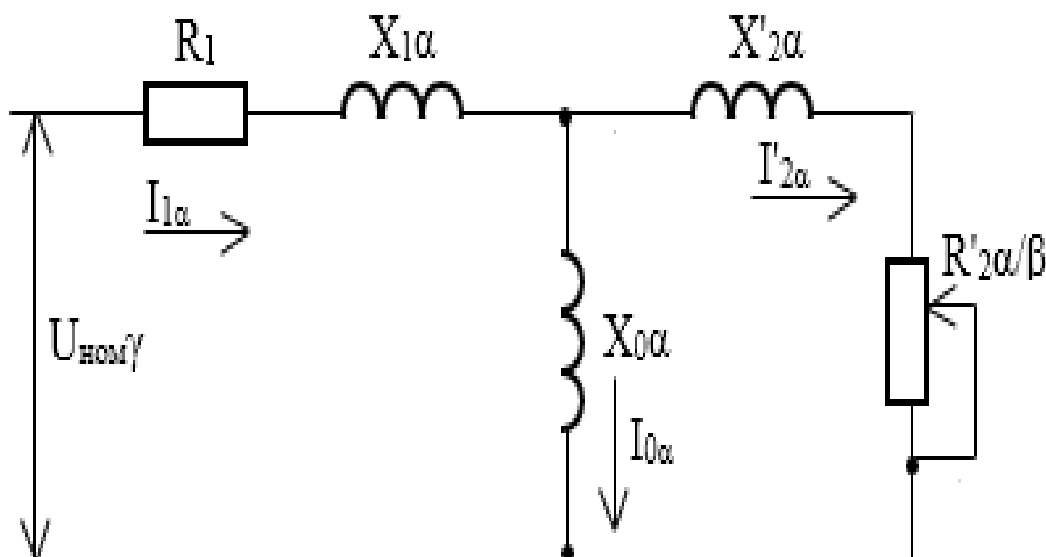


Рисунок 2.3 – Схема замещения асинхронного двигателя при частотном регулировании

За основу для расчетов воспользуемся известной технической литературой по электроприводу [17].

Существует три основных параметра при частотном регулировании:

а) относительная частота статора α , которая определяется как отношение частоты статора f_1 к ее номинальной частоте $f_{1н}$:

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1н}}. \quad (2.15)$$

б) параметр абсолютного скольжения β , который определяется как отношение абсолютного скольжения $\Delta\omega$ к синхронной скорости при номинальной частоте $\omega_{1н}$:

$$\beta = \frac{\Delta\omega}{\omega_{1н}} = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_{1н}} = \frac{f_s}{f_{1н}}. \quad (2.16)$$

Данный параметр используется вместо величины скольжения s и определяется следующей формулой:

$$s = \frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \frac{f_2 f_{1н}}{f_1 f_{1н}} = \frac{\beta}{\alpha}. \quad (2.17)$$

в) относительное напряжение, которое определяется формулой:

$$\gamma = \frac{U}{U_n}. \quad (2.18)$$

При частотном управлении по закону $U/f = const$ или $\gamma = \alpha$ при снижении частоты уменьшается максимальный момент двигателя, поэтому уменьшается жесткость механических характеристик, увеличиваются потери в двигателе, следовательно, надежность падает из-за уменьшения перегрузочной способности, при более низких частотах двигатель может и вовсе не запуститься.

При неизменном параметре абсолютного скольжения β , если снижается частота, то снижается и поток двигателя. Такое явление можно объяснить из соотношения между постоянным активным сопротивлением статора и другими эквивалентными сопротивлениями, если регулируется частота.

На величину потока и на его характер при изменении частоты сильно влияет вид закона регулирования напряжения. К магнитным потокам в асинхронном двигателе можно отнести: поток статора, поток ротора, поток магнитного рассеяния статорной обмотки, поток магнитного рассеяния роторной обмотки, полезный поток ротора.

При законе регулирования $\gamma = \alpha$, поток определяется следующей

формулой:

$$\dot{\Phi}_\alpha = \frac{U_H}{c_1 f_{1H}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_1}{\alpha Z(\beta)} + j \frac{R_1}{Z(\beta)}}. \quad (2.19)$$

Анализируя данную формулу, можно сказать, что при неизменном скольжении поток и момент двигателя убывают по мере снижения частоты.

Максимальный момент двигателя при заданной частоте, когда γ не зависит от β , то выражается как:

$$M_{k\alpha} = \frac{3U_H^2}{2\omega_{1H}} \gamma^2 \frac{1}{R_1 \alpha + \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}}. \quad (2.20)$$

Если приравнять отношение максимальных моментов при номинальной и при заданной частоте $M_{k\alpha} = M_{kH}$, то можно получить закон, по которому будет регулироваться напряжение:

$$\gamma = \frac{R_1 \alpha + \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}}{R_1 + \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + d^2)}}. \quad (2.21)$$

$$b = R_1(1 + \tau_2),$$

$$c = X_\mu \cdot \tau,$$

$$d = \frac{R_1}{X_\mu},$$

$$e = 1 + \tau_1, \quad (2.22)$$

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_\mu},$$

$$\tau_2 = \frac{X'_2}{X_\mu},$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1 \tau_2,$$

где τ_1 и τ_2 – коэффициенты рассеяния для статора и ротора;

τ – общий коэффициент рассеяния.

Произведем расчет для номинальной частоты $f_0 = 50$ Гц. Найдем относительную частоту статора α по формуле (2.15):

$$\alpha = \frac{50}{50} = 1.$$

Далее определяем другие коэффициенты по формуле (2.22):

$$b = 59,28 \cdot (1 + 0,1307) = 67 \text{ Ом},$$

$$c = 1,3 \cdot 329,34 \cdot 0,2087 = 89,35 \text{ Ом},$$

$$d = \frac{0,18}{1,3} = 0,1385,$$

$$e = 1 + 0,069 = 1,069,$$

$$\tau_1 = \frac{0,09}{1,3} = 0,069,$$

$$\tau_2 = \frac{0,17}{1,3} = 0,1307,$$

$$\tau = 0,069 + 0,1307 + 0,069 \cdot 0,1307 = 0,2087.$$

Тогда определяем закон, по которому будет регулироваться напряжение по формуле (2.21):

$$\gamma = \frac{R_1 \alpha + \sqrt{(b^2 + c^2 \alpha^2)(d^2 + e^2 \alpha^2)}}{R_1 + \sqrt{(b^2 + c^2)(d^2 + e^2)}} = 1.$$

Определяем максимальный момент двигателя при заданной частоте по формуле (2.20):

$$M_{k\alpha} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 157} \cdot \frac{1}{59,28 + \sqrt{(67^2 + 89,35^2)(0,1385^2 + 1,069^2)}} = 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

При уменьшении нагрузки, для того, чтобы убрать возрастание потока используют дополнительное регулирование функции нагрузки пропорционального $\sqrt{\mu}$.

В таком случае при заданной частоте критическое скольжение не меняется, а перегрузочная способность сохраняется неизменной при любой зависимости γ от α и β .

Механическую характеристику асинхронного двигателя можно описать следующей формулой:

$$M_{\alpha} = 2M_{k\alpha} \frac{1 + q(\alpha)\beta_k}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta} + 2q(\alpha)\beta_k}, \quad (2.23)$$

где $q(\alpha)$ – коэффициент, который зависит от параметров двигателя и частоты;

β_k – критическое скольжение.

Коэффициент $q(\alpha)$ можно найти по формуле:

$$q(\alpha) = \frac{R_1 \alpha}{R'_2 (d^2 + e^2 \alpha^2)}. \quad (2.24)$$

Если компенсировать падение напряжения на активном сопротивлении статора, регулируя напряжение не только функцией частоты, но и скольжением, то можно исключить его негативное воздействие.

Управление с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора от тока нагрузки с одновременным регулированием напряжения функции момента нагрузки является более распространенным способом.

При такой регулировке можно получить режимы, близкие к номинальным. Поэтому можно подобрать такой закон регулирования $\gamma(\alpha, \beta)$, при котором поток двигателя будет изменяться от частоты и скольжения по определенной зависимости.

Необходимо найти критическое скольжение:

$$\beta_k = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}}, \quad (2.25)$$

$$\beta_k = \frac{52,69}{\sqrt{59,28^2 + (29,64 + 55,98)^2}} = 0,5.$$

Далее строим механическую характеристику по следующим формулам и заносим данные в таблицу 2.6:

$$M_{\alpha}(\beta) = \frac{2M_{k\alpha}}{\frac{\beta}{\beta_k} + \frac{\beta_k}{\beta}}, \quad (2.26)$$

$$\omega = \omega_{1H} - \omega_{1H}\beta. \quad (2.27)$$

Произведем расчет для частоты $f_1 = 40$ Гц.

Найдем относительную частоту статора α по формуле (2.15):

$$\alpha = \frac{40}{50} = 0,8.$$

Таблица 2.6 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_0 = 50$ Гц

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,506	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M_D	0	1,084	1,944	2,488	2,751	$M_K = 2,819$	2,773	2,667	2,534	2,394	$M_{II} = 2,256$
ω	157	141,3	125,6	109,9	94,2	77,558	62,8	47,1	31,4	15,7	0

Далее определим другие коэффициенты:

$$b = 59,28 \cdot (1 + 0,104) = 65,44 \text{ Ом},$$

$$c = 1,3 \cdot 329,34 \cdot 0,1647 = 70,5 \text{ Ом},$$

$$e = 1 + 0,055 = 1,055,$$

$$\tau_1 = \frac{0,072}{1,3} = 0,055,$$

$$\tau_2 = \frac{0,136}{1,3} = 0,104,$$

$$\tau = 0,055 + 0,104 + 0,055 \cdot 0,104 = 0,1647.$$

Тогда определяем закон, по которому будет регулироваться напряжение по формуле (2.21):

$$\gamma = \frac{59,28 \cdot 0,8 + \sqrt{(65,44^2 + 70,5^2 \cdot 0,8^2) \cdot (0,1385^2 + 1,055^2 \cdot 0,8^2)}}{59,28 + \sqrt{(65,44^2 + 70,5^2) \cdot (0,1385^2 + 1,055^2)}} = 0,771.$$

Определяем максимальный момент двигателя при заданной частоте по формуле (2.20) и заносим значения в таблицу 2.7:

$$M_{k\alpha} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 125,6} \cdot 0,771^2 \times \frac{1}{59,28 \cdot 0,8 + \sqrt{(65,44^2 + 70,5^2 \cdot 0,8^2) \cdot (0,1385^2 + 1,055^2 \cdot 0,8^2)}} = 2,832 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Далее строим механическую характеристику по следующим формулам

(2.26 и 2.27).

Таблица 2.7 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_1 = 40$ Гц

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
M_α	0	0,945	1,74	2,306	2,643	2,799	$M_k = 2,83$	2,784	2,694	2,58	$M_n = 2,462$
ω	125,6	113	100,5	87,9	75,36	62,8	50,24	37,68	25,1	12,56	0

Произведем расчет для частоты $f_2 = 30$ Гц.

Найдем относительную частоту статора α по формуле (2.15):

$$\alpha = \frac{30}{50} = 0,6.$$

Далее определим другие коэффициенты:

$$b = 59,28 \cdot (1 + 0,078) = 64 \text{ Ом},$$

$$c = 1,3 \cdot 329,34 \cdot 0,123 = 52,66 \text{ Ом},$$

$$e = 1 + 0,0415 = 1,0415,$$

$$\tau_1 = \frac{0,054}{1,3} = 0,0415,$$

$$\tau_2 = \frac{0,102}{1,3} = 0,078,$$

$$\tau = 0,0415 + 0,078 + 0,0415 \cdot 0,078 = 0,123.$$

Тогда определяем закон, по которому будет регулироваться напряжение по формуле (2.21):

$$\gamma = \frac{59,28 \cdot 0,6 + \sqrt{(64^2 + 52,66 \cdot 0,6^2) \cdot (0,1385^2 + 1,0415^2 \cdot 0,6^2)}}{59,28 + \sqrt{(64^2 + 52,66^2) \cdot (0,1385^2 + 1,0415^2)}} = 0,547.$$

Определяем максимальный момент двигателя при заданной частоте по формуле (2.20) и заносим значения в таблицу 2.8:

$$M_{k\alpha} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 94,2} \cdot 0,547^2 \times$$

$$\times \frac{1}{0,18 \cdot 0,6 + \sqrt{(0,194^2 + 0,16^2 \cdot 0,6^2) \cdot (0,1385^2 + 1,0415^2 \cdot 0,6^2)}} =$$

$$= 2,838 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Далее строим механическую характеристику по следующим формулам (2.26 и 2.27).

Таблица 2.8 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_2 = 30$ Гц

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,67	0,8	0,9	1
M_α	0	0,826	1,55	2,112	2,494	2,718	2,819	$M_k = 2,838$	2,795	2,721	$M_n = 2,627$
ω	94,2	84,78	75,36	65,94	56,52	47,1	37,68	31,086	18,84	9,42	0

Произведем расчет для частоты $f_3 = 20$ Гц.

Найдем относительную частоту статора α по формуле (2.15):

$$\alpha = \frac{20}{50} = 0,4.$$

Далее определим другие коэффициенты:

$$b = 59,28 \cdot (1 + 0,052) = 62,36,$$

$$c = 1,3 \cdot 329,34 \cdot 0,081 = 34,68,$$

$$e = 1 + 0,0277 = 1,0277,$$

$$\tau_1 = \frac{0,036}{1,3} = 0,0277,$$

$$\tau_2 = \frac{0,068}{1,3} = 0,052,$$

$$\tau = 0,0277 + 0,052 + 0,0277 \cdot 0,052 = 0,081.$$

Определяем закон, по которому регулируется напряжение:

$$\gamma = \frac{59,28 \cdot 0,4 + \sqrt{(62,36^2 + 34,68^2 \cdot 0,4^2) \cdot (0,1385^2 + 1,0277^2 \cdot 0,4^2)}}{59,28 + \sqrt{(62,36^2 + 34,68^2) \cdot (0,1385^2 + 1,0277^2)}} =$$

$$= 0,355.$$

Определяем максимальный момент двигателя при заданной частоте по формуле (2.20) и заносим значения в таблицу 2.9:

$$M_{k\alpha} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 62,8} \cdot 0,386^2 \times$$

$$\times \frac{1}{59,28 \cdot 0,4 + \sqrt{(62,36^2 + 34,68^2 \cdot 0,4^2) \cdot (0,1385^2 + 1,0277^2 \cdot 0,4^2)}} =$$

$$= 2,833 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Таблица 2.9 – Момент двигателя и значение угловой скорости для частоты $f_3 = 20$ Гц

β	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,769	0,9	1
M_α	0	0,723	1,378	1,916	2,317	2,588	2,747	2,82	$M_k =$ 2,833	2,798	$M_n =$ 2,738
ω	62,8	56,52	50,24	43,96	37,68	31,4	25,12	18,84	14,507	6,28	0

Построим механическую характеристику по формулам (2.26 и 2.27).

Полученные характеристики для частот 50, 40, 30 и 20 изображены на рисунке 2.4.

Как видно из (рисунка 2.4), для поддержания достаточной перегрузочной способности во всем диапазоне регулирования необходимо при малых частотах уменьшать напряжение в меньшей степени, чем снижается частота. При этом будет наблюдаться одинаковый максимальный (критический) момент во всем диапазоне регулирования частот.

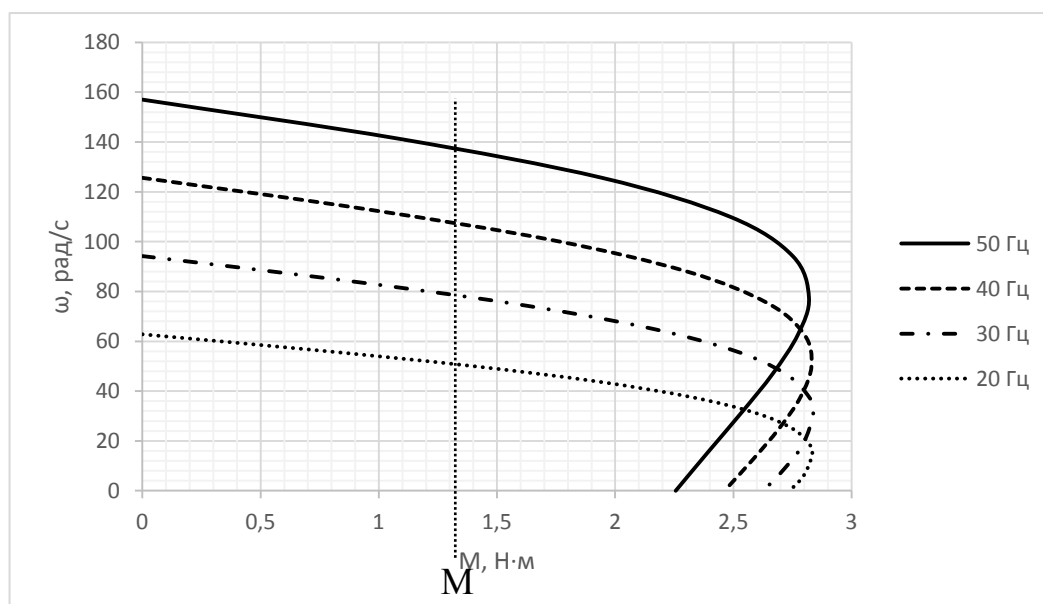


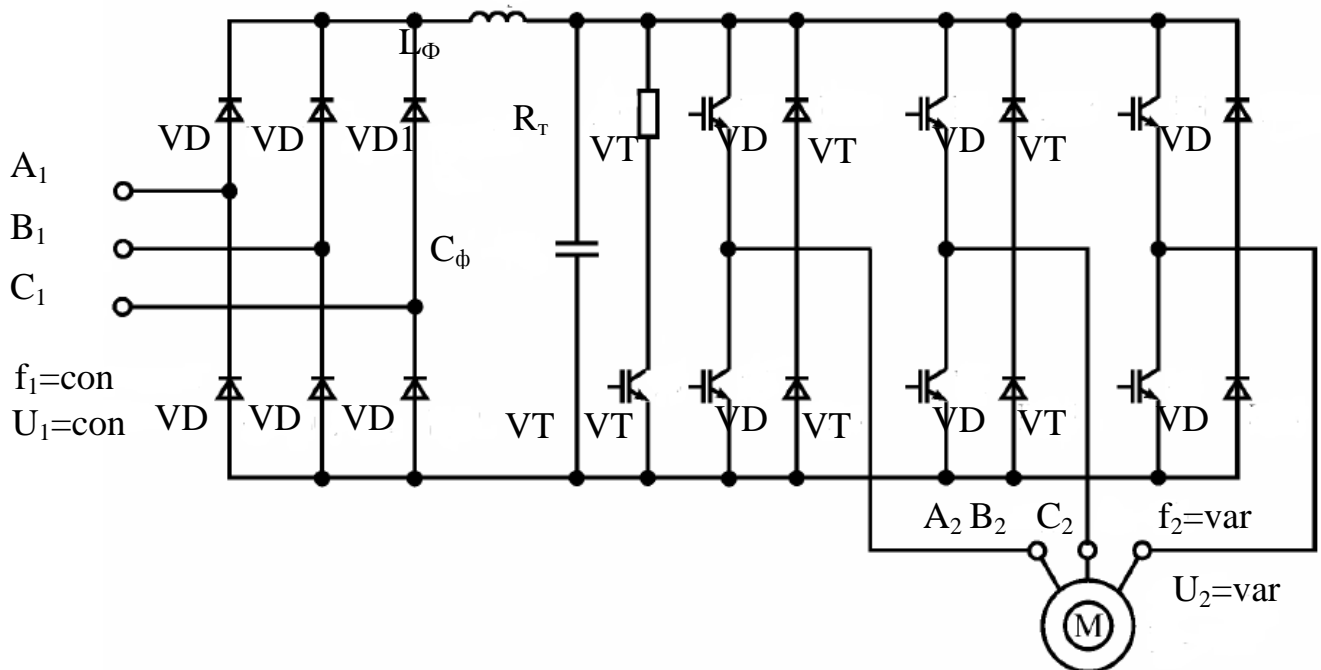
Рисунок 2.4 – Механические характеристики ПЧ-АД при постоянстве перегрузочной способности

3. Расчет и выбор элементов силовой схемы

3.1 Расчет силовых элементов инвертора и выпрямителя

На рисунке 3.1 изображена схема двухзвенного преобразователя частоты (ДПЧ) для питания асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Данный преобразователь частоты состоит из неуправляемого выпрямителя (НВ), автономного инвертора напряжения (АИН), сглаживающего фильтра (СФ) и блока тормозного резистора (БТР), применяемого в режиме торможения.

Работа неуправляемого выпрямителя основана на диодах VD7-VD12, автономный инвертор напряжения на транзисторах VT1-VT6, шунтированных диодами VD1-VD6. Диоды необходимы для пропускания тока, когда транзисторы выключены, они являются обратным выпрямителем в режиме торможения асинхронного двигателя. Фильтр $L_{\Phi}C_{\Phi}$ необходим для сглаживания напряжения при выпрямлении. За счет применения ШИМ осуществляется регулирование напряжение на выходе ПЧ и приближение его формы к синусоидальной. Торможение осуществляется переводом АИН в режим управляемого выпрямителя (УВ) напряжения, обеспечивающего повышение напряжения на конденсаторе фильтра, несмотря на уменьшение скорости вращения двигателя. Роль фазных индуктивностей выполняют индуктивности рассеяния фаз двигателя.



3.1 – Двухзвенный транзисторный преобразователь частоты с ШИМ

При превышении определенного значения напряжения на конденсаторе, транзистор VT7 включается и энергия, передаваемая от электрической машины, рассеивается в тормозном резисторе.

Такая схема в основном используется в электроприводах, где происходят редкие торможения, что и относится к электроприводу соединяющего ленточного конвейера.

Для начала необходимо рассчитать напряжение источника питания АИН с ШИМ согласно следующей формуле:

$$U_{и} = \frac{2\sqrt{2}U_{н}}{\sqrt{3}\mu_{max}}, \quad (3.1)$$

где $U_{н}$ – номинальное значение линейного напряжения на статоре двигателя;

μ_{max} – максимально допустимое значение коэффициента модуляции.

Для идеального АИН $\mu_{max} = 1$. В большинстве случаев $\mu_{max} < 1$, по той причине, что некоторую часть периода несущей частоты занимает коммутация. При использовании современных IGBT транзисторов несущая частота f_k достигает 16 кГц, а μ_{max} стремится к единице. Транзистор IGBT является трехэлектродным биполярным транзистором с изолированным затвором.

Коэффициент модуляции – отношение наибольшей длительности импульса выходного напряжения к межкоммутационному интервалу и его максимальное значение рассчитывается по формуле:

$$\mu_{max} = 1 - 4f_k t_{в}, \quad (3.2)$$

где $t_{в}$ – время выключения транзистора.

Тогда при $f_k = 2$ кГц максимальный коэффициент модуляции μ_{max} , рассчитанный по формуле (3.2) будет равен:

$$\mu_{max} = 1 - 4 \cdot 2 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6} = 0,992.$$

Отсюда напряжение источника питания АИН с ШИМ по формуле (3.1) будет равно:

$$U_{и} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 380}{\sqrt{3} \cdot 0,992} = 625,5 \text{ В.}$$

Далее производится расчет среднего значения тока через транзистор и диоды обратного тока. При больших кратностях отношения несущей частоты и частоты модуляции для расчета среднего значения тока через транзистор применяют следующую формулу:

$$I_{VT} = \frac{I_{st}}{2\pi} \left(1 + \frac{\pi\mu}{4} \cos\varphi_s \right), \quad (3.3)$$

где I_{st} – амплитудное значение тока статора двигателя;
 φ_s – угол сдвига фаз между первичными гармониками тока и напряжением нагрузки на выходе инвертора;

I_{VT} – среднее значение тока через транзистор.

Для расчета используем паспортные данные асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором 4AA56B4Y3 (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Паспортные данные асинхронного двигателя 4AA56B4Y3

Мощность P_H , кВт	Номинальный ток при 380 В I_H , А	Номинальная частота вращения n_H , об/мин	Коэффициент мощности, $\cos\varphi$
0,18	0,427	1500	0,64

Амплитудное значение тока статора рассчитывается по формуле:

$$I_{st} = \frac{P_H \sqrt{2}}{\sqrt{3} U_H \cos\varphi}, \quad (3.4)$$

$$I_{st} = \frac{0,18 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,64} = 0,604 \text{ А.}$$

Далее рассчитывается среднее значение тока через транзистор по формуле (3.3):

$$I_{VT} = \frac{0,604}{2 \cdot 3,14} \left(1 + \frac{3,14 \cdot 0,992}{4} \cdot 0,64 \right) = 0,144 \text{ А.}$$

Среднее значение тока через диоды обратного тока определяется по формуле:

$$I_{VD} = \frac{I_s}{2\pi} \left(1 - \frac{\pi\mu}{4} \cos\varphi_s \right), \quad (3.5)$$

$$I_{VD} = \frac{0,604}{2 \cdot 3,14} \left(1 - \frac{3,14 \cdot 0,992}{4} \cdot 0,64 \right) = 0,048 \text{ А.}$$

Выбор транзисторов и диодов АИН зависит от напряжения на входе инвертора с учетом перенапряжений, возникающих на компенсирующем конденсаторе в моменты, когда ток от АИН направлен к источнику питания, то есть при режиме торможения. Это напряжение выбирается исходя из допустимого перенапряжения конденсатора ΔU_c .

Расчетное значение напряжения на входе: $\Delta U_c = 100$ В, $U_{и} = 625,5$ В, $U_{VT} = 625,5$ В. При питании АИН от источника питания с односторонней проводимостью (от выпрямителя) при $\varphi_s > \pi/6$ возникает необходимость в установке на входе АИН компенсирующего конденсатора, который принимает энергию в моменты времени, когда ток направлен к источнику питания.

Емкость компенсирующего конденсатора фильтра определяется как:

$$C_{\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\mu I_s}{f_k \Delta U_c} \sin^2 \frac{\varphi_{s1} - \frac{\pi}{6}}{2}, \quad (3.6)$$

$$C_{\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{0,992 \cdot 0,604}{2 \cdot 10^3 \cdot 100} \cdot \sin^2 \frac{50,2 - 30}{2} = 0,07965 \text{ мкФ.}$$

Исследования показывают, что емкость компенсирующего конденсатора не зависит от выходной частоты. Это позволяет использовать АИН с ШИМ по синусоидальному закону для работы на весьма низких выходных частотах. Как видно по формуле (3.6), емкость компенсирующего конденсатора обратно пропорциональна несущей частоте.

Далее производится расчет тормозного резистора по формуле:

$$R_T = \frac{U_{и}}{I_{иmax}}, \quad (3.7)$$

где $I_{иmax}$ – максимальное значение постоянного тока, направленного во время торможения от АИН к выпрямителю.

Максимальное значение постоянного тока $I_{иmax}$ определяется по формуле:

$$I_{иmax} = \frac{3}{4} \mu I_s \cos \varphi_{s1}, \quad (3.8)$$

$$I_{иmax} = \frac{3}{4} \cdot 0,992 \cdot 0,604 \cdot 0,64 = 0,287 \text{ А.}$$

Теперь можно рассчитать тормозное сопротивление по формуле (3.7):

$$R_T = \frac{625,5}{0,287} = 2179 \text{ Ом.}$$

Выбор диодов неуправляемого выпрямителя производится по среднему значению тока через диод с учетом охлаждения и величины максимального обратного напряжения:

$$I_{dcp} = K_I \frac{I_d}{k_0 m}, \quad (3.9)$$

$$I_{dcp} = 2 \cdot \frac{1,281}{0,3 \cdot 3} = 2,846 \text{ A},$$

где K_I – коэффициент запаса по току, находится в диапазоне 2 – 2,5;
 $I_d = 3 \cdot I_H = 3 \cdot 0,427 = 1,281 \text{ A}$;
 $m=3$ – число фаз выходной обмотки трансформатора;
 k_0 – коэффициент учитывающий интенсивность охлаждения тиристора; $k_0 = 1$ при принудительном и $k_0 = 0,3 \div 0,35$ при естественном воздушном охлаждении со стандартным радиатором.

Величина максимального обратного напряжения:

$$U_{bmax} = k_z k_{01} U_{d0}, \quad (3.10)$$

$$U_{bmax} = 1,5 \cdot 1,065 \cdot 515 = 823 \text{ В},$$

где k_z – коэффициент запаса, по напряжению, учитывающий коммутационные всплески напряжения и возможное повышение напряжения в сети, $k_z = 1,5 \div 1,8$;

k_{01} – коэффициент обратного напряжения, зависящий от вида схемы, $k_{01} = 1,065$;

U_{d0} – напряжение выпрямителя при $\alpha=0$:

$$U_{d0} = 2,34 \cdot U_\phi = 515 \text{ В}.$$

Выбираем диод 2Д220И с соответствующими параметрами (класс 10 – 1000 В, предельный ток – 3 А).

3.2 Выбор серийного преобразователя частоты

На основе проведенных расчетов в главах 2 и 3 по каталогу выбран преобразователь частоты фирмы Siemens Micromaster 420, который в настоящее время наилучшим способом интегрируется в систему автоматизации Simatic.

За счет включения приводной техники в программу TIA (Totally Integrated Automation), обеспечивается удобство в проектировании, надежность в коммуникации и интегрированность в единый комплекс средств АСУ ТП (автоматизированные средства управления технологическими процессами).

В преобразователе Micromaster 420 используется метод высокочастотной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Функциональная

схема преобразователя изображена на рисунке 3.2.

В таблице 3.2 приведены технические характеристики данного частотного преобразователя [18].

Таблица 3.2 – Технические характеристики частотного преобразователя Micromaster 420

Параметр	Технические характеристики
Диапазон мощностей	250 Вт, 230 В 3 АС
Диапазон напряжений	208-240 В +/-10%
Входная частота	47-63 Гц
Коэффициент мощности	$\cos\phi > 0,7$
Пусковой ток	Не больше, чем номинальный
КПД	97%
Рабочая температура	- 10... + 50°C
Температура хранения	- 40... + 70°C
Допустимая относительная влажность воздуха	95% (без образования конденсата)
Степень защиты	IP20
Выходная частота	0-650 Гц
Разрешение выходной частоты	0,01 Гц
Перегрузочная способность	150% от номинального тока в течение 60 с
Способ регулирования	Вольт-частотный; линейный (U/f); квадратичный (U/f^2); прямое управление потоком FCC; произвольная настройка
Цифровые входы	3 (18 функций)
Аналоговый вход	0-10 В/ПИ-регулятор, разрешение 10 БИТ, может использоваться как цифровой вход
Аналоговый выход	0,4 – 20 мА, 500 Ом максимальная нагрузка, разрешение 10 Бит
Релейный выход	30 В DC 5А, 250 В AC 2А, параметрируемый
Интерфейс	RS 485
Способ торможения	1. Генераторное; 2. динамическое; 3. комбинированное
Быстрое ограничение тока	Входит в набор параметров
Функции защиты по:	1. пониженному напряжению; 2. перенапряжению; 3. перегрузке; 4. включению на землю; 5. короткому замыканию; 6. блокировке двигателя; 7. перегреву двигателя; 8. перегреву преобразователя
Регулятор	Встроенный ПИ-регулятор, встроенный источник питания для датчика ПИ-регулятора

Преобразователи оснащены микропроцессорным управлением и работают с современной технологией IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, биполярный транзистор с изолированным управляющим электродом).

Такая технология представляет собой каскадное включение двух электронных ключей: входной ключ на полевом транзисторе управляет мощным оконечным ключом на биполярном транзисторе. Управляющий

электрод является затвором, а два других – эмиттером и коллектором. За счет этого они являются надежными и многофункциональными.

Преобразователи частоты Micromaster применяются для регулирования скорости вращения низковольтных двигателей переменного тока с постоянным или квадратичным моментом нагрузки с нагрузкой постоянного типа (конвейеры, лифты, смесители) или вентиляторного типа (центробежные насосы, вентиляторы). Управление преобразователем частоты осуществляется с помощью набора параметров, позволяющих осуществить выбор, активизацию или запрет определенной функции, задание значения параметра, а также контролировать текущее значение параметра. Параметры можно изменять и устанавливать кнопками мембранной клавиатуры пульта управления преобразователя для настройки нужных свойств преобразователя, к которым можно отнести: время разгона, минимальные и максимальные частоты. Номера выбранных параметров и их установленные значения указываются на четырехзначном цифровом дисплее [18].

Micromaster 420 – частотный преобразователь, который отличается от остальных своей дружественной по отношению к пользователю структурой параметров, простым монтажом и вводом в эксплуатацию, а также простотой интеграции в системы автоматизации.

Электрическая схема подключения преобразователя частоты и электродвигателя к трем фазам схематично изображена на рисунке 3.3.

Так как задание оптимальных режимов работы частотно-регулируемого электропривода для максимального функционирования технологического процесса является сложным и требует от персонала обширных знаний всего процесса и оборудования, в преобразователях серии Micromaster Eco дополнительно выделены специально подобранные базовые параметры, настройка которых позволяет для большинства простых случаев применения быстро осуществить ввод регулируемого электропривода в эксплуатацию.

Вышеизложенный способ управления удобен на этапе ввода и в процессе эксплуатации для оперативного изменения настроек частотного преобразователя.

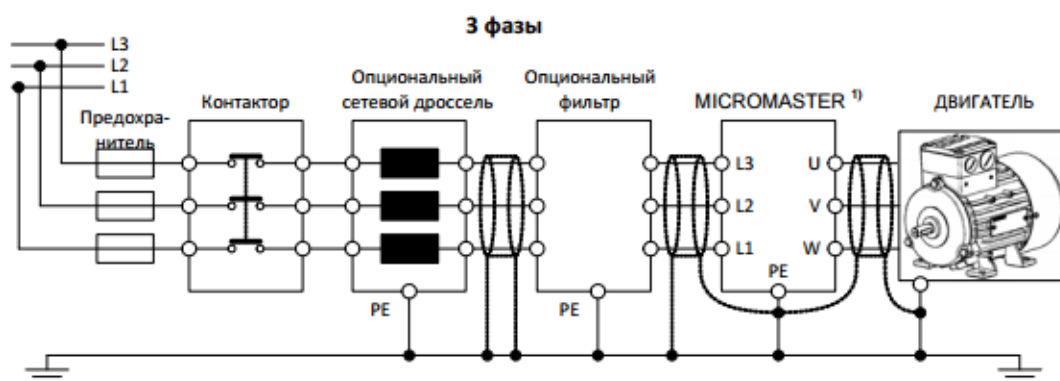


Рисунок 3.3 – Электрическая схема подключения Micromaster 420 и электродвигателя к сети.

Вышеизложенный способ управления удобен на этапе ввода и в процессе эксплуатации для оперативного изменения настроек частотного преобразователя. Для использования частотно-управляемого электропривода в составе автоматизированных систем управления тиристорными преобразователями (АСУ ТП) обеспечивается взаимосвязь преобразователя с другими элементами системы управления, таких как система ввода-вывода данных, включающая в себя дискретные и аналоговые входы и выходы, а также последовательные интерфейсы [18].

Такой преобразователь обладает рядом свойств и функций, которые в основном отсутствуют в других аналогичного класса, такие как:

- точно задаваемая характеристика U/f , позволяющая применить преобразователь для работы с асинхронными и синхронными двигателями;
 - 16 установок в расширенном режиме и более 100 в экспертном;
 - высокоэффективное динамическое торможение постоянным током и комбинированное торможение;
 - автоматический выбор частоты модуляции для бесшумной работы;
 - счетчик электрической энергии для измерения использованной электроэнергии.
- модульная конструкция.

Многие преобразователи такого класса используются в простых задачах позиционирования. При этом частотный преобразователь управляется сигналами, идущими от интегрируемых в рабочий механизм датчиков. Благодаря оптимизации программного обеспечения, достигнута высокая скорость реакции на внешние сигналы. Благодаря этому Micromaster 420 решает задачи позиционирования с необычной для данного класса точностью и скоростью. Оптимизирована скорость реакции и для аналоговых входов.

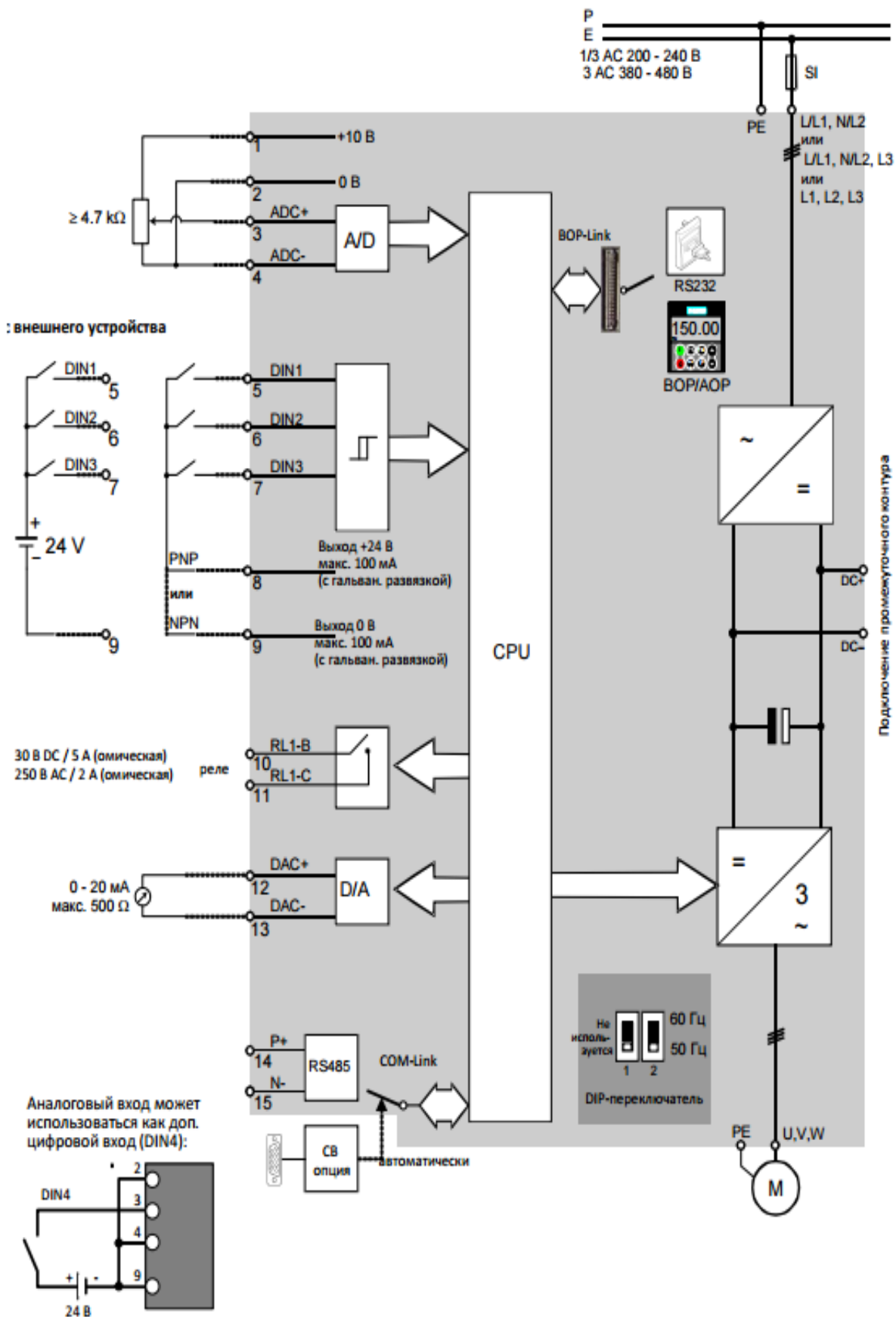


Рисунок 3.2 – Блок-схема Micromaster 420

4. Моделирование системы ПЧ-АД.

4.1 Математическая модель системы ПЧ-АД

При составлении математической модели ПЧ-АД, схема силовых цепей которого показана на рисунке 4.1, будет использоваться метод структурного моделирования, при котором будут выделены отдельные элементы.

К ним можно отнести АД, АИН с выходным реактором, неуправляемый выпрямитель с входным коммутирующим реактором и LC- фильтром на выходе [19].

Для модели асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором можно написать следующую систему скалярных уравнений:

$$u_{1u} = p\Psi_{1u} - \omega_k\Psi_{1v} + R_1i_{1u},$$

$$u_{1v} = p\Psi_{1v} + \omega_k\Psi_{1u} + R_1i_{1v},$$

$$0 = p\Psi_{2u} - (\omega_k - \omega_\omega)\Psi_{2v} + R_2i_{2u},$$

$$0 = p\Psi_{2v} + (\omega_k - \omega_\omega)\Psi_{2u} + R_2i_{2v},$$

$$\Psi_{1u} = \Psi_{0u} + L_{1\sigma}i_{1u},$$

$$\Psi_{1v} = \Psi_{0v} + L_{1\sigma}i_{1v},$$

$$\Psi_{2u} = \Psi_{0u} + L_{2\sigma}i_{2u},$$

$$\Psi_{2v} = \Psi_{0v} + L_{2\sigma}i_{2v},$$

(4.1)

$$\Psi_{0u} = L_0i_{0u},$$

$$\Psi_{0v} = L_0i_{0v},$$

$$i_{0u} = i_{1u} + i_{2u},$$

$$i_{0v} = i_{1v} + i_{2v},$$

$$M = \frac{3}{2}p_n(\Psi_{0u}i_{1v} - \Psi_{0v}i_{1u}),$$

$$p\omega_\omega = p_nJ^{-1}(M - M_c),$$

где $u_{1u}, u_{1v}, i_{1u}, i_{1v}, \Psi_{1u}, \Psi_{1v}$ – преобразованные напряжения, токи и полные потокосцепления обмотки статора;

$i_{2u}, i_{2v}, \Psi_{2u}, \Psi_{2v}$ – преобразованные токи и полные потокосцепления обмотки ротора;

$i_{0u}, i_{0v}, \Psi_{0u}, \Psi_{0v}$ – результирующие токи намагничивания и главные потокосцепления.

Насыщение магнитной цепи машины в модели АД учитывается переменным коэффициентом L_0 , который зависит от тока намагничивания и определяется как $L_0 = L_0(i_0)$, где i_0 – модуль результирующего вектора намагничивающих токов, $i_0 = (i_{0u}^2 + i_{0v}^2)^{1/2}$. При рассмотрении магнитной цепи коэффициент L_0 является константой [20].

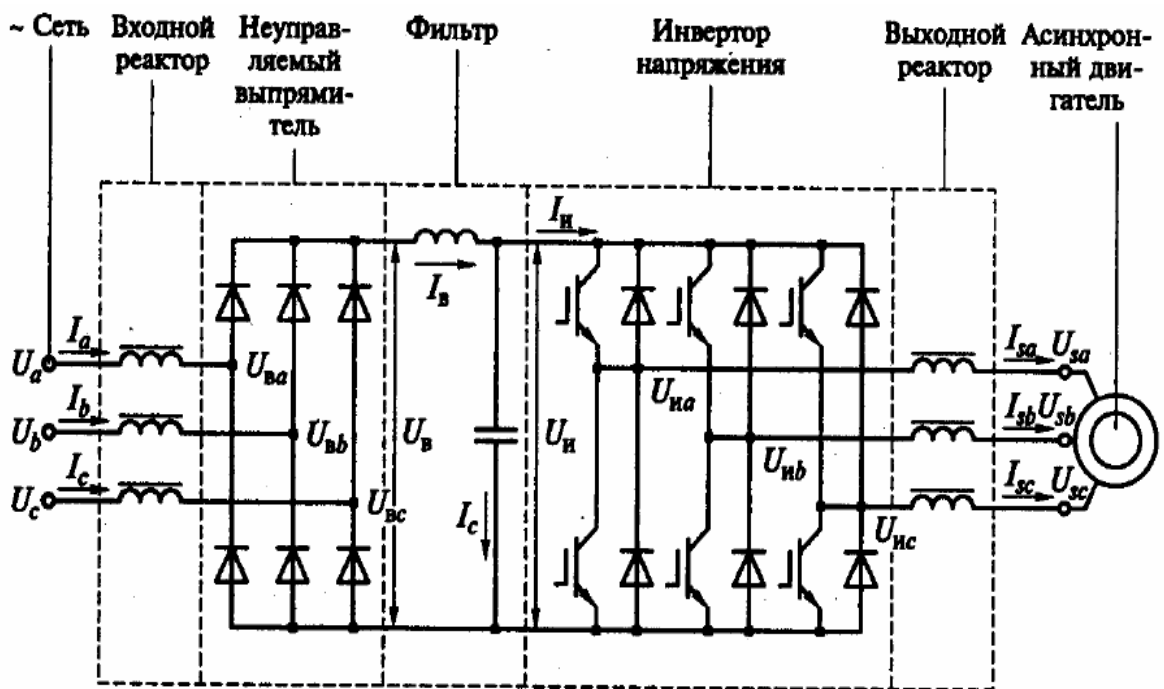


Рисунок 4.1 – Схема силовых цепей системы ПЧ-АД

АИН с ШИМ представляет собой сложное нелинейное дискретное устройство. Несущая частота АИН находится в диапазонах от 2 до 16 кГц, поэтому для построения математической модели АИН используется метод выделения полезных сигналов путем усреднения мгновенных значений переменных в пределах периода несущей частоты [29].

В этом случае инвертор напряжения будет описываться следующими уравнениями:

$$f_u = \frac{1}{2U_0} u_u^*,$$

$$f_v = \frac{1}{2U_0} u_v^*,$$

$$u_{иu} = u_{и}f_u, \quad (4.2)$$

$$u_{иv} = u_{и}f_v,$$

$$i_{и} = \frac{3}{2}(i_{1u}f_u + i_{1v}f_v),$$

где u_u^* , u_v^* – преобразованные задающие воздействия;
 f_u , f_v – усредненные коммутационные функции;
 U_0 – амплитуда опорного сигнала;
 $u_{и}$ – напряжение источника питания инвертора;
 $i_{и}$ – усредненный ток питания инвертора;
 $u_{иu}$, $u_{иv}$ – усредненные выходные напряжения инвертора;
 i_{1u} , i_{1v} – усредненные выходные токи инвертора.
Выходные реакторы выражается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} p i_{1u} &= L_{p.ВЫХ}^{-1}(u_{иu} + \omega_k L_{p.ВЫХ} i_{1v} - R_{p.ВЫХ} i_{1u} - u_{1u}), \\ p i_{1v} &= L_{p.ВЫХ}^{-1}(u_{иv} - \omega_k L_{p.ВЫХ} i_{1u} - R_{p.ВЫХ} i_{1v} - u_{1v}), \end{aligned} \quad (4.3)$$

где $R_{p.ВЫХ}$, $L_{p.ВЫХ}$ – активное сопротивление и индуктивность выходного реактора.

Чтобы выделить главные особенности неуправляемого выпрямителя используют математическую модель, которая отображает только основную гармонику коммутационной функции выпрямителя.

Математическая модель неуправляемого выпрямителя с входным реактором представляется следующей системой уравнений:

$$u_u = u_{Вu} + L_{p.ВХ} p i_u - \omega_k L_{p.ВХ} i_v + R_{p.ВХ} i_u,$$

$$u_v = u_{Вv} + L_{p.ВХ} p i_v - \omega_k L_{p.ВХ} i_u + R_{p.ВХ} i_v,$$

$$f_{Вu} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos(\theta_i - \theta_k),$$

$$f_{Вv} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \sin(\theta_i - \theta_k), \quad (4.4)$$

$$u_B = \frac{3}{2}(u_{Вu} f_{Вu} + u_{Вv} f_{Вv}),$$

$$i_u = i_B f_{Вu},$$

$$i_v = i_B f_{Bv},$$

$$\omega_k = p\theta_k,$$

где u_u, u_v, i_u, i_u – преобразованные основные гармоники напряжений и токов сети;

u_{Bu}, u_{Bv} – преобразованные основные гармоники напряжений на силовом входе неуправляемого выпрямителя;

f_{Bu}, f_{Bv} – преобразованные основные гармоники коммутационных функций неуправляемого выпрямителя;

θ_i – угол поворота обобщенного вектора коммутационной функции выпрямителя;

θ_k – угол поворота системы координат;

u_B, i_B – напряжение и ток на выходе выпрямителя;

$R_{p.вх}, L_{p.вх}$ – активное и индуктивное сопротивление входного реактора.

Модель LC-фильтра на выходе неуправляемого выпрямителя определяется линейными уравнениями вида:

$$pi_B = L_{p.ф}^{-1}(u_B - R_{p.ф}i_B - u_u),$$

$$pu_u = C_{б.ф}^{-1}i_c, \quad (4.5)$$

$$i_c = i_B - i_u,$$

где $R_{p.ф}, L_{p.ф}^{-1}$ – активное сопротивление и индуктивность сглаживающего реактора LC-фильтра;

$C_{б.ф}$ – емкость конденсаторной батареи фильтра;

i_c – ток конденсатора фильтра [19, с.36].

4.2 Виртуальная модель ПЧ- АД в программной среде Matlab

Matlab представляет собой пакет прикладных программ, предназначенных для решения задач технических вычислений. Matlab представляет собой высокоуровневый язык и интерактивную среду для программирования, численных расчетов и визуализации результатов. Данная программа является совокупностью семейства продуктов Mathworks и является главным инструментом решения широкого спектра научных и прикладных задач.

Управляющими воздействиями, изменяющими характеристики асинхронного двигателя, являются амплитуда (или действующее значение) переменного питающего напряжения, частота и амплитуда переменного напряжения сети, подводимого к статору.

Для того, чтобы смоделировать систему ПЧ-АД в программной среде Matlab, воспользуемся паспортными и расчетными данными асинхронного двигателя 4AA56B4У3 (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Необходимые данные для модели ПЧ-АД в Matlab

Мощность двигателя P , кВт	0,18
Номинальный ток I , А	0,427
Номинальное напряжение U , В	380
Частота сети f , Гц	50
Синхронная скорость вращения n , об/мин	1500
Число пар полюсов p	2
Динамический момент инерции J_d , кг·м ²	0,00079
Активное сопротивление статора R_S	0,18
Активное сопротивление ротора R_R	0,16
Индуктивность статора L_S , Гн	0,297
Индуктивность ротора L_R , Гн	0,558
Индуктивность главного индуктивного сопротивления L_{μ} , Гн	2,727
Напряжение источника инвертора, В	625,5
Емкость компенсирующего конденсатора, мкФ	0,07965
Сопротивление тормозного резистора, Ом	2179

Результатом моделирования ПЧ-АД являются осциллограммы выходного напряжения V_{ab} , токов i_{s_abc} , угловой скорости вращения ω_m и электромагнитного момента T_e асинхронного двигателя.

Виртуальная модель, построенная в программной среде Matlab изображена на рисунке 4.2.

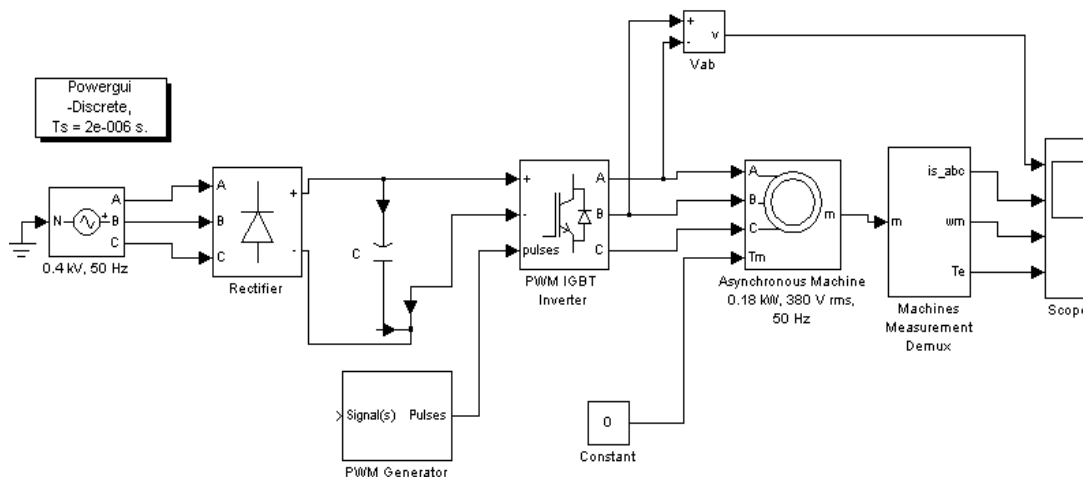


Рисунок 4.2 – Виртуальная модель ПЧ-АД

4.3 Осциллограммы процессов при пуске и набросе нагрузки

В программной среде Matlab исследуются переходные процессы при пуске и набросе нагрузки при разомкнутой системе управления, которая

изображена на рисунке 4.2, то есть при отсутствии обратной связи по скорости и напряжению.

На ниже представленных рисунках 4.4-4.8 изображены выходные сигналы напряжения V_{ab} , токов i_{s_abc} , угловой скорости вращения ω_m и электромагнитного момента T_e асинхронного двигателя при разных частотах (50,40,30, 20 Гц) и коэффициентах модуляции.

Анализируя полученные осциллограммы, можно сделать вывод, что до начала всех процессов все переменные были равны нулю, то есть существовали нулевые начальные условия. Электропривод разгоняется до номинальной скорости примерно за 0,2 секунды. После того, как был достигнут установившийся процесс, в промежутке времени 0,25-0,3 секунды осуществляется наброс момента нагрузки, при котором возрастают токи и момент, а скорость вращения понижается до определенного уровня. Примерно через 0,5 секунд после запуска двигателя возникает второй установившийся процесс. Для того, чтобы исследовать систему ПЧ-АД с постоянной перегрузочной способностью, необходимо коэффициент модуляции μ умножить на относительное напряжение γ . Пуск двигателя осуществляется при прямом включении электродвигателя на напряжение сети.

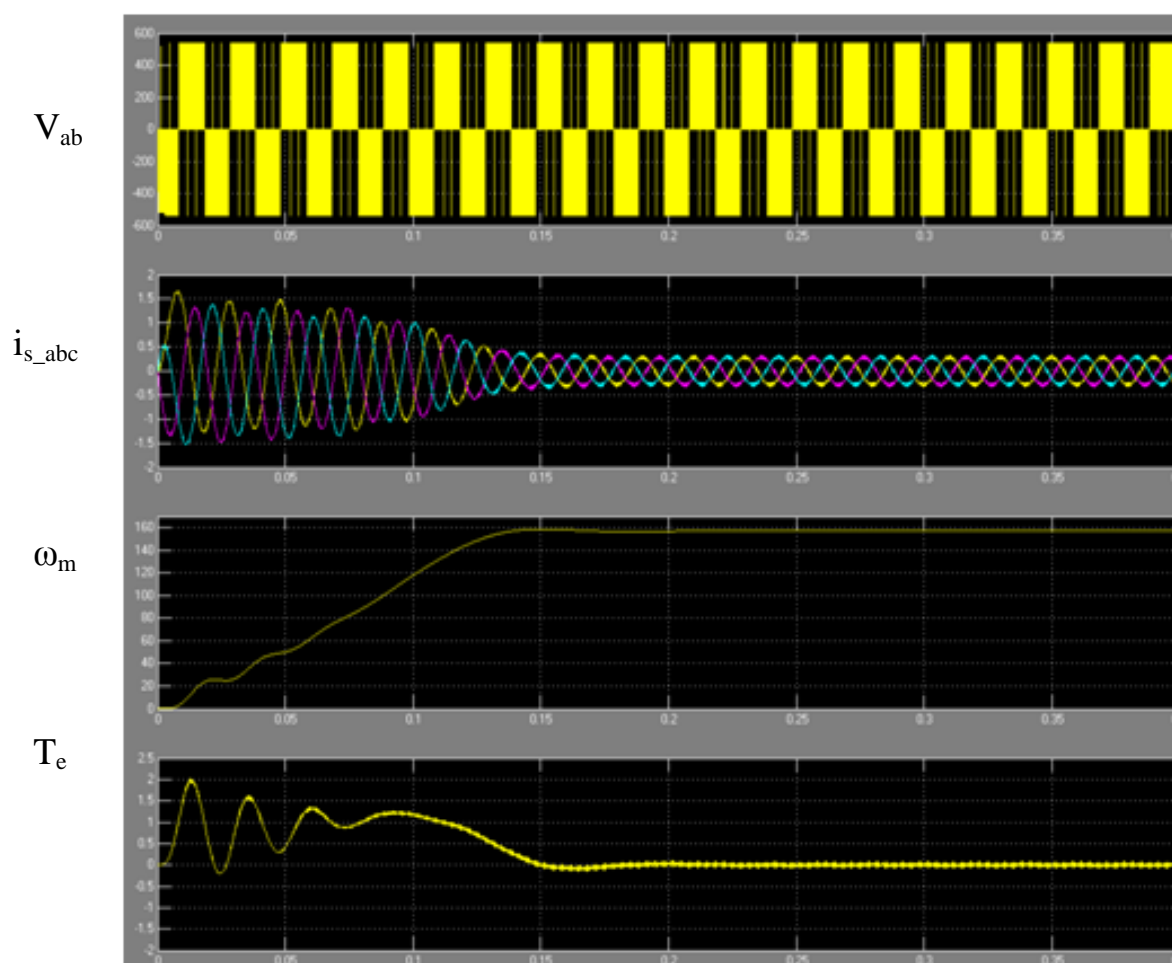


Рисунок 4.4 – Обычный пуск двигателя

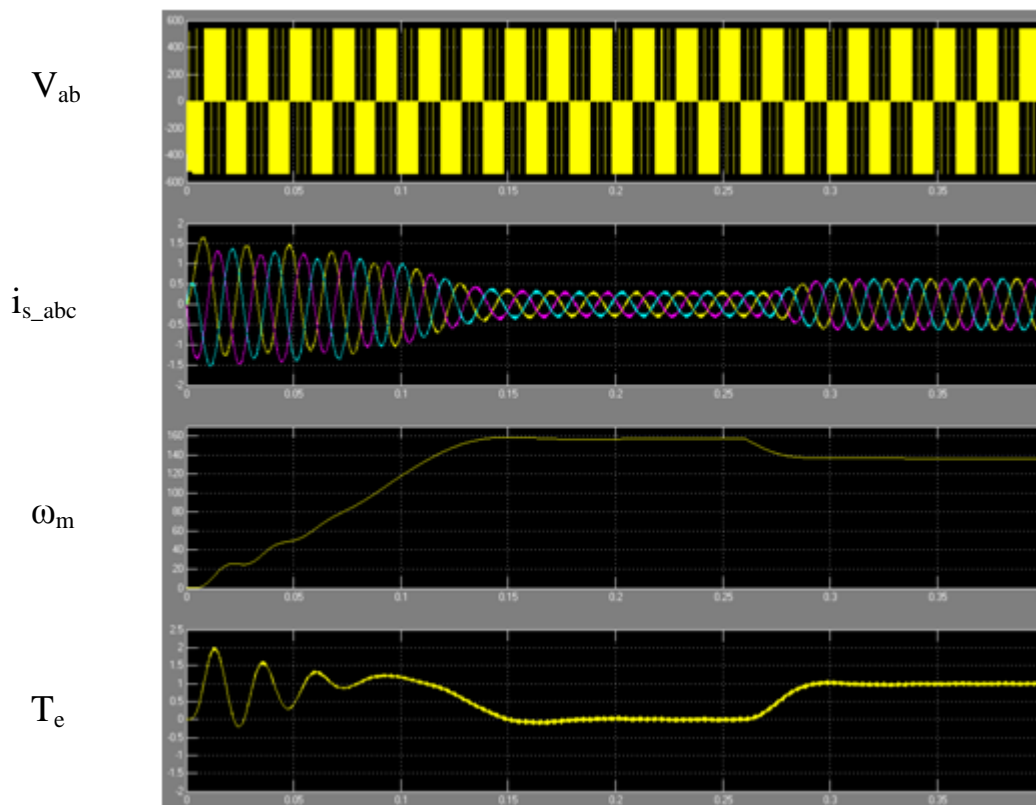


Рисунок 4.5 – Запуск двигателя и наброс номинальной нагрузки при 50 Гц

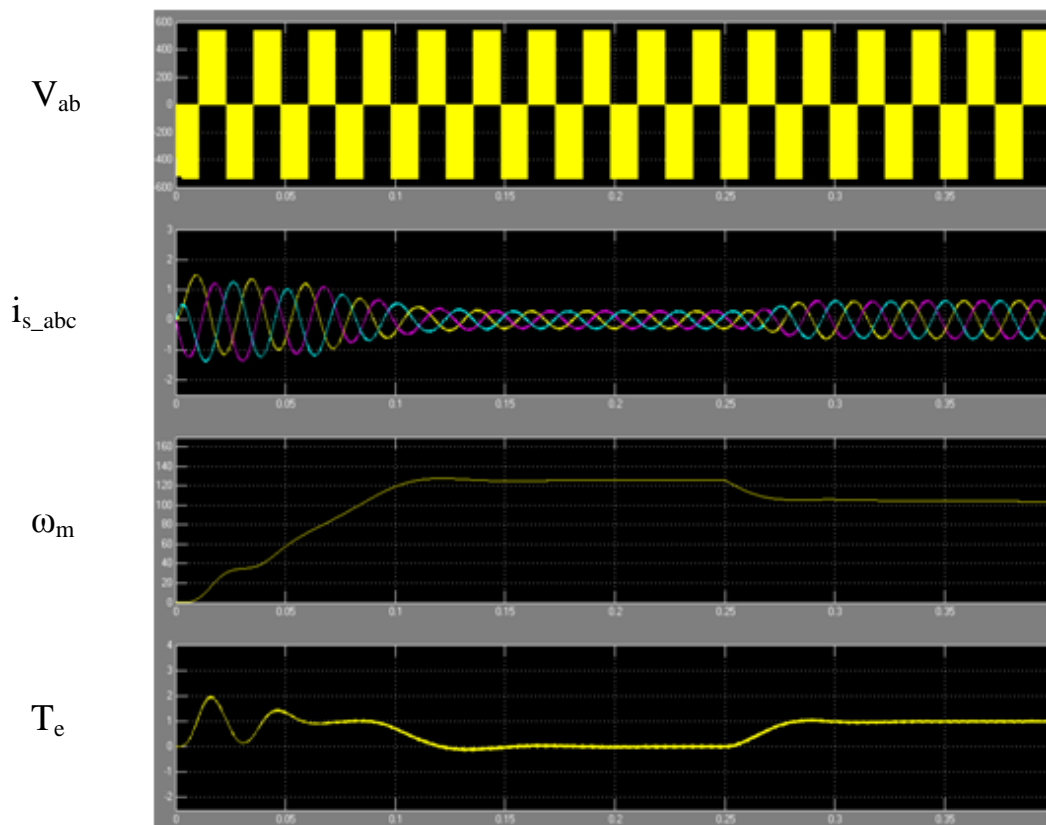


Рисунок 4.6 – Запуск двигателя и наброс нагрузки при 40 Гц

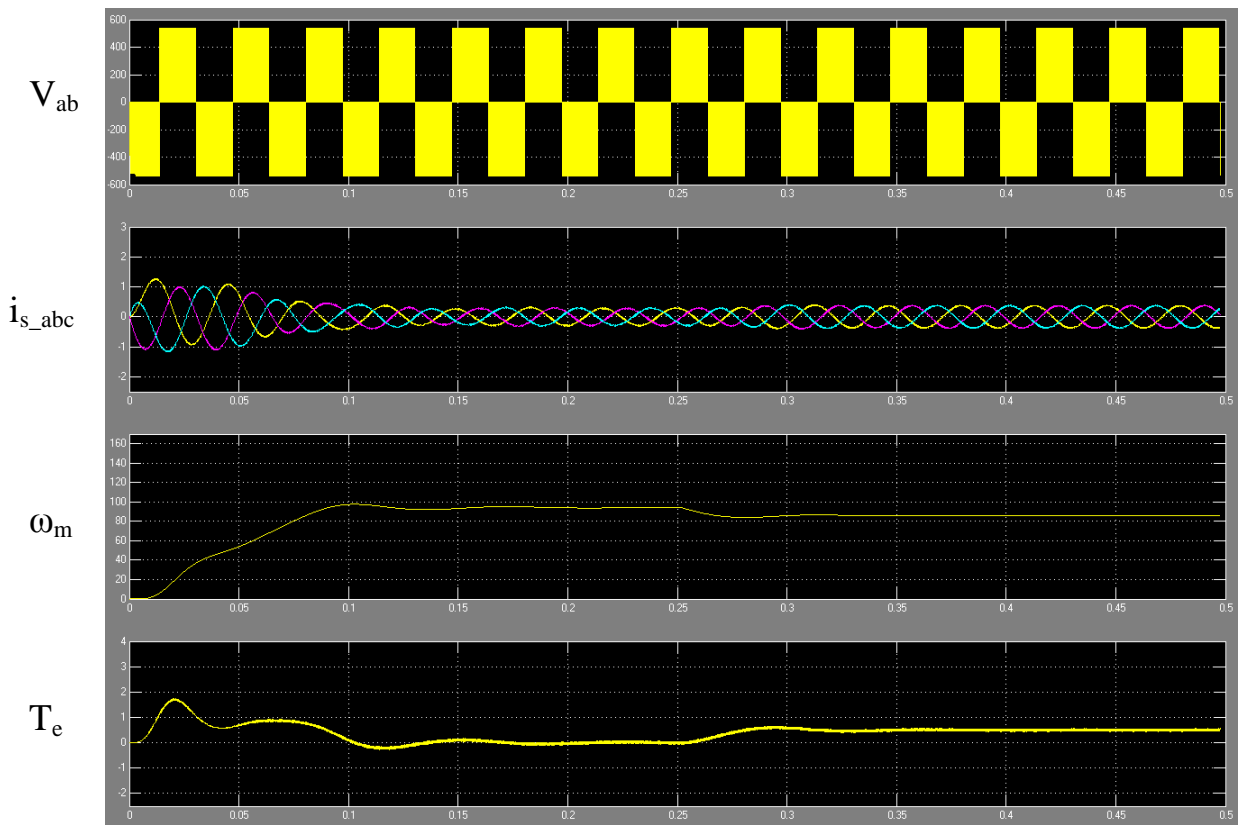


Рисунок 4.7 – Запуск двигателя и наброс 80% нагрузки при 30 Гц

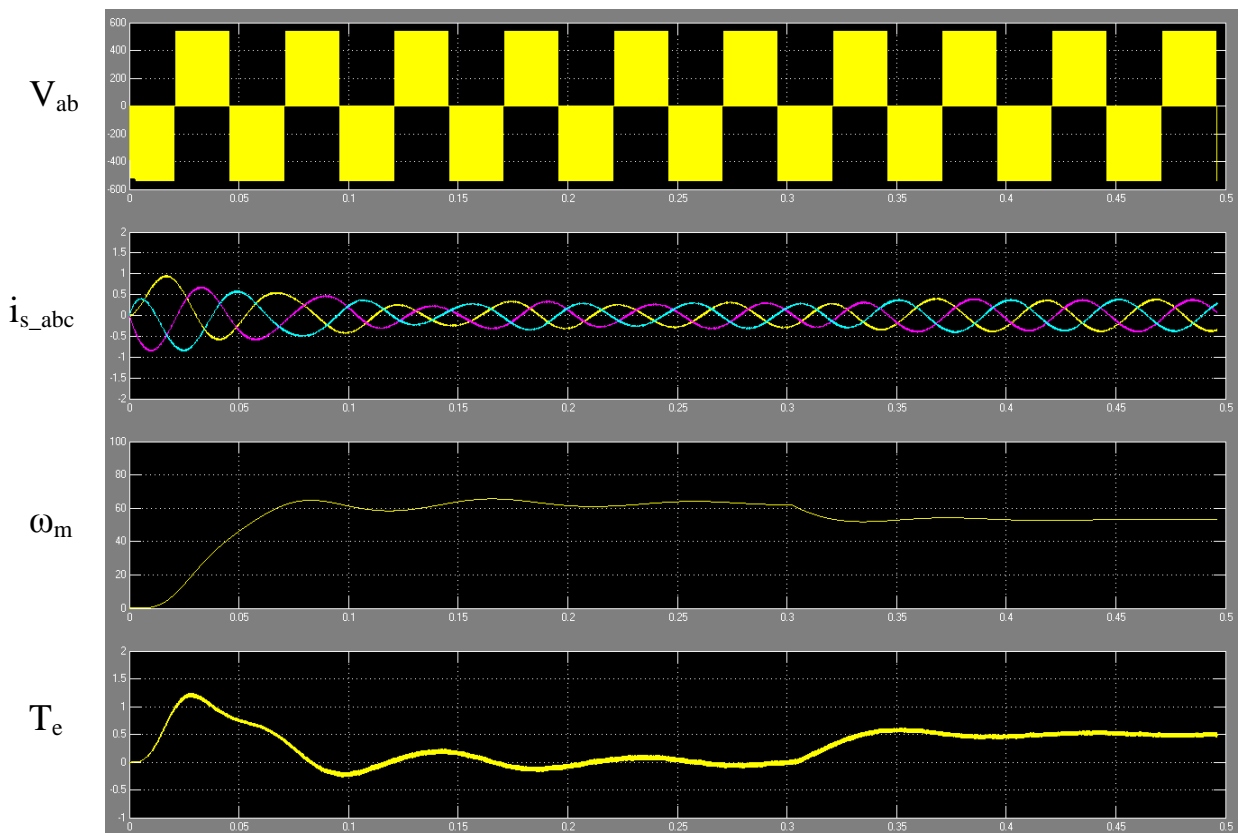


Рисунок 4.8 – Запуск двигателя и наброс 50% нагрузки при 20 Гц

При исследовании не учитываются особенности математического описания процессов в асинхронной машине, наличие внутренних перекрестных связей, состояние магнитной системы, поэтому наблюдается завышенный момент и ток, который определяется только активным сопротивлением статора и ротора. Полученные результаты моделирования показывают, что при прямом пуске наблюдаются значительные колебания момента и скорости.

5 Безопасность жизнедеятельности труда

5.1 Анализ условий труда

В данной части производится анализ оборудования и работы мостового крана. Используются три номинала напряжения 380, 220 вольт переменного тока и 24 постоянного. Все управляющие оборудование располагается за стендом. В лаборатории уже имеется рассчитанное заземление. Используется 4 электропривода. Лаборатория показана на рисунке 5.1.

Как уже было отмечено ранее, используется два асинхронных двигателя с фазным ротором:

тип	ФТТ 0,4-0,16;
мощность, Вт	180
число оборотов, об/мин	1400
Cos φ	0,88
КПД	0,92

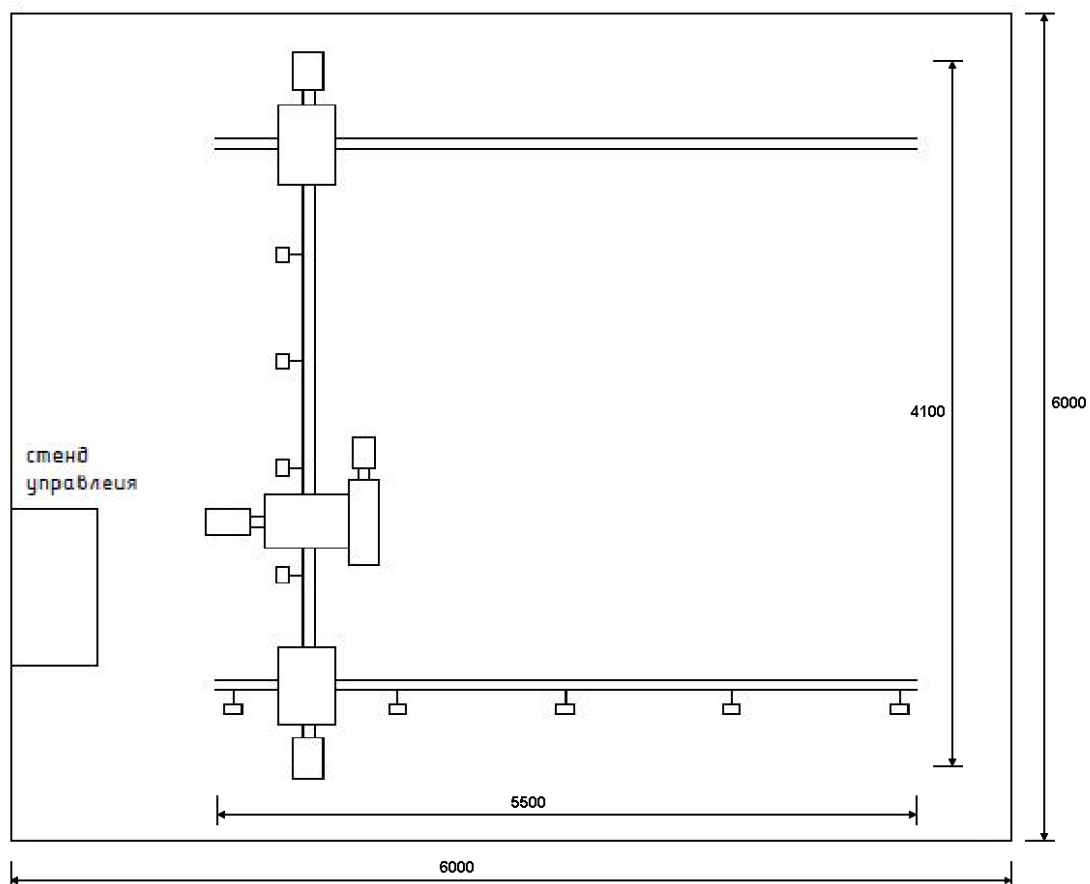


Рисунок 5.1 – Чертеж мостового крана вид сверху

Лабораторный кабинет имеет следующие габариты: высота 3,3 метра, длина и ширина по 6 метров. Мостовой кран является основной частью лабораторного стенда и всей дипломной работы. Мост имеет три степени

свободы движения. Движение вперед-назад, вдоль комнаты, вверх и вниз. Мостовой кран состоит из трех балок, две расположены по длине комнаты и крепятся к потолку анкерными болтами. Общий вес крана составляет 500 кг. Длина мостового крана составляет 5,5 метров, вдоль комнаты 4,1 метров. Чертеж мостового крана приложен на рисунке 5.1.

Условия искусственного освещения в лабораторных кабинетах оказывают большое влияние на зрительную работоспособность, физическое и моральное состояние студентов. Необходимо провести расчет освещения, для проверки соответствия. Для организации общего искусственного освещения были выбраны лампы типа ЛБ40. Как известно люминесцентные лампы более энергоэффективны. Имеют долгий срок службы. Но основной недостаток заключается в том, что газ внутри лампы загрязняет окружающую среду больше чем лампы накаливания. Нормой средней горизонтальной освещенности лабораторного кабинета образовательного учреждения составляет $500 \frac{\text{лк}}{\text{м}^2}$. В кабинете лаборатории стоят 4 светильника по 2 люминесцентные лампы. Мощность каждой составляет 36 Вт. Световой поток равен 2850 лм. Площадь кабинета составляет 36 м^2 . Тогда:

Общий световой поток всех ламп:

$$\Phi_{\text{общ}} = \Phi_{\text{лам}} \cdot N, \quad (5.1)$$

$$\Phi_{\text{общ}} = 2850 \cdot 8 = 22800 \text{ лм.}$$

Найдем фактическую величину горизонтальной освещенности:

$$E_{\nu\text{общ}} = \frac{\Phi_{\text{общ}}}{S}, \quad (5.2)$$

$$E_{\nu\text{общ}} = \frac{\Phi_{\text{общ}}}{S} = \frac{22800}{36} = 633,33 \frac{\text{лк}}{\text{м}^2}.$$

Делаем вывод:

$$E_{\nu\text{общ}} > E_{\nu}. \quad (5.3)$$

Освещение соответствует требованиям.

Так же в работе мостового крана необходимо учитывать производимый шум. В зависимости от назначения и технических параметров электродвигателей уровень их шума может быть различным: от 30–40 до 100–120 дБ. Для электродвигателей общепромышленного назначения характерен уровень шума 60–95 дБ, причем преобладают обычные средние частоты (200–2000 Гц). Далее будем производить расчет по шуму.

5.2 Расчет шума

Необходимые для расчета данные:

Габариты комнаты:

- Д.=6 м;
- Ш.=6 м;
- В.=3,3 м;
- Объем комнаты 118,8 м³;

Расстояния от двигателей до измеряемой точки:

- $r_1 = 2$ м;
- $r_2 = 2,2$ м;
- $r_3 = 4,5$ м.

Данные об уровнях звукового давления представлены в таблице 5.1.

Наибольший габаритный размер источников шума: $l_{max} = 0,2$ м.

Таблица 5.1 – Уровни звукового давления, создаваемые электроприводом.

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L_{pi}	56	56	58	58	60	61	60	59

В помещении с двумя и более источниками шума уровни звукового давления следует определять по формуле:

$$L_{ож} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{i=1}^m \frac{\Delta i \cdot x_i \cdot \Phi_i}{S_i} + \frac{4\psi}{B} \sum_{i=1}^n \Delta i \right), \quad (5.4)$$

где $\Delta i = 10^{0,1 \cdot L_{pi}}$;

L_{pi} – уровень звуковой мощности каждым источником шума;

n – сумма всех источников шума;

m – ближайшие источники шума у измеряемой точки.

Расстояние от измеряемой точки до акустического центра:

$$r_{min} = 2 \text{ м,}$$

и ближайший к ней источник:

$$5 \cdot r_{min} = 10 \text{ м.}$$

Сумма всех источников шума, принимаемых в расчет и расположенных вблизи расчетной точки, когда, будет равно 3 ($m=3$), т. е. учитываются все данные источники, расположенные на расстояниях r_1 , r_2 и r_3 ; x_i –

коэффициент, принимаемый в зависимости от отношения r_i/l_{max} которые показана на рисунке 5.2.

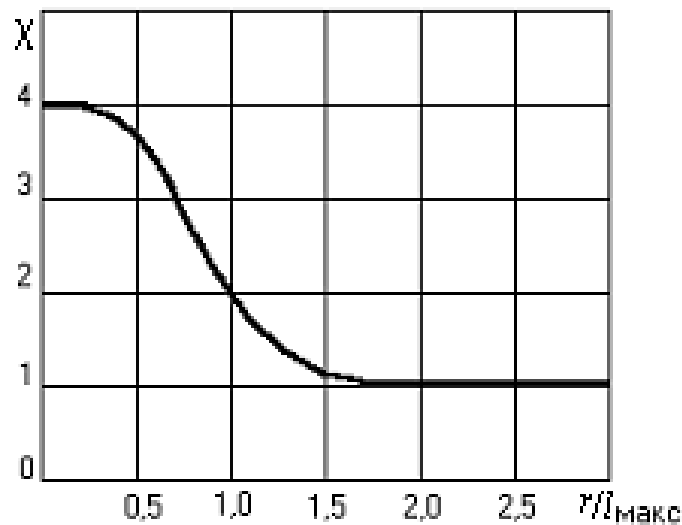


Рисунок 5.2 – Зависимость эмпирического коэффициента χ_i от отношения r_i/l_{max} , где l_{max} – наибольший габаритный размер источников шума.

Данный коэффициент учитывает влияние ближайшего акустического поля. Рассчитаем:

$$\frac{r_i}{l_{max}} = \frac{2}{0,2} = 10,$$

т.к. $r_i/l_{max} > 2$ принимаем $\chi_i = 1$; Φ – фактор направленности источника шума, принят равным единице; S – площадь воображаемой поверхности проходящий через измеряемую точку и источники шума.

Если $r > 2l_{max}$, следует принимать площадь находящую:

- а) на поверхности пола, стены, перекрытия $S = 2\pi r^2$;
- б) в пространстве $S = 4\pi r$;
- в) в двухгранном углу, образованном ограждающими поверхностями $S = \pi r^2$;
- г) в трехгранном углу, образованном ограждающими поверхностями $S = \pi r/2$.

Следующий параметр – постоянная помещения:

$$B = B_{1000} \cdot \mu, \quad (5.5)$$

где B_{1000} – постоянная помещения, зависит от объема помещения, которая зависит от его типа.

Для лаборатории стоит принять:

$$B_{1000} = \frac{V}{10}, \quad (5.6)$$

тогда:

$$B_{1000} = \frac{V}{10} = \frac{118,8}{10} = 11,88.$$

Частотный множитель μ , определил по таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Значения частотного множителя

Объем помещения, м ³	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
V<200	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,5
V=200/1000	0,65	0,62	0,64	0,75	1	1,5	2,4	4,2
V>1000	0,5	0,5	0,55	0,7	1	1,6	3	6

Коэффициент « ψ », учитывающий нарушение диффузности звукового поля определяем графику на рисунке 5.3, из отношения $\frac{B}{S_{\text{общ}}}$ и таблице 5.3; $S_{\text{общ}}$ – сумма всех площадей поверхности комнаты ($S_{\text{общ}} = 151,2 \text{ м}^2$);

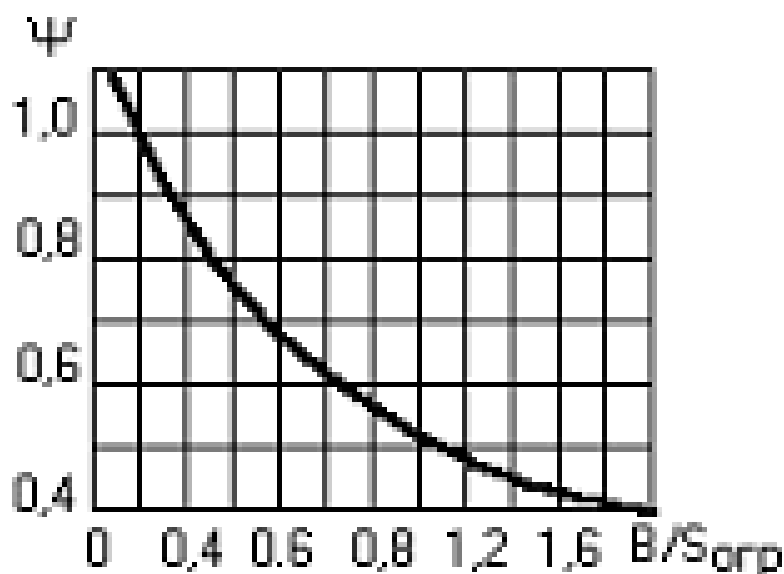


Рисунок 5.3 – Коэффициент нарушения диффузности звукового поля ψ

Таблица 5.3 – Значение коэффициент нарушения диффузности звукового поля

Величина	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
B	9,504	8,91	8,316	9,504	11,88	16,632	21,384	29,7
$B/S_{\text{общ}}$	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,11	0,14	0,20
ψ	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1	1	1

$$\Delta L_{\text{ГР}} = L_{\text{общ}} - L_{\text{доп}}, \text{ дБ} , \quad (5.7)$$

где $L_{\text{общ}}$ – октавный уровень звукового давления в расчетной точке;
 $L_{\text{доп}}$ – указаны в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Допустимые уровни звукового давления

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	63	25	250	500	1000	2000	4000	8000
$L_{\text{доп}}$	99	92	86	83	80	78	76	74

Проведем расчет для частоты в 63 Гц.

Для частоты 63 Гц $L_{pi} = 56$ дБ.

Рассчитываю Δ_1 :

$$\Delta_1 = 10^{0,1 \cdot 56} = 398107,17.$$

Считаю площадь по формуле $S = 2\pi r^2$:

$$S_1 = 2\pi \cdot 2^2 = 25,13 \text{ м}^2,$$

$$S_2 = 2\pi \cdot 2,2^2 = 30,41 \text{ м}^2,$$

$$S_3 = 2\pi \cdot 4,5^2 = 127,23 \text{ м}^2.$$

Затем по формуле $\sum_{i=1}^m \frac{\Delta i \cdot x_i \cdot \Phi_i}{S_i}$ получаем:

$$\sum_{i=1}^3 \frac{\Delta i \cdot x_i \cdot \Phi_i}{S_i} = \frac{3,98 \cdot 10^5}{25,13} + \frac{3,98 \cdot 10^5}{30,41} + \frac{3,98 \cdot 10^5}{127,23} = 32062,26.$$

Далее произведем расчет по формуле:

$$B_{63} = B_{1000} \cdot \mu_{63} , \quad (5.8)$$

где значение коэффициента μ – найдем из таблицы 2, где для $V < 200 \text{ м}^3$ и для частоты 63 Гц $\mu = 0,8$.

Тогда:

$$B_{63} = 11,88 \cdot 0,8 = 9,504.$$

Далее производим такой расчет:

$$\frac{4\psi}{B} \sum_{i=1}^3 \Delta i = \frac{4 \cdot 1,1}{9,504} \cdot 3 \cdot 3,98 \cdot 10^5 = 5,52 \cdot 10^5.$$

Затем просуммируем значения:

$$\sum_{i=1}^m \frac{\Delta i \cdot x_i \cdot \Phi_i}{S_i} + \frac{4\psi}{B} \sum_{i=1}^n \Delta i = 32062,26 + 5,52 \cdot 10^5 = 584062,26.$$

Теперь можно найти:

$$L_{\text{ож}} = 10 \cdot \lg(584062,26) = 57,66 \text{ дБ.}$$

После этого по таблице 5.4 выбираем для частоты 63Гц значение $L_{\text{доп}} = 99 \text{ дБ.}$

Окончательным расчетом является определение значения:

$$\Delta L_{\text{ТР}} = L_{\text{общ}} - L_{\text{доп}} = 57,66 - 99 = 41,33.$$

Результаты расчета всех остальных данных сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты расчета

№	Величина	Единицы изм-ния	Среднегеометрическая частота октавной полосы, Гц							
			63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
1	L_{pi}	дБ	56	56	58	58	60	61	60	59
2	$\Delta_1=10^{(0,1 \cdot L_{pi})}$	-	398107,2	398107,2	630957,3	630957,3	1000000	1258925	1000000	794328,2
3	$S_1=2 \cdot \pi \cdot r_1^2$	м ²	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12	25,12
4	$S_2=2 \cdot \pi \cdot r_2^2$	м ²	30,3952	30,3952	30,3952	30,3952	30,3952	30,3952	30,3952	30,3952
5	$S_3=2 \cdot \pi \cdot r_3^2$	м ²	127,17	127,17	127,17	127,17	127,17	127,17	127,17	127,17
6	Δ_1/S_1		31696,43	31696,43	50235,46	50235,46	79617,83	100232,9	79617,83	63242,69
7	Δ_1/S_2		13097,7	13097,7	20758,45	20758,45	32899,93	41418,56	32899,93	26133,34
8	Δ_1/S_3		3130,512	3130,512	4961,527	4961,527	7863,49	9899,547	7863,49	6246,192
9	Сумма "6", "7", "8"		47924,64	47924,64	75955,44	75955,44	120381,3	151551	120381,3	95622,23
10	$V_{1000}(V=3200m^3)$	-	-	-	-	-	11,88	-	-	-
11	μ	-	0,8	0,75	0,7	0,8	1	1,4	1,8	2,50
12	$V_i=V_{1000} \cdot \mu$	-	9,504	8,91	8,316	9,504	11,88	16,632	21,384	29,7
13	$4 \cdot \psi / V_i$		0,462963	0,493827	0,529101	0,462963	0,37037	0,2405	0,187056	0,13468
14	$\sum_{i=1}^3 \Delta_i = 3 \cdot \Delta_i$		1194322	1194322	1892872	1892872	3000000	3776776	3000000	2382985
15	Произв. "13" и "14"		552926,6	589788,4	1001520	876329,6	1111111	908315,6	561167,2	320940,7
16	Сумма "9" и "15"		600851,3	637713	1077475	952285,1	1231492	1059867	681548,5	416562,9
17	$L_{ож}=10lg("16")$	дБ	57,78767	58,04625	60,32407	59,78767	60,90432	60,25251	58,33497	56,19681
18	$L_{доп}$	дБ	99	92	86	83	80	78	76	74
19	$\Delta L_{тр}=L_{ож}-L_{доп}$	дБ	-41,2123	-33,9537	-25,6759	-23,2123	-19,0957	-17,7475	-17,665	-17,8032

По результатам расчетов получается фактическое значение уровня шума ниже фактического. Шум установленных электродвигателей соответствует требованиям.

6 Экономическая часть

В данном проекте рассмотрены три варианта системы управления электроприводами:

- а) силовыми контроллерами;
- б) автоматизированная система с силовыми контроллерами;
- в) посредством частотного преобразования.

Приведен расчет капитальных затрат и определена экономическая эффективности. Капитальные вложения определяются из свободной оптовой цены на оборудование и транспортно-монтажных расходов, приведены в таблицах 6.1, 6.2, 6.4. А итоговая смета затрат в таблицах 6.3, 6.5.

6.1 Расчет капитала вложений и эксплуатационных издержек

Нам даны 2 варианта капиталовложения. Из них нужно подобрать более экономичный. Данные первого вида капиталовложения занесены в таблицу 6.1, а данные второго вида – в таблицу 6.2.

Таблица 6.1 – Расчет капиталовложений первого варианта

№	Основных производственных фонды	Кол-во штук	Оптовая цена за ед., тыс.тенге	Общая стоим., тыс.тенге	Транспортно-монтажные расходы тыс.тенге	Полная первоначальная стоимость тыс.тенге
1	Электродвигатель	4	216	864	22	886
2	Контакты	3	66	198	2	200
3	Тепловое реле	3	22	66	2	68
7	Кольцевые выключатели	4	3	12	2	14
8	Итого			200	13	213

Эксплуатационные расходы, включают в себя амортизационные отчисления I_a , стоимость потребляемой электроэнергии электропривода $I_{\text{п}}$, стоимость ремонта всего электрооборудования $I_{\text{р}}$, годовая заработная плата $I_{\text{зп}}$ за год нормальной эксплуатации, прочих расходов $I_{\text{пр}}$:

$$I = I_a + I_{\text{п}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{ос}}. \quad (6.1)$$

Амортизационные отчисления I_a можно определить по формуле:

$$I_a = \frac{(H \cdot \Phi)}{100\%}, \quad (6.2)$$

где H – среднегодовая норма амортизации (12%);

Φ – первоначальная стоимость оборудования, тенге.

Таблица 6.2 – Расчет капиталовложений второго варианта

№	Основных производственные фонды	Кол-во штук	Оптовая цена за ед., тыс.тенге	Общая стоим., тыс.тенге	Транспортно-монтажные расходы тыс.тенге	Полная первоначальная стоимость тыс.тенге
1	Электродвигатель	4	216	864	22	886
2	Контакты	3	66	198	2	200
3	Датчик позиционирования	2	124	248	2	250
4	ПЛК	1	58	58	7	65
5	СПК	1	76	76	7	83
6	Реле для цепей управления	10	7	70	2	72
7	Кольцевые выключатели	4	3	12	2	14
8	Итого	-	-	1526	44	1570

Тогда:

$$I_a = \frac{(12\% \cdot 1570000)}{100\%} = 188400 \text{ тенге.}$$

Стоимость потребляемой электроэнергии I_{Π} определяю по формуле:

$$I_{\Pi} = \Delta \mathcal{E} \cdot T, \quad (6.3)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – годовые потери электроэнергии, кВт.ч;

T – тариф за 1 кВт.ч энергии (21,64 тенге/ кВт.ч).

Годовые потери электроэнергии $\Delta \mathcal{E}$ определяются по формуле:

$$\Delta \mathcal{E} = P_2 \cdot T, \quad (6.4)$$

где P_2 – номинальная потребляемая мощность стенда в час (10 кВт);

T – действующий фонд учебного времени (4000 ч.).

$$\Delta \mathcal{E} = 10 \cdot 4000 = 40000 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$I_{\Pi} = 40000 \cdot 21,64 = 865600 \text{ тенге.}$$

Зарплата обслуживающего персонала и отчисления на социальный налог:

$$I_{\text{зп}} = TC_{\text{сп}} \cdot \Phi \cdot N \cdot PK \cdot K_{\text{д}}, \quad (6.5)$$

где $T_{C_{cp}}$ – среднечасовая ставка (313 тенге);

Φ – эффективный фонд рабочего времени одного рабочего (264 час/чел);

N – количество рабочих (1 человек);

PK – районный коэффициент показатель относительного увеличения заработной платы с целью компенсации дополнительных расходов и повышенных затрат труда, связанных с выполнением работы и проживанием в регионах с тяжелыми климатическими условиями ($PK=1$);

K_d – коэффициент, учитывающий размер дополнительной заработной платы ($K_d = 1,3$).

Рассчитываем:

$$I_{зп} = 313 \cdot 264 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 = 107422 \text{ тенге.}$$

Заработная плата после отчисления в пенсионный фонд:

$$I_{оп} = I_{зп} - 10\% \cdot I_{зп}, \quad (6.6)$$

$$I_{оп} = 90\% \cdot 107422 = 96679 \text{ тенге.}$$

Отчисления на социальный налог:

$$I_{ос} = 11\% \cdot I_{оп}, \quad (6.7)$$

$$I_{ос} = 11\% \cdot 96679 = 10635 \text{ тенге.}$$

Прочие расходы $I_{пр}$ определяются по формуле:

$$I_{пр} = 0,05 \cdot (I_a + I_{п} + I_p + I_{зп}), \quad (6.8)$$

$$I_{пр} = 0,05 \cdot (188400 + 865600 + 384957 + 107422) = 77319 \text{ тенге.}$$

Сумма всех эксплуатационных издержек:

$$I = 188400 + 865600 + 77319 + 107422 + 10635 = 1249375 \text{ тенге.}$$

Расчет общих затрат на техническое обслуживание и ремонт электрооборудования:

$$I_p = I_{обс} + I_{ос} + C_{мат} + N_p, \quad (6.9)$$

где $I_{обс}$ – заработная плата рабочих, занятых в обслуживании и ремонте;

I_{oc} – отчисления на социальный налог;
 C_{mat} – стоимость материалов для ремонта;
 H_p – накладные расходы (60% от $I_{зп}$).

Находим отдельно каждое слагаемое:

$$I_{обс} = I_{доп} + I_{зп}, \quad (6.10)$$

где $I_{доп}$ – дополнительная заработная плата.
Тогда:

$$I_{доп} = I_{зп} \cdot K_d, \quad (6.11)$$

$$I_{доп} = 107422 \cdot 1,3 = 139648 \text{ тенге,}$$

$$I_{обс} = 139648 + 107422 = 247070 \text{ тенге.}$$

C_{mat} составляет 3-5% от первоначальной стоимости оборудования:

$$C_{mat} = 0,04 \cdot \Phi, \quad (6.12)$$

$$C_{mat} = 0,04 \cdot 1570000 = 62800 \text{ тенге.}$$

Накладные расходы составляют 60% от заработной платы персонала:

$$H_p = 60\% \cdot I_{зп}, \quad (6.13)$$

$$H_p = 0,6 \cdot 107422 = 64453 \text{ тенге.}$$

Общие затраты на ремонт и тех. обслуживание электрооборудования:

$$I_p = 139648 + 247070 + 62800 + 64453 = 384957 \text{ тенге.}$$

Соберем все данные в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Смета затрат второго варианта

Наименование затрат	Сумма затрат, в тенге
Амортизационные отчисления	188400
Стоимость потерь энергии	865600
Расход на ремонт электрооборудования	384957
Заработная плата персонала	107422
Отчисления на социальный налог	10635
Прочие расходы	77319
Итого	1634333

Рассмотрим еще один вариант капиталовложений для того, чтобы сравнить его с вариантом вторым. Данные по третьему виду капиталовложений собраны в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Расчет капиталовложений третьего варианта

№	Основные производственные фонды	Кол-во штук	Оптовая цена за ед., тыс.тенге	Общая стоим., тыс.тенге	Транспортно-монтажные расходы тыс.тенге	Полная первоначальная стоимость тыс.тенге
1	Электродвигатель	4	216	864	22	886
2	ПЧВ	4	131	524	11	535
3	ПЛК	1	58	58	7	65
4	СПК	1	76	76	7	83
5	Реле для цепей управления	4	7	28	2	30
6	Кольцевые выключатели	4	3	12	2	14
7	Датчик позиционирования	2	124	248	2	250
8	Итого			1810	53	1863

Амортизационные отчисления I_a второго варианта:

$$I_a = \frac{(12\% \cdot 1863000)}{100\%} = 223560 \text{ тенге.}$$

Стоимость потерь электроэнергии I_{Π} :

$$\Delta \mathcal{E} = 6 \cdot 4000 = 24000 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

$$I_{\Pi} = 24000 \cdot 21,64 = 519360 \text{ тенге.}$$

Зарплата обслуживающего персонала и отчисления на социальный налог:

$$I_{\text{зп}} = 313 \cdot 264 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 = 107422 \text{ тенге.}$$

Заработная плата после отчисления в пенсионный фонд:

$$I_{\text{оп}} = 90\% \cdot 107422 = 96679 \text{ тенге.}$$

Отчисления на социальный налог:

$$I_{\text{ос}} = 11\% \cdot 96679 = 10635 \text{ тенге.}$$

Прочие расходы $I_{пр}$:

$$I_{пр} = 0,05 \cdot (223560 + 519360 + 396677 + 107422) = 62351 \text{ тенге.}$$

Сумма всех эксплуатационных издержек:

$$И = 223560 + 519360 + 10635 + 107422 + 62351 = 923327 \text{ тенге.}$$

Расчет общих затрат на техническое обслуживание и ремонт электрооборудования:

$$I_{доп} = I_{зп} \cdot K_d = 107422 \cdot 1,3 = 139648 \text{ тенге;}$$

$$I_{обс} = 139648 + 107422 = 247070 \text{ тенге.}$$

$C_{мат}$ составляет 3-5% от первоначальной стоимости оборудования. Возьмем 4 %:

$$C_{мат} = 0,04 \cdot \Phi = 0,04 \cdot 1863000 = 74520 \text{ тенге.}$$

Накладные расходы составляют 60% от заработной платы персонала. Тогда:

$$H_p = 60\% \cdot I_{зп} = 0,6 \cdot 107422 = 64453 \text{ тенге.}$$

Общие затраты на ремонт и техническое обслуживание электрооборудования:

$$I_p = 139648 + 247070 + 74520 + 64453 = 396677 \text{ тенге.}$$

Для сравнения соберем все данные с расчетов в таблицу 6.5 для сравнения со сметой второго варианта капиталовложения. Необходимо выбрать более экономичный вариант

Таблица 6.5 – Смета затрат третьего варианта капиталовложения

Название затрат	Сумма затрат, в тенге
Амортизационные отчисления	223560
Стоимость потерь энергии	519360
Расход на ремонт электрооборудования	396677
Заработная плата персонала	107422
Отчисления на социальный налог	10635
Прочие расходы	62351
Итого	1320005

6.2 Расчет экономической эффективности

Для сравнения двух вариантов используется метод минимума приведенных затрат.

Приведенные затраты составляет:

$$ПЗ = C + E_n \cdot K, \quad (6.14)$$

где C – сумма ежегодных эксплуатационных расходов;

K – капитальные вложения;

E_n – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности капитальных вложений ($E_n = 0,15$).

$$ПЗ_1 = 1634333 + 0,15 \cdot 1570000 = 1869833 \text{ тенге,}$$

$$ПЗ_2 = 1320005 + 0,15 \cdot 1863000 = 1599455 \text{ тенге.}$$

Исходя из расчетов, более эффективным является второй вариант.

Экономический эффект определяется путем сравнения приведенных затрат по двум вариантам по формуле:

$$\mathcal{E} = ПЗ_1 - ПЗ_2, \quad (6.15)$$

$$\mathcal{E} = 1869833 - 1599455 = 270378 \text{ тенге.}$$

Экономический эффект от внедрения второго варианта составит:

$$\mathcal{E} = \Delta C + E_n \cdot \Delta \Phi, \quad (6.16)$$

$$\mathcal{E} = (1634333 - 1320005) + 0,15 \cdot (1863000 - 1570000) = 358278 \text{ тенге.}$$

Второй вариант за счет экономии электроэнергии, является более выгодным в окупаемости и в дальнейшей работе. Можем определить окупаемость проекта:

$$T = \frac{\Phi}{\mathcal{E}} = \frac{1863000}{358278} = 5,19 \text{ лет.} \quad (6.17)$$

Окупаемость составила 5 лет и около 3 месяцев, что является показателем целесообразного использования третьего варианта как систему управления мостовым краном.

Заключение

В заключение дипломного проекта можно отразить основные выводы и результаты:

а) по первой главе:

- рассмотрены основные требования, предъявляемые к электроприводу и системе управления;
- разработана функциональная схема мостового крана, где отражены все основные элементы и описана основная конструкция грузоподъемного механизма.

б) по второй главе: была рассчитана мощность асинхронного электродвигателя конвейера, механические характеристики системы ПЧ-АД при постоянстве перегрузочной способности для заданных частот и выбран закон частотного регулирования. На основе расчетов и анализа номенклатуры серийно выпускаемых ПЧ был выбран преобразователь частоты;

в) по третьей главе: был проведен расчет и выбор элементов силовой схемы, то есть расчет силовых элементов инвертора и выпрямителя и выбор серийного преобразователя частоты;

г) по четвертой главе: дано описание математической модели ПЧ-АД и проведено моделирование в программной среде Matlab. В ходе моделирования были получены осциллограммы выходного напряжения, тока, скорости и момента при заданных частотах и коэффициентах модуляции;

д) по пятой главе:

- проведен анализ условий труда лаборатории. Рассчитана фактическая величина горизонтальной освещенности для искусственного освещения. Установленное освещение соответствует требованиям;

- произведен расчет шума от работы электродвигателей. Полученные значения сравнивались с допустимыми. На всех среднегеометрических частотах уровень звукового давления оказался ниже допустимых.

е) по шестой главе:

- рассчитаны капиталовложения трех систем и эксплуатационные двух основных систем управления. Расчет проводил на примере реального объекта;

- сравнивалось два варианта системы управления. Была рассчитана экономическая эффективность внедрения более нового варианта. В итоге окупаемость составила 5,19 лет.

Список используемой литературы

- 1 Садовский И. М. Согласованное вращение асинхронных двигателей, “Электрический вал”. – М.: Государственное энергетическое изд-во, 1948. – 135с.
- 2 Чиликин М. Г. , Сандлер А. С. Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с.
- 3 Кацман М. М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1990. – 463с.
- 4 Сагитов П. И. Учебное пособие. Электропривод промышленных механизмов. – А.: АУЭС 2012. – 67 с.
- 5 Терехов В. М. Элементы автоматизированного электропривода. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 223 с.
- 6 Садовский И. М. Согласованное вращение асинхронных двигателей, “Электричесвто”. – М.: Государственное энергетическое изд-во, 1935.
- 7 Кустанович М. И. Электрический вал для подъемного устройства. – М.: Динамо, 1937.
- 8 Электропривод. Учебно-методический комплекс // [Персональная страница Воронина С. Г.] / Россия. 2011. URL: <http://model.exponenta.ru/epivod/index.htm> (дата обращения 20.02.2016).
- 9 Чиликин М. Г., Ключев В. И., Сандлер А. С. Теория автоматизированного электропривода. – М.: Энергия, 1979. 616 с.
- 10 Жакупов А. А. Методические указания по экономической части дипломного проекта. – А.: АУЭС, 2015.
- 11 Дюсебаев М. К., Бегимбетова А.С. Безопасность жизнедеятельности. Методические указания к выпускной работе. – А.: АИЭС, 2008.
- 12 ГОСТ 12.1.003 - 83. Шум. Общие требования безопасности. - М.: Изд-во стандартов, 1984.
- 13 Дюсебаев М. К. , Абдимуратов Ж. С. Охрана труда и безопасность жизнедеятельности: Учебное пособие. – А.: АУЭС, 2011.
- 14 Айзенберг Ю. Б. Справочная книга по светотехнике. – М.: Энергоатомиздат, 1995.
- 15 Руководство по эксплуатации оборудования // Официальный сайт компании ОВЕН / Россия. 2016. URL: <http://www.owen.ru/> (дата обращения 15.04.2016).
- 16 Каталог продукции // Группа компании ИЕК / Россия. 2016. URL: <http://www.iek.ru/> (дата обращения 17.04.2016).
17. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода: Учебник для вузов. – 6-е изд. доп. и перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 576 с., ил.
18. Siemens Micromaster 420. Руководство по эксплуатации.
19. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: Учеб. Пособие для студентов высш. учеб. заведений / И.Я. Браславский, З.И. Ишматов, В.Н. Поляков; Под ред. И.Я. Браславского. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 256 с.

20. Асинхронные двигатели 4А: Справочник/ А 90 А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с., ил.

21. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-е, 1982. – 392 с., ил.