

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Механико-технологический факультет
Кафедра машиностроения, автоматике и электроэнергетики

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,

к.т.н., доцент

_____ К.М. Виноградов
_____ 2018 г.

Электропривод и автоматизация мостового крана
КМ50 грузоподъемностью 10 тонн.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ ВКР

Консультанты
Безопасность жизнедеятельности,
к.т.н., доцент
_____ В.Г. Некрутов
_____ 2018 г.

Руководитель работы,
доцент
_____ К.М. Виноградов
_____ 2018 г.

Автор работы
студент группы ИОДО-508
_____ Р.В. Янгиров
_____ 2018 г.

Нормоконтролер, доцент
_____ В.Д. Константинов
_____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Янгиров Р.В. Электропривод и автоматизация мостового крана КМ50 грузоподъемностью 10 тонн. – Челябинск: ЮУрГУ, МТ; 2018, 79 с., 15 ил., библиогр. список – 12 наим., 6 листов чертежей ф. А1.

В данной выпускной квалификационной работе (ВКР) выполнена разработка электропривода мостового крана КМ50 грузоподъемностью 10 тонн, дано описание этого крана. Был выполнен расчёт электропривода, выбран электродвигатель, произведён обзор и выбор электропривода. Выполнен статический и динамический расчёт электропривода.

Рассмотрены вопросы безопасности жизнедеятельности. Произведена идентификация и анализ опасностей и вредностей при эксплуатации крана. Разработаны мероприятия по снижению опасностей и вредностей на организм человека, проведена оценка пожаробезопасности. Произведен расчет заземления.

Выполнено экономическое обоснование модернизации, в ходе которого была рассчитана экономия на годовых эксплуатационных издержках при внедрении модернизированного оборудования, срок окупаемости и рентабельность капитальных вложений.

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	Янгиров				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Виноградов				4	79	
Н. контр.	Константинов				ЮУрГУ (НИУ). Кафедра МАЭ		
Утверд.	Виноградов						
Электропривод и автоматизация мостового крана КМ50 грузоподъемностью 10 тонн.							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ преобразователей частоты.....	8
1.1 Общее сопоставление возможностей преобразователей частоты	8
1.2 Особенности преобразователя частоты Mitsubishi FR-F740.....	9
1.3 Особенности преобразователя частоты Веспер E2-8300-015H	10
1.4 Особенности преобразователя частоты TOSHIBA VF- S15.....	10
1.5 Особенности преобразователя частоты ESQ 500/600.....	12
1.6 Особенности преобразователя частоты Vacon 100.....	12
1.7 Особенности преобразователя частоты <u>EasyDrive ED3100</u>	14
Выводы по части один.....	15
2 описание мостового крана км-50 грузоподъемностью 10т.....	16
2.1 Краткая техническая характеристика мостового крана.....	16
2.2 Описание конструкции крана	17
2.3 Кинематические схемы механизмов мостового крана.....	18
2.4 Условия работы и требования, предъявляемые к электроприводу мостового крана.....	19
2.5 Современные крановые электроприводы, обоснование и выбор.....	24
2.6 Противораскачивание груза.....	26
2.7 Исходные данные и постановка задачи.....	26
2.8 Обоснование модернизации привода подачи.....	27
Выводы по части два.....	
3 выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма подъема	28
3.1 Выбор электродвигателя и определение параметров схемы замещения.....	28
.....	
3.2 Расчет редуктора и тормозного устройства.....	33
3.3 Расчет статистических характеристик электродвигателя.....	35
3.4 Выбор типа преобразователя и расчет параметров структурной схемы двигателя.....	38
3.5 Расчет характеристик двигателя при векторном управлении и проверка выбора двигателя и преобразователя.....	40
3.6 Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с	44

						13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			5

векторным управлением.....	45
3.7 Имитационная модель электрической части силового канала.....	
3.8 Методика настройки контуров регулирования САУ асинхронного электропривода.....	48
.....	49
.....	51
3.8.1 Контур тока с ПИ-регулятором и датчиком тока.....	
3.8.2 Контур скорости с ПИ-регулятором и датчиком скорости.....	53
3.8.3 Контур потокосцепления ротора с ПИ-регулятором и датчиком потока.....	55
.....	58
3.9 Исследования имитационной модели электропривода подъема мостового крана с учетом крановой нагрузки.....	
.....	
Вывод по части три.....	
4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	59
4.1 Общие положения	59
4.2 Оценка годовой производительности крана.	59
4.3 Определение капитальных затрат.....	59
4.4 Определение эксплуатационных расходов.....	61
4.5 Определение приведенных затрат по вариантам систем электроприводов и экономического эффекта от использования нового оборудования.....	62
.....	
4.6 Определение экономической эффективности использования предварительно выбранной системы электропривода.....	64
Выводы по части четыре.....	66
5 Безопасность жизнедеятельности.....	67
5.1 Социальное значение безопасности жизнедеятельности	67
5.2 Опасные и вредные производственные факторы.....	68
5.3 Средства защиты от травмоопасных и вредных производственных факторов.....	72
5.4 Электробезопасность.....	73
5.5 Расчет защитного заземления.....	73
5.6 Пожарная безопасность.....	75
5.7 Охрана окружающей среды.....	76
Выводы по части пять.....	77
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
.....	
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	79

ВВЕДЕНИЕ

Из всей разнообразности механизмов общепромышленных, участвующих в работе на предприятиях металлургии, можно определить группу, для которой очень остро существует проблема излишне высокого уровня нагрузок динамических. К такой группе оборудования промышленных предприятий относятся в первую очередь механизмы подъемно-транспортных машин: козловые и мостовые краны, перегружатели крановые, питатели транспортеры, конвейеры, и т.д. В особо тяжелых условиях среди этих механизмов и режимах интенсивных работают краны мостовые. Многочисленными исследованиями установлено, что механические упругие колебания в большинстве подавляющем случаев негативно действуют на работу электропривода, вызывая повышение нагрузок динамических, что приводит к уменьшению точности работы механизма, возникновение вибраций механических и явлений резонансных которые создают опасную ситуацию. Появляющийся при этом высокий уровень чрезмерных динамических нагрузок, особенно в режимах при пусках, реверсах и торможениях приводит к преждевременному выходу из строя подкрановых конструкций и элементов механизмов кранов.

Проведя исследования в направлении проблемы уменьшения динамических нагрузок было установлено, для достижения максимальной эффективности уменьшения динамических нагрузок, что приведет к увеличению долговечности механической части механизма передвижения кранов и подкрановых конструкций является глубокая модернизация имеющихся схем электроприводов и внедрения современных новых, которые без условно обеспечат уменьшение разницы в скоростях передвижения опор крана.

На основании того что основную роль обеспечения условий для создания максимальной производительности подъемно-транспортного машин отводится электроприводу то с учетом сложной специфики работы данного оборудования необходимо определенно отдавать предпочтение несложным и высоконадежным системам электроприводов.

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 СРАВНЕНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ И ЗАРУБЕЖНЫХ преобразователей частоты

1.1 Общее сопоставление возможностей преобразователей частоты

В данной части выполнен анализ особенностей построения и реализации различных преобразователей частоты (ПЧ), российских производителей и зарубежных фирм.

Рассмотрим функциональные и технические возможности ПЧ фирм «Mitsubishi», «Веспер», «TOSHIBA», «_EasyDrive», «ESQ» и «Vacon» мощностью 11 кВт, при их использовании для модернизации привода подачи. Преобразователи целесообразно сравнить по следующим показателям:

- тип преобразователя;
- напряжение питания;
- диапазон изменения выходной частоты;
- количество аналоговых/дискретных входов;
- наличие дополнительных опций.

Предварительный анализ технических возможностей ПЧ различных фирм показал, что диапазон мощностей (кВт) характеризует мощность двигателей, подключаемых к данному преобразователю. В общем случае, достаточно широкий диапазон мощностей для ряда моделей одной фирмы свидетельствует о серьезных и прочных позициях производителя в производстве преобразователей для разных применений.

Напряжение питания характеризует удобства конечного пользователя, не имеющего промышленной трехфазной сети, производителем предусмотрено ряд моделей рассчитанных на однофазное (двухпроводное) питание 200-240 В переменного тока. Как правило, это маломощные модели до 1,5 кВт. Более мощные модели изготавливаются из расчета трехфазного питания 380-480 В переменного тока. Разброс $-15\% \div +10\%$ от номинального напряжения питания, является стандартом, предъявляемым к электрическим аппаратам, что необходимо для устойчивой работы в российских сетях. Все ПЧ представленные в данном списке соответствуют этому требованию.

Количество параметров настройки характеризует возможность более гибко настроить преобразователь под свои задачи. Однако необходимо отметить, что качественный состав и продуманность параметров ни менее важны, чем их количество. Для упрощенных исполнений специализированных преобразователей достаточно малого количества необходимых для технологического процесса параметров. Для того чтобы правильно оценить качественный и количественный состав, его достаточность и необходимость для решения конкретных задач, необходимо изучить полное описание на данную модель преобразователя.

Наличие дополнительных опций характеризует приспособляемость ПЧ для гибкой настройки его под нужды производственного процесса, почти все солидные производители реализуют возможность установки в преобразователь частоты дополнительных модулей (опций), расширяющих его возможности.

										13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							8

Безусловно, при выборе преобразователя следует учитывать, что у одного производителя введено в состав опции, у другого может входить в состав базового модуля.

Количество аналоговых/дискретных входов, характеризует сопряжения преобразователя частоты с системой локального управления технологическим процессом. Чем больше сигнальных входов, тем проще сопрягать преобразователь с внешней системой управления.

1.2 Особенности преобразователя частоты Mitsubishi FR-F740-00250-EC

Частотные преобразователи Mitsubishi демонстрируют свою высокую надёжность, уникальные энергосберегающие свойства и впечатляющие встроенные возможности.

FR-F740 предназначены для работы с насосами и вентиляторами, а также для применений с пониженной перегрузкой, например, системы вентиляции зданий в промышленности, в вытяжных установках и воздуходувках, а также в технике обработки сточных вод, насосах для грунтовой воды и тепловых насосах.

Модели серии FR-F740 для трёхфазных сетей с мощностями от 0.75 до 630 кВт, являются самыми высокооснащёнными преобразователями частоты Mitsubishi. Они защищены от отказов современными функциями диагностики и технического обслуживания.

Особенности FR-F740

- Диапазон частот: 0.5 – 400 Гц (диапазон напряжения питания до 500в)
- Режим энергосбережения особо эффективен для насосов и вентиляторов
- Наличие фильтра электромагнитных помех
- Векторное управление
- Функция автоматического перезапуска при вращающемся механизме
- Встроенный ПИД-регулятор
- Возможности обмена данными по RS485/RS422
- Поддержка сетей: Ethernet, CC-Link, PROFIBUS/DP, Device Net, CAN open, LonWorks.
- Функция управления группой насосов (расширенное ПИД регулирование)
- Применение современных компонентов (вентиляторы и силовые конденсаторы) с увеличенным сроком службы более 10-ти лет
- Исполнение IP 20.

1.3 Особенности преобразователя частоты Веспер E2-8300-015H

Преимущества преобразователя E2-8300-015H

- компактность
- оптимальное соотношение "цена - качество"
- простота настройки преобразователя под любые требования специалистов
- векторный режим управления
- настройка через компьютер

										13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							9

- съемная панель управления
- удобная ручка регулировки частоты
- гарантийный срок 3 года.

Применяемость

E2-8300-020H 15кВт - для управления приводами с постоянной, быстроменяющейся, а также вентиляторной нагрузкой: подъемно-транспортное оборудование, транспортеры, конвейеры, экструдеры, куттера, упаковочные и дозирующие машины и т.д.

Краткие технические характеристики

- Мощность преобразователя: 11 кВт
- Питание 380В, 50 Гц
- Выходная частота 0,1 – 650 Гц
- Защита двигателя от перегрузок

1.4 Особенности преобразователя частоты TOSHIBA TOSVERT VF-S15

Универсальный частотный преобразователь TOSHIBA TOSVERT VF-S15 предназначен для трехфазных асинхронных двигателей с питанием от 220 до 500В и мощностью от 0,4 до 15 кВт.

Заменяет снятую с производства серию VF-S11.

Области применения TOSHIBA VFS15:

- станки и конвейеры
- экструдеры и миксеры
- насосы и компрессоры
- вентиляторы и дымососы
- кран-балки и лебедки
- многодвигательные установки

Краткие характеристики TOSHIBA VFS15:

- Входное напряжение до 500 В
- Диапазон выходной частоты от 0,1 до 500 Гц
- Точность поддержания выходной частоты до 0,01%
- Перегрузка по току 150% - 60 сек., 200% - 0,5 сек.
- Температурный режим работы -10...+60 оС
- Управление двигателем в режимах постоянный и переменный момент, автоматический подъем момента, бессенсорное векторное управление скоростью двигателя, автоматическое энергосбережение, динамическое автоматическое энергосбережение (для вентиляторов и насосов), управление двигателями с постоянными магнитами, установка характеристики U/F по 5 точкам.
- Функции повышения стартового момента до 200%, автоподхват вращающегося двигателя, регенеративный режим работы при кратковременном пропадании питающего напряжения, автонастройка на двигатель, три набора времен разгона и

						13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			10

торможения, две переключаемые настройки на различные двигатели, S-образная характеристика разгона/торможения.

- Функции работы с грузоподъемным оборудованием: управление внешним тормозом с автоматической настройкой, высокоскоростная работа с малой нагрузкой.
- Три аналоговых (0 - 10В (-10... +10В), или (0) 4 - 20мА) и шесть дискретных входов.
- Один аналоговый и три дискретных выхода
- Встроенный последовательный порт RS485 с поддержкой протокола ModBus RTU
- Установка частоты встроенным и внешним потенциометром, со встроенного или внешнего пульта управления, выбором одной из 15 предустановленных скоростей, по входному аналоговому сигналу
- ПИД-регулятор с контролем обрыва датчика и достоверности сигнала
- Встроенный ЕМС фильтр
- Встроенное устройство динамического торможения (тормозной ключ)

1.5 Особенности преобразователя частоты ESQ 500/600

Малогабаритные преобразователи EI-8000 совмещают в себе свойства преобразователей EI-7000 и EI-9000 с упрощенным набором функций, имеют компактное исполнение, реализуют возможность плавного изменения частоты с помощью встроенного потенциометра:

- Диапазон мощностей 0,75 кВт - 15 кВт;
- Полная защита двигателя;
- Векторное управление без обратной связи;
- Встроенный ПИД-регулятор;
- Аналоговые и цифровые входы/выходы для регулирования и дистанционного управления;
- Согласование с RS-232/RS-485;
- Питание 220/380 В, 50/60 Гц.

1.6 Особенности преобразователя частоты Vacon 100

Преобразователь частоты Vacon 100 идеально подходит для систем с постоянной мощностью/крутящим моментом, включая насосы, вентиляторы, компрессоры и конвейеры. В этих сферах повышение производительности и КПД позволяет быстро вернуть вложенные инвестиции.

Основные особенности Vacon 100:

- Счетчик энергии
- Часы реального времени с календарными функциями

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

- Оптимизированное управление вентилятором охлаждения
- 2 ПИД-регулятора со спящим режимом
- Плавное заполнение, подпорный насос, автоматическая очистка насоса
- Поддержка двигателей с постоянными магнитами и асинхронных двигателей
- Автоподхват вращающегося двигателя
- Функция снятия крутящего момента и безопасного останова
- Вход термистора для контроля перегрева электродвигателя
- Графическая и текстовая клавиатура с поддержкой русского языка, интуитивный интерфейс
- Простота ввода в эксплуатацию:
 - Мастер запуска — для быстрой настройки базовых параметров насосов или вентиляторов
 - Мини-мастер ПИД-регулятора — для простого ввода в эксплуатацию внутреннего ПИД-контроллера
 - Мастер многонасосной системы — для простого ввода в эксплуатацию многонасосных систем
 - Мастер противопожарного режима — для простого ввода в эксплуатацию функции противопожарного режима
- различные насосные и вентилиационные функции

Мощность, напряжение питания, корпус Vacon 100:

3 x 380-500 В: 1,1 - 160 кВт, IP 21/54, IP00 для 90-160 кВт

Перегрузочная способность Vacon 100:

- 150% от номинального момента в течение 1 минуты

Управление двигателем Vacon 100:

- Векторный без датчика обратной связи по скорости
- Вольт-частотный режим

Охлаждение Vacon 100:

- Регулируемый по температуре вентилятор

Порты связи Vacon 100:

- Встроенный Ethernet I/P, Modbus TCP, Profinet IO, Modbus RTU

Выходная частота и частота коммутации Vacon 100:

- Максимальная выходная частота – 320 Гц
- Частота коммутации – 1,5-10 кГц

Входы\выходы управления Vacon 100:

- Количество программируемых дискретных входов - 6
- Количество аналоговых входов – 2
- Количество аналоговых выходов – 1

						13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			12

- Количество встроенных реле -3

Температура окружающей среды Vacon 100:

- Работа - -10/+50 °С
- Хранение - -40/+70 °С

ПИ\ПИД-регуляторы Vacon 100:

- ПИД-регуляторы процесса - 2

Доступные опции для Vacon 100:

- Платы дополнительных Входов\Выходов, включая входы безопасности STO
- Платы сетевых интерфейсов:
Profibus DP
CANopen
DeviceNet
- Возможность динамического торможения (для габаритов MR7-MR9)
- Степень защиты IP00 и IP54
- Графическая панель управления

1.7 Особенности преобразователя частоты EasyDrive ED3100

EasyDrive ED3100 - универсальный преобразователь частоты с высокими эксплуатационными характеристиками и могут применяться в широком диапазоне задач.

Устройства серии ED3100 и MINI-S представляют собой преобразователи частоты с бессенсорным векторным управлением, обладающие большим вращающим моментом, высокой точностью и широким диапазоном регулировки скорости.

Некоторые преимущества преобразователей частоты EasyDrive ED3100:

- низкая стоимость;
- повышенная стабильность;
- многочисленные функции рабочих режимов и управления (автоматическая настройка на параметры электродвигателя, простое управление программируемым логическим контроллером, практичная настройка ПИД-регулятора, гибкое управление периферийными устройствами с клеммами ввода-вывода, оперативное изменение параметров в диалоговом режиме, установка частоты повторения, отключение питания с сохранением в памяти текущих параметров, функция «качающейся частоты», передача данных по стандарту RS485, постоянный контроль давления подачи воды и т.д.)

Краткие характеристики

- Векторное управление (Sensorless Vector control), V/F control
- Диапазон регулировки выходной частоты - 0,1...400 Гц.

						13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			13

- Встроенный PID-регулятор.
- Перегрузочная способность - 120% (от 30 кВт и выше могут поставляются с буквой "М" в конце аббревиатуры с перегрузкой 150% - например ED3100-4T0030M - уточняйте требуемую перегрузку)
- Последовательный интерфейс (протокол Modbus).
- Встроенный пульт управления
- 2 аналоговых входа (0-20мА, минус10/+10В).
- 2 релейных и 2 цифровых выхода.
- в моделях до 18,5 кВт включительно тормозной прерыватель встроен.

Выводы по части один

В данной части ВКР были проанализированы возможности, технические характеристики и области применения преобразователей частоты для электроприводов отечественного и иностранного производства. Проведенный анализ вариантов поможет в дальнейшем выбрать подходящий преобразователь частоты для электропривода мостового крана КМ-50 грузоподъемностью 10т.

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

2 ОПИСАНИЕ МОСТОВОГО КРАНА КМ50 ГРУЗОПОДЪЕМНОСТЬЮ 10 ТОНН

2.1 Краткая техническая характеристика мостового крана

Кранами определяются как грузоподъемные механизмы, циклического действия, предназначенные для вертикального и горизонтального перемещения на большие расстояния грузов. По конструктивным особенностям, связанным с назначением и условиями эксплуатации, краны распределяются на порталные, мостовые, башенные, козловые и др. На предприятиях в цехах электромашиностроения максимальное распространение получили краны мостовые, которые осуществляют опускание и подъем тяжелых заготовок, узлов машин и деталей, а также их перемещение поперек цеха вдоль. Тип мостового крана определяется в основном спецификой цеха и его технологическим процессом, все же многие механизмы кранового оборудования, например механизмы передвижения и подъема, для различных разновидностей кранов выполняются однотипными.

На кранах используют электродвигатели, регулировочные и пусковые сопротивления, контроллеры, тормозные электромагниты, защитную, пускорегулирующую, блокировочную сигнальную и осветительную аппаратуру, выключатели конечные, токосъемники и т.д. Электропитание на кран подается или через проводники троллейные, которые неподвижно закреплены на конструкциях строительных, и токосъемники, закрепленные на кране, или используют гибкий кабель шлангового типа. Монтаж всего электротехническое оборудование электродвигатели, аппараты и электропроводку кранов производят в исполнении, отвечающем условиям и параметрам окружающей среды.

Под определенный вид грузов которые транспортируются на мостовых кранах используют разные устройства грузозахватывающие: магниты, крюки, клещи, грейферы и т.п.

Широкое распространение получили краны с системой крюковой подвеской или с электромагнитом подъемным, отдыхающий для транспортировки стальных листов, стружки и других ферромагнитных материалов.

Мостовые вентили независимо от предназначения и характера производимой работы пичкают разными грузозахватными механизмами: крюками, грейферами, особыми захватами и так далее Мостовой кран очень комфортен для применения, потому что спасибо движению по крановым путям, находящихся в высшей части цеха, он не занимает нужной площади.

Электропривод основной массы грузоподъемных механизмов характеризуется повторно - кратковременном режимом работы при большей частоте подключения, широком спектре регулировки скорости и образующихся значимых перегрузках при разгоне и торможении устройств. Особенности условия применения эл-привода в грузоподъемных машинках появились основой для производства особых серий электрических моторов и агрегатов крановой реализации.

											Лист
											15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

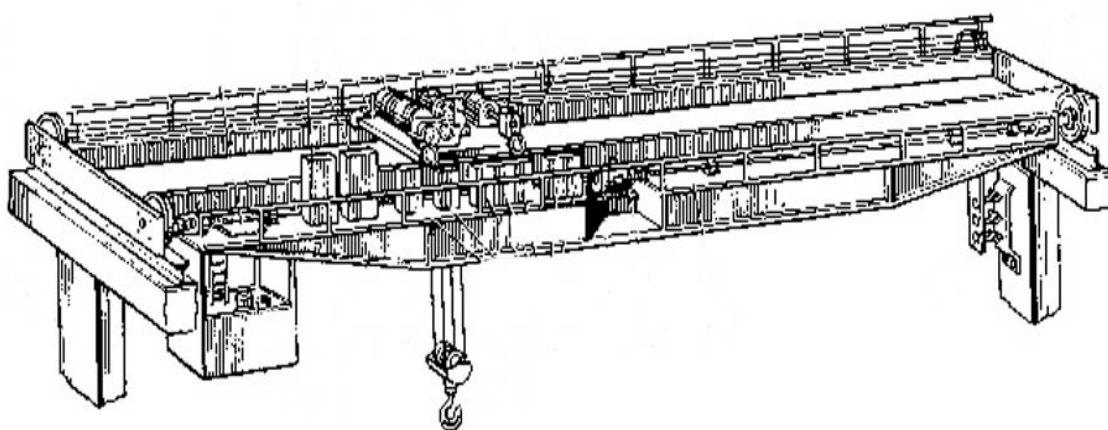
В текущее время крановое электрическое оборудование имеет в своём составе серии крановых электродвигателей переменного и постоянного тока, серии силовых и магнитных контроллеров, командоконтроллеров, кнопочных постов, окончателных выключателей, тормозных электромагнитов и электрогидравлических толкателей, пускотормозных резисторов и ряд иных агрегатов, девайсов различные крановые электроприводы.

В текущее время грузоподъемные машинки выпускаются огромным количеством заводов. Данные машинки употребляются в почти всех секторах экономики этнического хозяйства в металлургии, строительстве, при добыче нужных ископаемых, машиностроении, транспорте, и в иных секторах экономики. Становление машиностроения, специализирующиеся созданием грузоподъемных автомашин, считается принципиальным направлением становления народного хозяйства страны

2.2 Описание конструкции крана

Мостовые краны состоят из несущих частей, конкретно опирающихся на крановый путь, и моста, перемещающегося по уложенным на стене либо наружных эстакадах рельсам. Пути укладываются на подкрановые балки, опирающиеся на выступы верхней части колонны цеха. Механизм перемещения крана установлен на мосту крана. Управление всеми механизмами случается из кабины, закрепленной к мосту крана. Запитывание электродвигателей исполняется по цеховым троллеям.

Для подвода электричества используют токосъемы скользящего вида, закрепленные к металлоконструкции крана. В передовых системах мостовых



кранов токопровод исполняется при помощи эластичного кабеля. Привод ходовых колес исполняется от электродвигателя через редуктор и трансмиссионный вал.

Рисунок 2.1

										Лист
										16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

Хоть какой прогрессивный грузоподъемный кран согласно с притязаниями защищенности, имеет возможность иметь для любого рабочего перемещения в 3-х плоскостях, последующие самостоятельные механизмы: приспособление роста - опускания багажа, приспособление манёвра крана в горизонтальной плоскости и механизмы профилактики зоны работы крана (манёвра телеги).

Грузоподъемные машинки выделяют для разных критерий применения: по ступени загрузки, времени работы, интенсивности ведения операций, ступени ответственности грузоподъемных операций и погодных факторов эксплуатации

2.3 Кинематические схемы механизмов мостового крана.

Работу главных устройств крана оценивают по кинематическим схемам. Потому что движки обыкновенно имеют угловую скорость, существенно огромную, нежели скорость подъемного барабана либо ходовых колес моста либо телеги, то перемещение к трудящимся органам устройств крана передается через редукторы.

Для устройств роста величайшее использование возымали схемы с полиспастом П (рис 2.2), с помощью которого перемещение от барабана Б передается крюку.

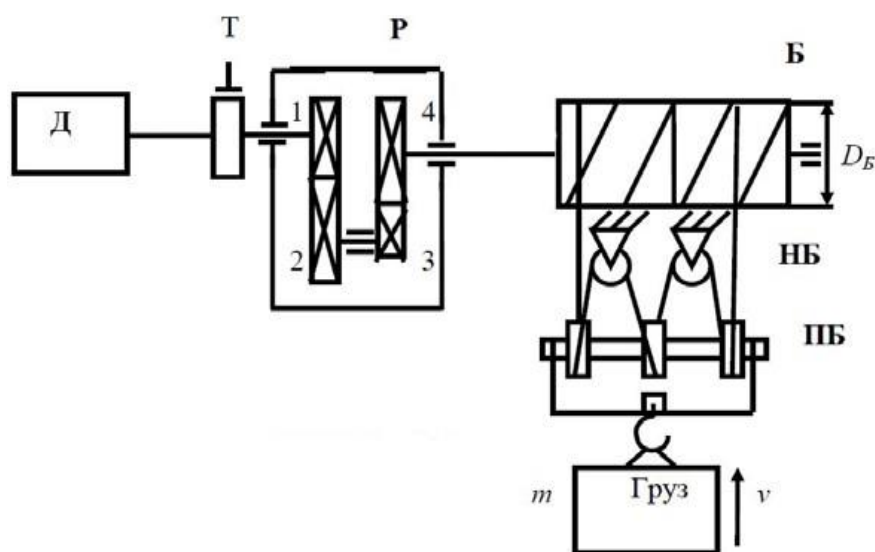


Рисунок 2.2

Движок Д через редуктор Р приводит во вращение барабан лебедки, на который канат наматывается при росте и сматывается при опускании багажа m .

Грузозахватное механизм подвешивается на подвижных блоках ПБ, которые образуют с неподвижными что же касается лебедки блоками НБ полиспаст.

Движок врубается в работу опосля строповки багажа, потом выбирается слабина каната. Дальше производится разгон с ускорением не выше разрешенного до рабочей скорости и поддерживается рост багажа. При достижении данной

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

вышины движок тормозится, на вал мотора накладывается тормоз Т. Удержание багажа в подвешенном состоянии выполняется тормозом.

При спуске багажа выдерживается ускорение не выше возможного, движок трудится в тормозном режиме. При раскладе багажа к площадке выгрузки скорость спуска понижается, груз плавно устанавливается на площадку. Ослабляется натяжение канатов для расстроповки багажа, крюк отцепляется и цикл работы повторяется.

2.4 Условия работы и требования, предъявляемые к электроприводу мостового крана.

Завышенная опасность дел при перевозке поднятых грузов просит при расчете и эксплуатации соблюдение неотклонимых верховодил по приспособлению и эксплуатации подъемно-транспортных автомашин. На механизмах роста и манёвры правилами по приспособлению и эксплуатации учтена установка ограничителей хода, которые действуют на электронную схему управления. Окончательные электровыключатели приспособления роста сдерживают ход грузозахватывающего механизма ввысь, а электровыключатели устройств манёвры моста и телеги сдерживают ход устройств в обе стороны.

Учитывается помимо прочего установка окончательных выключателей, предотвращающих наезд механизмов в случае работы 2-ух и более кранов на одном мосту. Исключение оформляют установки со скоростью перемещения до 30 м/минут Крановые механизмы обязаны быть снабжены тормозной системой замкнутого вида, действующими при снятии напряжения.

На крановых установках разрешается использовать рабочее напряжение до 500 В, потому крановые механизмы пичкают электрическим оборудованием на напряжения 220, 380, 500 В переменного тока и 220, 440 В неизменного тока. В схеме управления предугадывают наивысшую охрану, отключающую движок при перегрузке и маленьком замыкании. Никакая охрана ликвидирует самозапуск движков при подаче напряжения в последствии перерыва в электроснабжении. Для неопасного профилактики электрического оборудования, оказавшегося на ферме моста, устанавливают, блокировочные контакты на лючке и двери кабины. При открывании лючка либо двери напряжение с электрического оборудования снимается.

Для высококачественного исполнения роста, спуска и движения грузов электропривод крановых устройств обязан удовлетворять последующим главным притязаниям:

- регулирование угловой скорости двигателя в сравнимо широких границах по вопросу тем, собственно томные грузы целенаправлено перемещать с наименьшей скоростью, а пустующей крюк либо ненагруженную телегу – с большей скоростью для роста производительности крана. Пониженные скорости нужны помимо прочего для воплощения четкой остановки транспортируемых грузов имея цель лимитирования ударов при их высадке и упрощают работу оператора

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

- ограничение ускорений до допустимых пределов при малой продолжительности переходных действий. 1-ое условие соединено с ослаблением ударов в мех-ских передачах в момент выбора промежутка, с предупреждением пробуксовки ходовых колес тележек и мостов, с убавлением раскачивания подвешенного на канатах багажа при насыщенном разгоне и внезапном торможении устройств манёвры; 2-ое условие нужно для обеспечения высочайшей производительности крана;

2.5 Современные крановые электроприводы, обоснование и выбор.

Основное назначение электропривода крана - регулирование скорости механизмов подъема и передвижения в некотором диапазоне. В первую очередь, тип электропривода зависит от физических принципов регулирования скорости конкретных видов двигателей.

На практике чаще всего применяются следующие двигатели:

- электродвигатели постоянного тока; асинхронные электродвигатели с фазным ротором;
- асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

В таблице 2.1 приведены достоинства и недостатки электродвигателей, используемых на кранах.

Таблица 2.1 - Сравнение двигателей, используемых на кранах

	Достоинства	Недостатки
Двигатели постоянного тока	- простота устройства и принципов управления; - практически линейные механические и регулировочные характеристики;	- дороговизна изготовления; - износ и необходимость профилактического обслуживания коллекторнощёточных узлов;
	-	-

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором	большой начальный вращающий момент; приблизительно постоянная скоростью при различных перегрузках; - меньший пусковой ток по сравнению с электродвигателями с короткозамкнутым ротором.	- ольшие габариты; - ороговизна изготовления; - знос и необходимость профилактического обслуживания коллекторно- щеточных узлов.
Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором	относительная дешевизна; - тсутствие коллекторно-щётчных узлов; - егкость конструкции и простота ее изготовления; - ысокий КПД по сравнению с двигателями с фазным ротором.	- большой пусковой ток (до 5-7 Iп); сложное техническое оборудовании для регулирования скорости вращения.

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение на тяжелых металлургических производствах, в т.ч. на литейных кранах. В настоящее время, новые краны с двигателями постоянного тока практически не изготавливаются. Асинхронные электродвигатели с фазным ротором получили наибольшее распространение на кранах в советское время и популярны в наши дни. Двигатели данного типа применяются как для реконструкции, так и для новых грузоподъемных кранов.

Существует множество разновидностей систем управления для двигателей с фазным ротором. Изменение скорости и момента таких двигателей достигается путем включения в цепь ротора дополнительных электрических устройств. В зависимости от требований к диапазону регулирования скорости могут применяться:

- реостатные системы;
- дроссельные системы без регулирования скорости;
- дроссельные системы с тиристорными регуляторами.

В качестве коммутационного оборудования в цепях статора и ротора могут применяться:

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

- силовые контакторы, пускатели, реверсоры (и другие механические устройства коммутации);
- тиристоры (тиристорные ключи);
- IGBT-транзисторы;
- гибридные системы.

На сегодняшний день такая система управления морально устарела и на фоне современных микропроцессорных систем управления мостовыми кранами зарубежных производителей с частотным регулированием отличается повышенным энергопотреблением. Явным недостатком такой системы является такое явление, как «избыточный динамический момент», который возникает в момент пуска электродвигателя. Это явление порождает ударные нагрузки, приводит к преждевременному износу элементов, появлению люфтов в трансмиссии приводов, снижению точности позиционирования, повышенной утомляемости операторов и, как следствие, ухудшение качества выполняемых грузоподъёмным механизмом работ.

Текущие и капитальные ремонты дадут эффект только на несколько месяцев, а дальше снова «разбитые» элементы трансмиссии. Это явление обусловлено спецификой подбора первой ступени резисторов. В релейно- контакторных системах управления со ступенчатым регулированием скорости «избыточного динамического момента» никак не избежать – это технологическая особенность такого привода, она заключается в том, что первая пусковая ступень резисторов подбирается таким образом, чтобы пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором был равен критическому моменту для устойчивости от «опрокидывания». То есть при пуске двигатель практически мгновенно развивает максимально-возможный момент, что порождает ударные нагрузки, именуемые «динамическим моментом». При проектировании и изготовлении грузоподъёмного оборудования мощность электродвигателей в 2-3 раза превышала фактические требования механизма.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором мало применялись на кранах в советское время в силу технологической сложности регулирования скорости.

Использование ограничивалось легкими тельферными подъемниками, кран-балками и прочими одно-, двухскоростными тихоходными механизмами. В остальных случаях заменить двигатели постоянного тока либо двигатели с фазным ротором в то время они не могли. Ситуация изменилась лишь с широким распространением и удешевлением преобразователей частоты. Снижение цен на полупроводниковые приборы в конце 90-ых годов подтолкнуло краностроителей к переходу к современным системам управления. Начиная с 2000 года в СНГ на новых кранах стали всё чаще применяться системы на базе преобразователей частоты. Преобразователи частоты позволяют плавно изменять величину напряжения и частоту на клеммах двигателя, благодаря чему становится возможным управлять скоростью вращения двигателя, сохраняя номинальный момент во всем диапазоне регулирования.

						13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			21

Использование асинхронного двигателя на базе преобразователя частоты обеспечит:

- абсолютный контроль и безударное регулирование скорости, ускорения и момента при любой массе груза (в пределах допускаемой);
- плавный разгон и торможение всех механизмов крана с заданным ускорением, что обеспечивает плавное нарастание моментов и усилий во всех узлах и механизмах крана;
- регулирование скорости АД с помощью преобразователей частоты дает экономию электроэнергии до 20 %, электроприводы работают с cosφ близким к 1;
- программируемый логический контроллер, использованный в системе кранового электропривода, и имеющий связь по сети с ПЧ, позволяет решить задачи диагностики, статистического сбора и обработки всех сигналов и нагрузок;
- тормозные колодки не требуют частой замены, а тормоза – постоянной регулировки, поскольку управляемое торможение осуществляют ПЧ, а тормоза служат лишь для удержания после полной остановки механизма;
- ограничение моментов как статических, так и динамических;
- устранение перекосов и раскачивания грузов;
- защита электродвигателей (максимально-токовая, время-токовая, тепловая и др.);
- улучшение условий работы оператора крана за счет применения современной аппаратуры управления;
- сокращение количества релейно-контакторной аппаратуры позволяет повысить надежность работы электрооборудования и уменьшить трудозатраты на профилактическое обслуживание;
- уменьшение динамических нагрузок на механизмы крана и увеличение сроков службы оборудования.

2.6 Противораскачивание груза.

Каждое движение крана с подвешенным грузом приводит к его колебаниям, поэтому оператор крана должен постоянно корректировать свои действия с учетом этого раскачивания. Опытный и внимательный оператор может достаточно быстро уменьшить колебания груза путем принятия соответствующих контрмер. Если же оператор не обладает большим опытом управления краном или оператор потерял внимание по причине утомления, то даже самые простые операции могут привести к огромной потере времени или к возникновению рисков коллизий и/или аварийных ситуаций.

Системы уменьшения колебаний груза (системы противораскачивания), снимают с оператора задачи по уменьшению раскачивания груза, как следствие он может сосредоточиться на управлении краном, сконцентрироваться на подъеме груза, его перемещении, позиционировании и опускании в нужную точку.

										Лист
										22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

Системы противораскачивания служат для уменьшения колебаний груза, вызванных ускорениями механизмов в процессе эксплуатации крана. Успокоение достигается за счет точного воздействия на процессы разгона и торможения. Такие системы могут применяться как в составе систем управления для новых кранов, так и в качестве дополнения к уже существующим системам управления. Уменьшение колебаний позволяет снизить риск возникновения коллизий и аварийных ситуаций в сочетании с одновременной быстротой и точностью позиционирования груза. Система противораскачивания позволяет уменьшить колебания при перемещении моста, тележки и поворота крана одновременно. Существует два основных вида электронных систем противораскачивания: системы с прямой обратной связью, имеющие в своем составе камеру и рефлектор (отражатель), которые обеспечивают получение оперативной достоверной информации об отклонении груза, и системы, работающие на основе математической модели, описывающей колебания груза при движении механизмов крана, то есть угол отклонения груза в той или иной плоскости вычисляется исходя из физических и математических законов. В системах с обратной связью камера с высоким разрешением используется для измерения отклонения крюка или другого типа грузозахватного органа от своей оси. Для того, что бы сделать это возможным, на грузозахватный механизм устанавливается специальный отражатель. В самом простом случае отражатель представляет собой плоскость квадратной формы с расположенными на ней в шахматном порядке двумя белыми квадратами. Данный тип рефлектора называется пассивным. В случае, когда на него могут воздействовать чрезмерное освещение или тени, которые влияют на точность системы измерения, рекомендуется использовать активный рефлектор, снабженный LED-матрицей, а также обогревом, способствующим таянию снега, если кран используется на открытом воздухе. Самым лучшим же выходом в случае использования системы «камера-рефлектор» является применения инфракрасного рефлектора и оснащение камеры инфракрасным фильтром. Точность определения колебаний составляет 5 мм на расстоянии от камеры до рефлектора 10м, точность определения расстояния между камерой и рефлектором составляет 1%. Такие системы способны также исключать колебания груза при наличии сильного бокового ветра.

Какой бы вид системы противораскачивания груза ни был установлен на кране, ее применение ведет к снижению времени выполнения операций, повышению точности позиционирования груза, уменьшению утомляемости операторов во время работы, а также снижает риск возникновения аварийных ситуаций.

2.7 Исходные данные и постановка задачи

Исходными данными проектирования являются физические и геометрические параметры механизма подъема мостового крана. Исходные данные представлены в таблице 2.2.

										13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							23

Таблица 2.2 - Исходные данные проектирования

Наименование параметра	Значение параметра
Тип крана	кран мостовой опорный
Конструкция кранового моста	двухбалочный мост, балки коробчатые
Грузоподъемность крана, т	10
Кратность полиспаста, а	3
Пролёт, м	16
Высота подъёма, м	6
Номинальная скорость подъема, м/с	0,1
Номинальная скорость движения тележки, м/с	0,63
Диаметр барабана лебедки, м	90 10 ³
Напряжение в канате, тс/см ²	2
Модуль упругости каната, тс/см'	1500
Масса крана, т	5,07
Масса тележки, т	0,6
Род тока, в	380
Продолжительность включения крана, %	25
Высота пролетной балки, м	6
Электродвигатель подъемного механизма, мощность	4АМ112М2, 7.5 кВт

2.8 Обоснование модернизации привода подачи

Во время эксплуатации крана были выявлены следующие недостатки привода подачи:

- Низкий К.П.Д. преобразователя;
- Высокая инерционность преобразователя;
- Устаревшая элементная база;
- Необходимость постоянного технического обслуживания коллекторно-щеточного узла двигателя подачи;
- Низкая надёжность автоматики, реализованной с помощью реле.

Кроме того, следует отметить, что в настоящий момент привод подачи практически не пригоден для ремонта, т.к. оборудование привода подачи сильно морально и физически устарело. Всё вышесказанное свидетельствует о необходимости модернизации привода подачи.

						13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			24

Проведение модернизации может исправить все перечисленные выше недостатки. Использование современного частотно регулируемого асинхронного электропривода позволит устранить ряд недостатков привода подачи постоянного тока. Асинхронный двигатель значительно надежнее двигателя постоянного тока, а отсутствие щеточно-коллекторного аппарата снижает расходы на регулярное техническое обслуживание двигателя. Современные преобразователи имеют высокий К.П.Д. и значительное быстродействие.

Выводы по части два

В данной части ВКР рассматривается конструкция, назначение и техническая характеристика мостового крана КМ-50 грузоподъемностью 10т. , а также приводится обоснование модернизации привода подачи.

					<i>13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		25

3 ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА.

3.1 Выбор электродвигателя и определение параметров схемы замещения.

$$P \geq \frac{P_c}{k_T},$$

Расчет предварительной мощности двигателя производится по формуле:

где

P - мощность двигателя, Вт;

P_c - статическая мощность электродвигателя, Вт ;

k_T= 1 — коэффициент, учитывающий режим работы механизма, вид управляющего устройства и электропривода.

Статическая мощность электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$P_c = \frac{F_r \cdot V}{\eta_m},$$

где

F_r - грузоподъемная сила. Н;

η_m = 0,9 значение КПД механизма подъема. Грузоподъемная сила рассчитывается по формуле:

$$F_r = m_r \cdot g,$$

где

g = 9,81 м/с² — ускорение свободного падения,

m_r - номинальная масса груза, кг.

$$F_r = 10000 \cdot 9,81 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Статическая мощность электродвигателя:

$$P_c = \frac{9,81 \cdot 10^4 \cdot 0,1}{0,9} = 10,9 \text{ кВт}$$

$$P \geq \frac{10,9 \cdot 10^3}{1} = 10,9 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Из справочника выбираем с учетом ПВ = 25% и мощности P > 10.9 кВт электродвигатель серии 5Л. Технические данные электродвигателя приведены в таблице.

										Лист
										26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

Параметры электродвигателя

Типо- размер	$P_{дв.н},$ кВт	$n_{ном},$ об/мин	$\eta, \%$	$\cos \phi_{н}$	$M_{н} /$ $M_{ном}$	$I_{н} /$ $I_{ном}$	$s_{н}, \%$	$J_{дв},$ кг·м ²
5A160S6	11	970	87	0,82	1,9	6,5	3	0,11

Синхронная угловая частота вращения:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{1н}}{z_p} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с.}$$

Угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_{дв.н} = (1 - s_{н}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,03) \cdot 104,7 = 101,5 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент:

$$M_{дв.н} = \frac{P_{дв.н} \cdot 10^3}{\omega_{дв.н}} = \frac{11 \cdot 10^3}{101,5} = 108,3 \text{ Н·м.}$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток (действующее значение) статора при схеме соединения обмоток звезда:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \text{ В;}$$

$$I_{1фн} = I_{1лн} = I_{дв.н} = \frac{P_{дв.н}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \phi_{н} \cdot \eta_{н}} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,87} = 23,36 \text{ А.}$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1\text{макс}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1лн} = 6,5 \cdot 23,36 = 151,84 \text{ А.}$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике:

$$M_k = m_k \cdot M_{дв.н} = 2,5 \cdot 108,3 = 270,7 \text{ Н·м.}$$

Пусковой момент двигателя при пуске:

$$M_{дв.пуск} = m_{п} \cdot M_{дв.н} = 1,9 \cdot 108,3 = 205,7 \text{ Н·м.}$$

Ток холостого хода двигателя:

										Лист
										27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$$I_0 = I_{1n} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{1p^*}}{I_{1n}}\right)^2 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{(1 - p^* \cdot s_n)}\right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{(1 - p^* \cdot s_n)}\right]^2}}, \text{ A}$$

где

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \cdot P_{двн}}{3 \cdot U_{1\phi n} \cdot (\cos \phi_{p^*} \cdot \eta_{p^*})} = \frac{0,75 \cdot 11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot (0,77 \cdot 0,87)} = 18,66 \text{ A}$$

-ток фазы статора при частичной нагрузке;

$p^* = 0,75$ - степень загрузки;

$n_{p^*} = n_n = 0,87$ - КПД при частичной нагрузке;

$\cos \phi_{p^*}$ - коэффициент мощности в режиме частичной загрузки.

$$I_0 = 23,362 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{18,66}{23,362}\right)^2 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,03)}{(1 - 0,75 \cdot 0,03)}\right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,03)}{(1 - 0,75 \cdot 0,03)}\right]^2}} = 10,139 \text{ A.}$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot m_k \cdot P_{двн} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k}\right)}, \text{ Ом}$$

где

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_f \cdot I_{1\phi n}} = 1 + \frac{10,139}{2 \cdot 6,5 \cdot 23,3} = 1,033$$

$\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$; -коэффициент характеризующий отношение

$$R_2' = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,03)}{2 \cdot 2,5 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 1,033^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,03}\right)} = 0,328 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение:

										Лист
										28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

$$s_k = s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,03 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)} = 0,159$$

где

$B=1$ -коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора.

Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме:

$$R_1 = R_2' \cdot \beta \cdot C_1 = 0,328 \cdot 1 \cdot 1,033 = 0,339 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме:

$$X_{кз} = R_2' \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,328 \cdot 6,225 \cdot 1,033 = 2,112 \text{ Ом,}$$

где

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,03}\right)^2 - 1^2} = 6,225$$

-коэффициент, характеризующий

соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведённого активного сопротивления ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{кз} = 0,42 \cdot 2,112 = 0,887 \text{ Ом.}$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{ин}} = \frac{0,887}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,823 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме:

$$X_{2\sigma}' = 0,58 \cdot \frac{X_{кз}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{2,112}{1,033} = 1,185 \text{ Ом.}$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{ин}} = \frac{1,185}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,773 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

ЭДС ветви намагничивания E_m , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi n} \cdot \cos \phi_n - I_{1\phi n} \cdot R_1)^2 + (U_{1\phi n} \cdot \sin \phi_n - I_{1\phi n} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ = \sqrt{(220 \cdot 0,82 - 23,36 \cdot 0,339)^2 + (220 \cdot 0,572 - 23,36 \cdot 0,887)^2} = 202,026 \text{ В}$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания:

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202,026}{10,139} = 19,92 \text{ Ом.}$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре:

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1n}} = \frac{19,925}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,063 \text{ Гн.}$$

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице:

Параметры схемы замещения электродвигателя

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, мГн	X_μ , мГн	L_μ , Гн	R'_2 , Ом	$X'_{2\sigma}$, Ом	$L'_{2\sigma}$, мГн	$X_{кн}$, Ом
0,339	0,887	2,823	19,925	0,063	0,328	1,185	3,773	2,112

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{эм.н}^* = \frac{3 \cdot U_{1\phi n}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s_n \cdot \left[X_{кн}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s_n} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s_n \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{эм.н}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L'_{2\sigma})} \cdot \Psi_{2н} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1н}^2 - I_0^2} = 114,975 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

где

$$\Psi_{2н} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 10,139 \cdot 0,063 = 0,909 \text{ Вб.}$$

Условия выполняются:

										Лист
										30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$$M_{дв.н} < M_{эм.н}^* \leq 1,1 \cdot M_{дв.н}$$

$$108,3 < 115,146 \leq 1,1 \cdot 114,975 = 119,12;$$

$$M_{эм.н}^{**} = 114,975 \approx M_{эм.н}^* = 115,146.$$

Следовательно, предварительно выбранные параметры $(\cos\varphi_{D^*} \cdot \eta_{D^*})$ и β выбраны верно.

3.2 Расчет редуктора и тормозного устройства.

Угловая скорость барабана определяется по формуле:

$$\omega_{\bar{\sigma}} = \frac{2 \cdot V \cdot a}{D_{\bar{\sigma}}}, \text{ рад / с}$$

где

$a=3$ кратность полиспаста.

$D_{\bar{\sigma}}=90 \cdot 10^{-3}$ - диаметр барабана.

$$\omega_{\bar{\sigma}} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 3}{90 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \text{ рад / с}$$

Передаточное число определяется по формуле:

$$i = \frac{\omega_{дв}}{\omega_{\bar{\sigma}}},$$

Следовательно:

$$i = \frac{101,526}{6,6} = 15,3$$

Выбираем редуктор с передаточным отношением $i=16$

Статистический момент на валу редуктора при торможении вычисляется по формуле:

$$M_{ст} = \frac{M_{г} \cdot \eta_m \cdot \eta_a}{i}$$

где

$M_{ст}$ -статистический момент на валу редуктора при торможении, Н м;

$M_{г}$ -грузовой момент на барабане, Н м;

$\eta_m=0.9$ - КПД, механизма, принимаем равным к КПД редуктора;

								13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					31

n_a -КПД полиспаста;

i -номинальное передаточное число редуктора.

Вычисляем КПД полиспаста по следующей формуле:

$$\eta_a = \left(\frac{1 + \eta_1 + \eta_1^2 + \dots + \eta_1^{a-1}}{a} \right) \cdot \eta_1^k,$$

где

$\eta_1=0.98$ -КПД блока на подшипниках качения;

k -число обводных блоков(для мостового грана $k=0$).

КПД полиспаста:

$$\eta_a = \frac{1 + 0,98 + 0,98^2}{3} = 0,98;$$

Наибольшее натяжение ветви каната, набегающего на барабан при подъеме груза, определяется по формуле:

$$F_a = \frac{F_r}{\alpha \cdot \mu \cdot \eta_a},$$

где

F_a -натяжение ветви каната, Н м.

μ -число полиспастов. Для мостового крана $\mu=2$ т.е. оба конца каната закреплены на барабане для строго вертикального подъема груза и выравнивания усилий на опоры барабана.

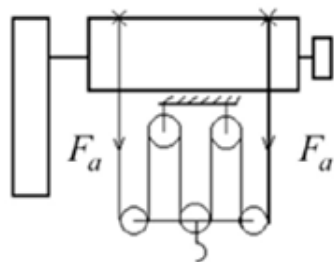


Рисунок 3.1-Схема полиспаста механизма подъема груза: $\mu=2$, $a=3$.

$$F_a = \frac{9,81 \cdot 10^4}{3 \cdot 2 \cdot 0,98} = 16,68 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

Грузовой момент на барабане определяется по формуле:

$$M_r = \frac{\mu \cdot F_a \cdot D_b}{2},$$

Получим:

$$M_{\Gamma} = \frac{2 \cdot 1,98 \cdot 10^4 \cdot 90 \cdot 10^{-3}}{2} = 1782 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Статистический момент на валу редуктора:

$$M_{\text{ст}} = \frac{1782 \cdot 0,9 \cdot 0,98}{16} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тормозной момент, на который регулируют тормоз, вычисляется по формуле:

$$M_{\text{тр}} \geq k \cdot M_{\text{сп}},$$

где

$M_{\text{тр}}$ -тормозной момент, Н·м,

k -коэффициент запаса торможения.

$k > 1.5$ тогда принимаем $k=2$.

$$M_{\text{тр}} = 2 \cdot 98 = 196 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3.3 Расчет статистических характеристик электродвигателя.

Естественная механическая характеристика $M_{\text{ЭМ}}(S)$ электродвигателя для чистоты $f_{1\text{н}}=50$ Гц рассчитывается по выражению:

$$M_{\text{ЭМ}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]},$$

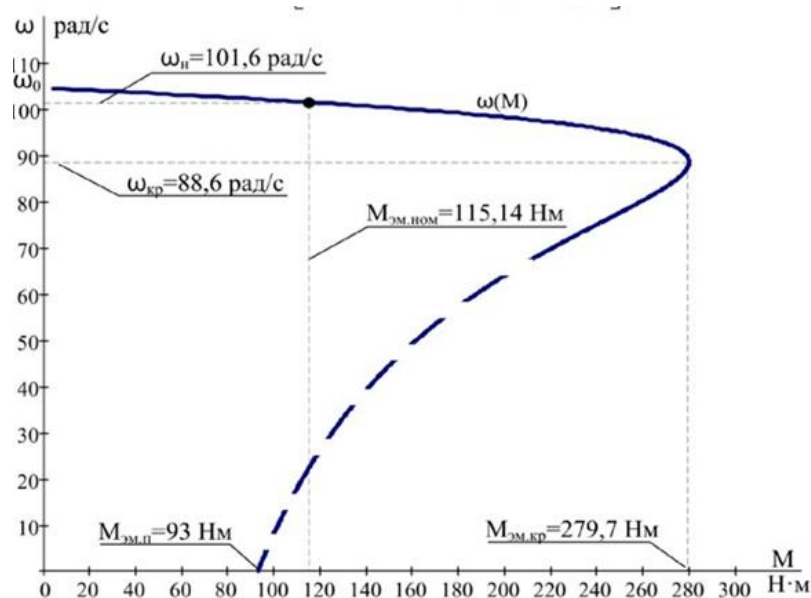
где

$M_{\text{ЭМ}}$ -электромагнитный момент двигателя, Н · м.

Механическая характеристика $\omega(M_{\text{ЭМ}})$ показана на рисунке 3.2

Значение электромагнитного номинального момента при номинальном скольжении $S_{\text{н}}$:

$$M_{\text{ЭМ}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{ЭМ.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м};$$



Механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega(M)$

Рисунок 3.2

Момент трения на валу двигателя:

$$M_{с.дв} = M_{эм.н} - M_{дв.н} = 115,146 - 108,23 = 6,8 \text{ Нм.}$$

Критическое скольжение:

$$s_k = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2}{R_1^2 + X_{кн}^2}} = 0,328 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,339}{19,925}\right)^2}{0,339^2 + 2,112^2}} = 0,153 ;$$

Электромагнитный критический момент при критическом скольжении:

$$M_{эм}(s_k) = M_{эм.к} = \frac{3 \cdot U_{1фн}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2 \right]} \right\}} = 279,7 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Естественные электромеханические характеристики $I_1(s)$ и $I_2'(s)$

электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{1н} = 50$ Гц по выражению:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} ,$$

где

I_1 и $I_{1ф}$ - действующее значение фазного тока, А;

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

$$I_2(s) = \frac{U_{1\dot{\varphi}_m}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_m^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0,339 + \frac{0,328}{s}\right)^2 + 2,112^2 + \left(\frac{0,339 \cdot 0,328}{s \cdot 19,925}\right)^2}};$$

-приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\dot{\varphi}_m}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,339^2 + (0,887 + 19,925)^2}} = 10,56 \text{ А},$$

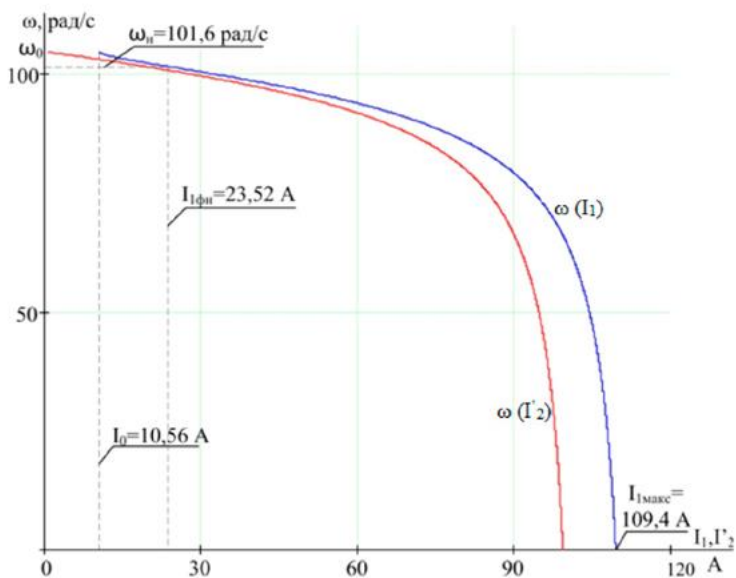
-действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_m}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_m)^2}} = \frac{2,112}{\sqrt{\left(0,339 + \frac{0,328}{s}\right)^2 + (2,112)^2}}$$

По результатам расчета построены электромеханические характеристики двигателя $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2)$ где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по формуле:

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Для скольжения $S=S_H$ рассчитывается значения номинального тока статора $I_{IH}(S_H)$



Естественные электромеханические характеристики двигателя
 $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2)$

Рисунок 3.3

В результате расчета естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 3\%; \quad s_K = 15,3\%; \quad I_{1H} = 23,52 \text{ A}; \quad I_{1\text{макс}} = 109,4 \text{ A};$$

$$I_{1\text{макс}} / I_{1H} = 4,68 \text{ A}; \quad M_{\text{ЭМ.Н}} = 115,14 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{ЭМ.К}} = 279,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{ЭМ.К}} / M_{\text{ЭМ.Н}} = 2,42; \quad M_{\text{ЭМ.пуск}} = 93 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{ЭМ.пуск}} / M_{\text{ЭМ.Н}} = 0,8;$$

Справочные и расчетные параметры двигателя:

$$s_H = 3\%; \quad s_K = 15,9\%; \quad I_{\text{ДВ.Н}} = 23,36 \text{ A}; \quad I_{\text{ДВ.макс}} = 151,84 \text{ A}$$

$$I_{\text{ДВ.макс}} / I_{\text{ДВ.Н}} = 6,5; \quad M_{\text{ДВ.Н}} = 108,3 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_K = 270,7 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_K / M_{\text{ДВ.Н}} = 2,5; \quad M_{\text{ДВ.пуск}} = 205,7 \text{ Н}\cdot\text{м}; \quad M_{\text{ДВ.пуск}} / M_{\text{ДВ.Н}} = 1,899$$

Сравнения параметров расчётных характеристик со справочными параметрами двигателя показывают соответствие условиям для их характерных точек

$M_{\text{ЭМ.Н}} > M_{\text{ДВ.Н}}$, $M_{\text{ЭМ.К}} > M_K$. Условие $M_{\text{ЭМ.пуск}} > M_{\text{ДВ.пуск}}$ не выполняется, поэтому часть характеристики $\omega(M)$ показана пунктиром.

3.4 Выбор типа преобразователя и расчет параметров структурной схемы двигателя.

Для регулируемого асинхронного электропривода подъема мостового крана используем преобразователь серии Mitsubishi FR-F740-00250 [13], параметры которого приведены в таблице:

Параметры преобразователя частоты Mitsubishi

Модель	Число фаз на входе	U_H , В	$I_{H.N}$, А	$I_{H.макс}$, А	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
Mitsubishi FR-F740-00250	3	380	25	30	11

Таблица 3.1

Общие технические данные преобразователя частоты Mitsubishi:

- коэффициент мощности 0,8;
- КПД не менее 0,96;
- выходная частота 0,5÷400 Гц;
- частота ШИМ 0,7÷14,5 кГц, (принимается 10 кГц).

Способ управления – векторный.

К электроприводам механизмов подъема мостовых кранов предъявляются наиболее жесткие требования, поэтому был выбран векторный способ управления. Использование преобразователя частоты с векторным управлением позволит повысить скорость перемещения и точность останова груза, за счет ограничения рывка и ускорения обеспечить отсутствие ощутимых толчков при старте и остановке, увеличить срок службы основных механических узлов – тяговых тросов, тормозных колодок, редукторов, подвески противовеса.

Эквивалентные индуктивности обмоток статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,002823 + 0,063 = 0,066 \text{ Гн};$$

ротора, приведённой к цепи статора:

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,003773 + 0,063 = 0,067 \text{ Гн};$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,063^2}{0,066 \cdot 0,067} = 0,096.$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора:

$$R_{1\varepsilon} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L'^2_2} = 0,339 + 0,328 \cdot \frac{0,063^2}{0,067^2} = 0,632 \text{ Ом}.$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\varepsilon} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\varepsilon}} = \frac{0,096 \cdot 0,066}{0,632} = 0,01 \text{ с}.$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,067}{0,328} = 0,205 \text{ с}.$$

3.5 Расчет характеристик двигателя при векторном управлении и проверка выбора двигателя и преобразователя.

В плоскости механической характеристики рисунка 3.2 рассчитаны и построены: $\omega(M)$ рассчитаны и построены:

1. Характеристика электромагнитного номинального момента

$$M_{ЭМ.Н} = 115.14 \text{ Н м.}$$

2. Характеристика статического момента максимальной нагрузки

$$M_{С. ЭМ.МАКС}(\omega) = M_{С.МАКС}(\omega) + \Delta M_{С.ДВ},$$

Где

$$M_{С. \max} = M_{гр. \max} = (1 + a + b) \left(\frac{m_{гр} \cdot g}{\alpha} \cdot R_{\delta} \right) \frac{1}{i_{ред}},$$

Где

$$a = b = \frac{1 - \eta_{пер} \cdot \eta_{ред}}{2 \cdot \eta_{пер} \cdot \eta_{ред}} \text{ -коэффициент постоянных (a) и переменных (b) потерь механизма,}$$

$$\eta_{пер} = 0,96; \eta_{ред} = 0,98.$$

$m_{гр} = 10 \cdot 10^3$ -масса груза;

$R_{\delta} = 45 \cdot 10^{-3}$ -радиус барабана:

$$M_{С. \max} = (1 + 0,031 + 0,031) \left(\frac{10^4 \cdot 9,8}{3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \right) \frac{1}{16} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{С. ЭМ.МАКС}(\omega) = 98 + 6,8 = 104,8 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Характеристика статического момента минимальной нагрузки

$$M_{С. ЭМ.МАКС}(\omega) = M_{С.МАКС}(\omega) + \Delta M_{С.ДВ},$$

Где

$$M_{С. \min}(\omega) = a \cdot \left(\frac{m_{гр} \cdot g}{\alpha} \cdot R_{\delta} \right) \frac{1}{i_{ред}}, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с.мин}(\omega) = 0,031 \cdot \left(\frac{10^4 \cdot 9,8}{3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \right) \frac{1}{16} = 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с.эм.мин}(\omega) = 2,8 + 6,8 = 9,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Зависимость длительного допустимого момента электродвигателя

$M_{эм.длит.доп}(\omega)$ по выражению:

$$\begin{cases} M_{эм.длит.доп}(\omega) = \left(k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega}{\omega_{дв.н}} \right) \cdot M_{эм.н} & \text{при } 0 < \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{дв.н}; \\ M_{эм.длит.доп}(\omega) = M_{эм.н} = 115,14 \text{ Н} \cdot \text{м}, & \text{при } 0,5 \cdot \omega_{дв.н} < \omega \leq \omega_{дв.н}. \end{cases}$$

где,

$k=0,95$ – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя при неподвижном роторе.

5. Значение $M_{эм.макс}$ соответствующее максимальному току электропривода $I_{эм.макс}$. Для этого на естественной электромеханической характеристике определено соответствующее $I_{эм.макс}=I_{и.макс}$ значение скольжения

$$s_{T.1} = \frac{\omega_0 - \omega_{T.1}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 100,43}{104,7} = 0,041$$

и при этом скольжении найдено значение максимального электромагнитного момента

$$\begin{aligned} M_{эм.макс} &= \frac{3 \cdot U_{фн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{T.2} \cdot \left[(X_{кн})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{T.2} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = \\ &= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,328}{104,72 \cdot 0,041 \cdot \left[(2,112)^2 + \left(0,339 + \frac{0,328}{0,041} \right)^2 + \left(\frac{0,339 \cdot 0,328}{0,041 \cdot 19,925} \right)^2 \right]} = 149,65 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

В плоскости электромеханической характеристики $\omega(I_1)$ рисунка 3.3 рассчитаны и построены:

1. Зависимость максимальной нагрузки:

										Лист
										39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$$I_{c \text{ макс}}(\omega) = \sqrt{\left(\frac{M_{c \text{ эм. макс}}(\omega)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot Z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + I_0^2 =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{104,8}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 \cdot 0,909 \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + 10,56 = 21,9 \text{ А.}$$

где при $\omega \leq \omega_{\text{дв.н}}$ $\Psi_{2d} = \Psi_{2н}$;

Зависимость от скорости длительно допустимого тока электродвигателя:

$$I_{1\text{ф длит. доп}}(\omega) = \begin{cases} I_{1\text{ф н}} \cdot \left[k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right] & \text{при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ I_{1\text{ф н}} & \text{при } \omega > 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \end{cases}$$

2. Номинального тока инвертора ; $I_{и.н}=25\text{А}$;
3. Максимального тока инвертора ; $I_{и.макс}= 30\text{А}$;
4. Выбор кратковременно допустимого (максимального) тока двигателя в пуско-тормозных режимах

$$I_{1\text{ф кратк. доп}}(\omega) \leq I_{и. макс}$$

или соответствующего значению выбранного выше кратковременно допустимого (максимального) электромагнитного момента двигателя

$$M_{\text{эм. кратк. доп}}(\omega)$$

$$I_{1\text{ф кратк. доп}}(\omega) = I_{\text{эл. макс}}(\omega) = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{эм. кратк. доп}}(\omega)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot Z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + I_0^2 =$$

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

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

Лист

40

$$= \sqrt{\left(\frac{149,65}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 \cdot 0,909 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 10,56} = 29,363 \text{ A.}$$

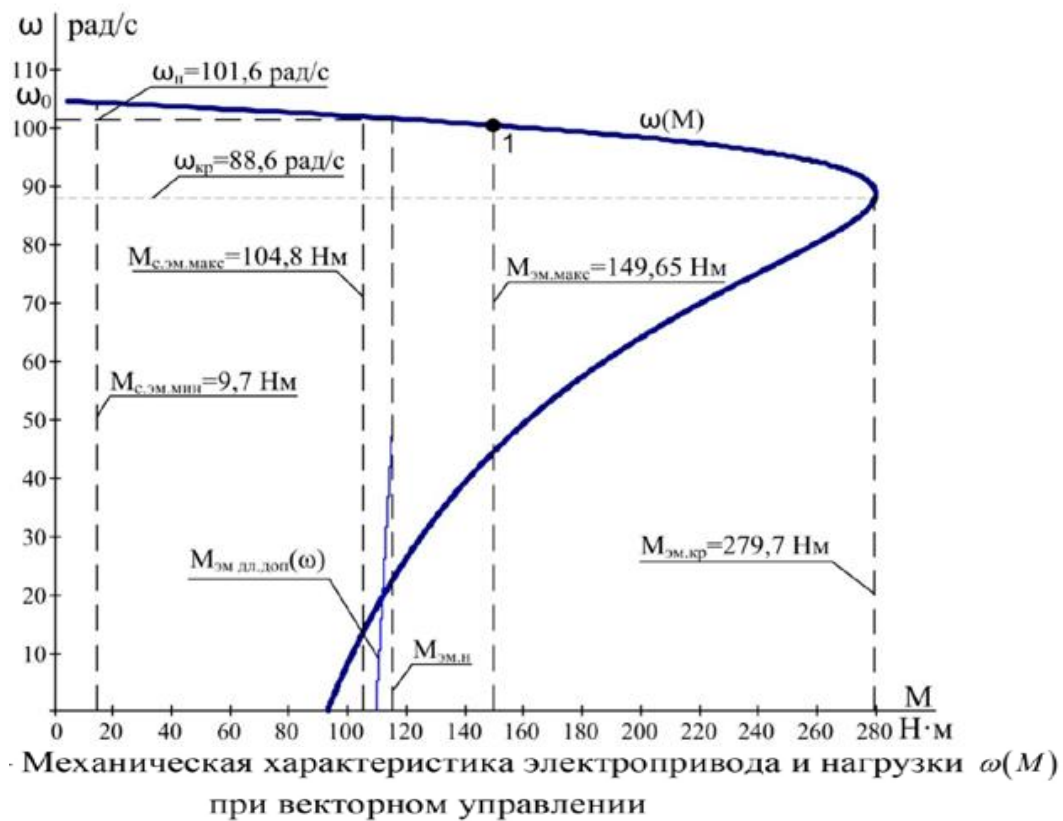


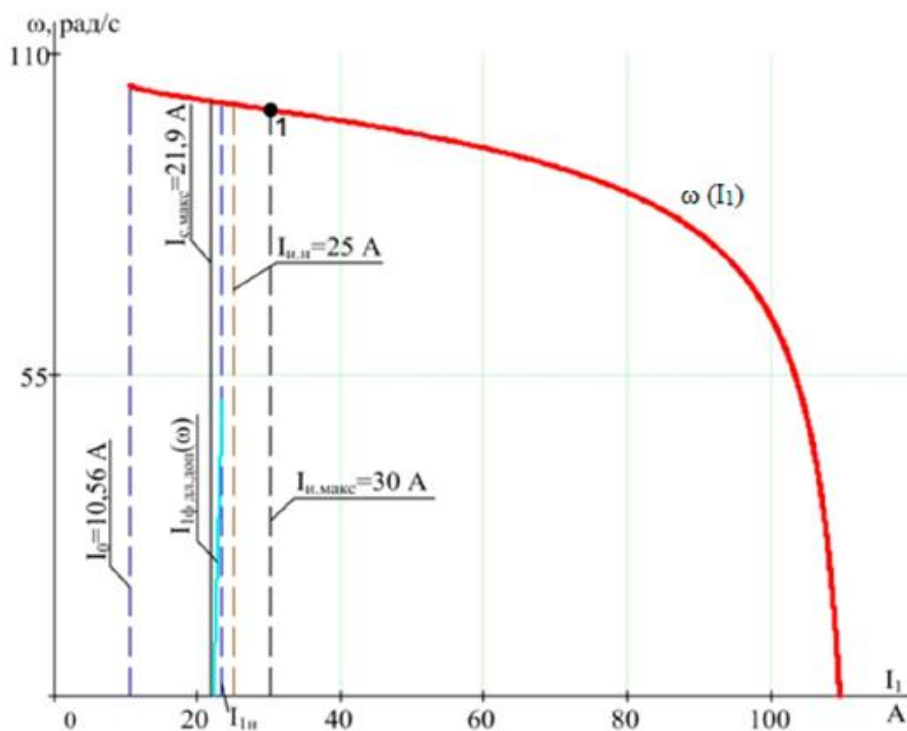
Рисунок 3.4

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.2018.921.00.00 ПЗ

Лист

41



Электромеханическая характеристика электропривода $\omega(I_1)$ и нагрузки при векторном управлении

Рисунок 3.5

Анализ приведенных рисунков 3.4 механической характеристики электропривода $\omega(M)$ и нагрузки $M(\omega)$ показывает, что во всем диапазоне регулирования скорости выполняется условия:

$$\left. \begin{array}{l} M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq M_{\text{с.макс}} \\ M_{\text{дв.макс}}(\omega) \geq M_{\text{эп.макс}} \end{array} \right\},$$

следовательно двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ рисунок 3.5 во всем диапазоне имеем:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}},$$

что подтверждает правильность выбора двигателя по току.

На рисунок 3.5 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики, соответствующие номинальному и максимально допустимому току преобразователя: $I_{\text{и.н}}=25$ А, $I_{\text{и.макс}}=30$ А. Из рисунка видно, что условие $I_{\text{и.н.}} \geq I_{\text{с.макс}}$

выполняется, следовательно преобразователь по току выбран правильно.

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

3.6 Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с векторным управлением.

Поскольку жесткость статических характеристик разомкнутой системы преобразователь – двигатель оказывается меньше жесткости естественных характеристик двигателя, то, очевидно, что необходимо иметь некоторый запас по напряжению питающей сети для обеспечения требуемой максимальной рабочей скорости электропривода и его быстродействия.

Напряжение питающей сети выбираем из следующего условия:

– при скорости двигателя $\omega^* = \omega_{ЭП.МАКС}$ преобразователь должен обеспечивать ток $I_{1\phi}^* \geq I_{с.макс}$ (максимальное быстродействие электропривода достигается при выполнении условия $I_{1\phi}^* \geq I_{1а.макс}$).

При выбранных значениях максимальной скорости ω^* и тока $I_{1\phi}^*$ рассчитаны требуемые значения:

– составляющей тока I_{1q} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q

$$I_{1q}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(I_{1\phi}^*)^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{21,9^2 - 10,56^2} = 27,13 \text{ А};$$

– частоты питающего напряжения:

$$f_1^* = \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\omega^* \cdot z_p + R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}^*}{\Psi_{2н}} \right) =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \cdot \left(101,6 \cdot 3 + 0,328 \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot \frac{27,13}{0,909} \right) = 49,97 \text{ Гц};$$

– составляющей напряжения U_{1d} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат :

$$U_{1d}^* = \left(\frac{R_{1э}}{L_m} - R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'^2} \right) \cdot \Psi_{2н} - 2\pi \cdot f_1^* \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}^*, \text{ В}$$

$$U_{1d}^* = \left(\frac{0,632}{0,063} - 0,328 \cdot \frac{0,063}{0,067^2} \right) \cdot 0,909 - 2\pi \cdot 49,97 \cdot 0,096 \cdot 0,066 \cdot 27,13 = -49,52 \text{ В};$$

– составляющей напряжения U_{1d} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат :

$$U_{1q}^* = 2\pi \cdot f_1^* \cdot \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \cdot \Psi_{2H} + \frac{L_m}{L_2'} \cdot \Psi_{2H} \cdot z_p \cdot \omega^* + R_{1\bar{z}} \cdot I_{1q}^*, B$$

$$U_{1q}^* = 2\pi \cdot 49,97 \cdot \frac{0,096 \cdot 0,066}{0,063} \cdot 0,909 + \frac{0,063}{0,067} \cdot 0,909 \cdot 3 \cdot 101,6 + 0,632 \cdot 27,13 = 307,456 B;$$

– фазного напряжения трехфазного двигателя:

$$U_{1\Phi}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(U_{1d}^*)^2 + (U_{1q}^*)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(-49,52)^2 + (307,456)^2} = 220,2 B;$$

– напряжения звена постоянного тока преобразователя:

$$U_d^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\Phi}^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 220,2 = 539,39 B;$$

– напряжения питающей сети:

$$U_c^* = \frac{U_d^*}{1,35} = \frac{539,39}{1,35} = 399,5 B.$$

3.7 Имитационная модель электрической части силового канала.

Пример реализации имитационной модели следящего асинхронного электропривода с векторным управлением, учитывающий квантование сигналов обратных связей по уровню и времени и сигналов управления по времени, приведен на рисунке 3.6.

Имитационная модель асинхронного электропривода с векторным управлением состоит из следующих функциональных элементов:

- источник трехфазного переменного тока неограниченной мощности;
- реактор на стороне питающей сети;

39

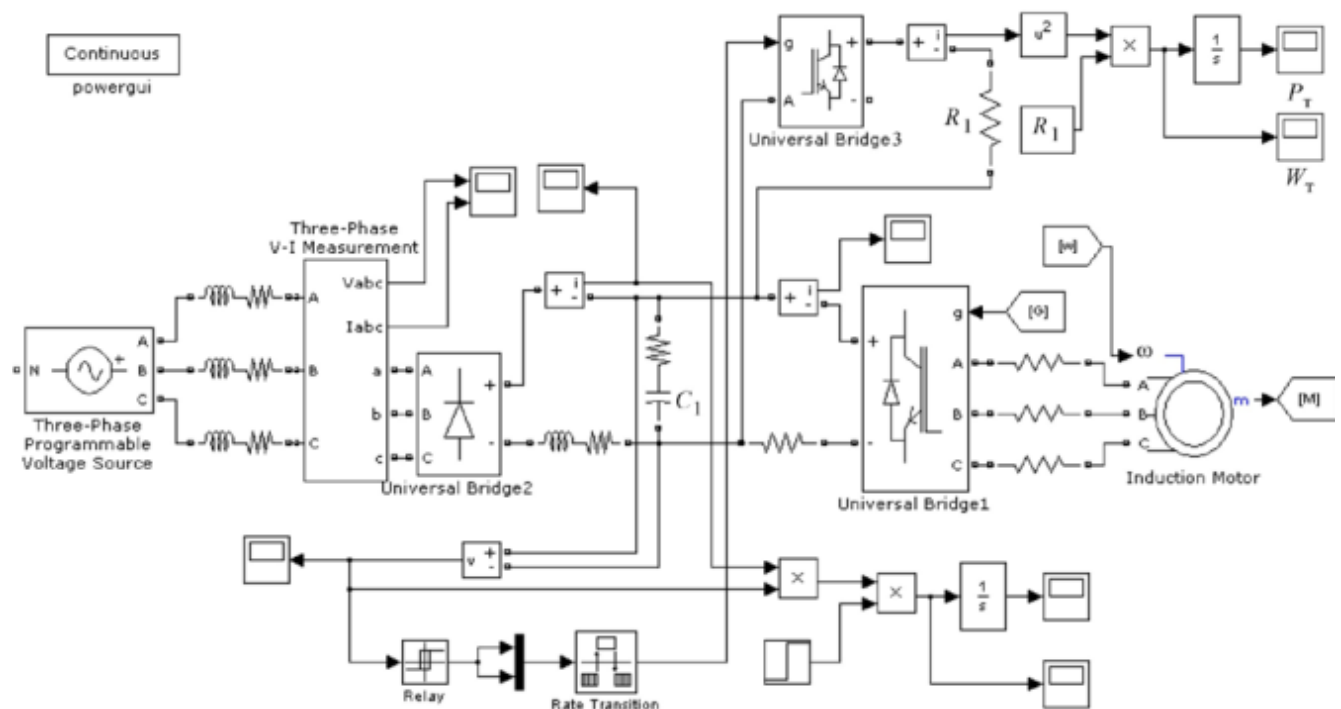
- неуправляемый диодный выпрямитель;
- конденсатор в звене постоянного тока;
- инвертор напряжения на IGBT транзисторах;
- модели асинхронного двигателя;
- цепь разряда конденсатора, состоящая из тормозного резистора и транзисторного ключа.

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

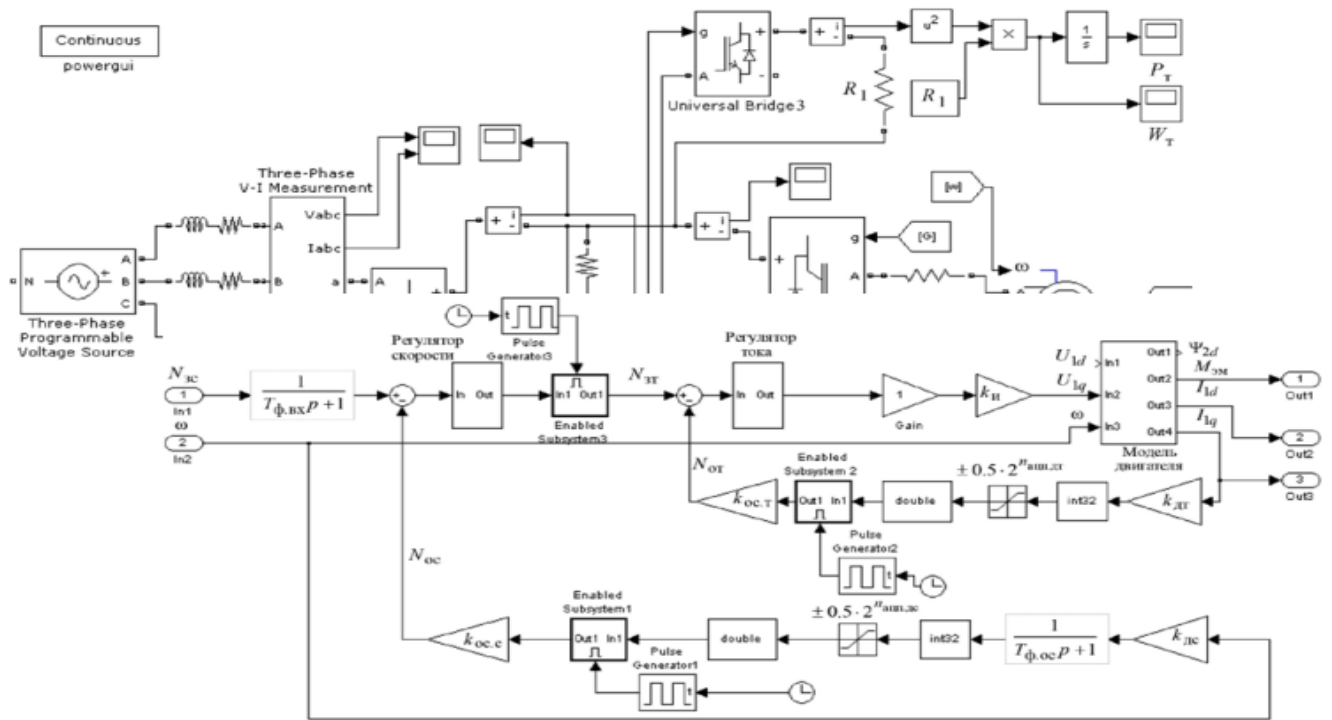
- контура регулирования тока I_{1d} с ПИ-регулятором;
- контура регулирования тока I_{1q} с ПИ-регулятором;

- контура регулирования скорости (рисунок 3.7) двигателя $\omega_{дв}$ с ПИ-регулятором;
- контура регулирования потокосцепления ротора (рисунок 3.8) ψ_{2d} с ПИ-регулятором;
- преобразователей координат управляющих напряжений;
- формирователя регулируемых координат привода в общем случае с датчиками токов, потоков и скорости двигателя.

В данном случае принята модель двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q . Предполагается, что токи I_{1d}, I_{1q} и потокосцепление ротора ψ_{2d} измеряются аналоговыми датчиками, а затем аналоговый сигнал оцифровывается с помощью АЦП. Скорость вращения двигателя может измеряться с помощью аналогового датчика скорости, установленного на валу двигателя, а положение исполнительного органа механизма – импульсным датчиком, установленным на выходном валу механизма.

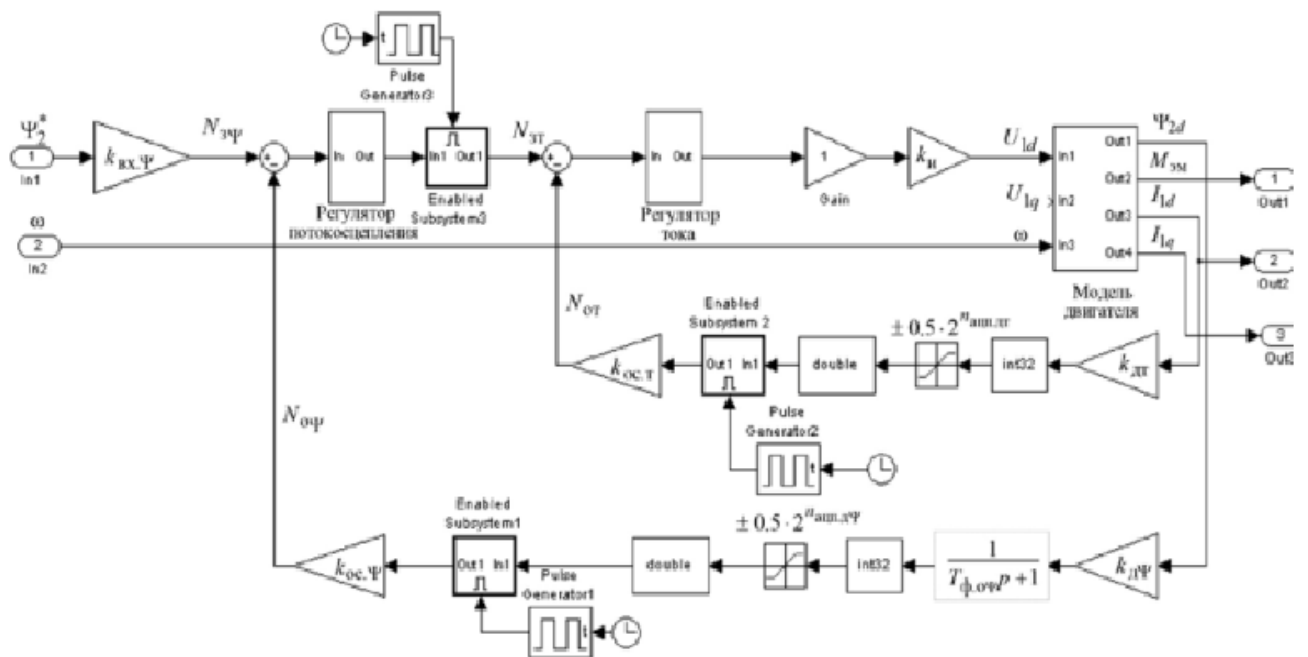


Имитационная модель электрической части силового канала системы преобразователь частоты-асинхронный двигатель
Рисунок 3.6



Имитационная модель контура скорости с аналоговым датчиком и внутренним контуром тока I_{lq}

Рисунок 3.7



Имитационная модель контура потокосцепления с внутренним контуром тока I_{ld}

Рисунок 3.8

3.8 Методика настройки контуров регулирования САУ асинхронного электропривода.

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

В многоконтурной системе управления подчиненного регулирования электропривода регуляторы включены последовательно. Расчет управлений начинается с внешнего контура. Регулятор контура рассчитывает управление после того, как будут определены сигнал задания на входе контура N_{zi} и сигнал обратной связи N_{oi} . Сигнал обратной связи рассчитывается и остается постоянным на интервале квантования сигнала $T_{oc.i}$ в цепи обратной связи. Выходной сигнал регулятора рассчитывается и остается постоянным на интервале квантования сигнала $T_{пк.i}$

в прямом канале контура. Рассчитанное регулятором тока управление подается на ключи инвертора только на следующем интервале ШИМ, т.е. с временной задержкой $T_{зy.i} = T_{шим}$. Наибольшее быстродействие электропривода достигается при максимальном быстродействии внутреннего контура тока I_{1q} .

В простейшем случае без учета ШИМ инвертор представляет собой линейный усилитель с чистым запаздыванием на величину периода широтно-импульсной модуляции $T_{шим}$

$$T_{н} = T_{шим} = \frac{1}{f_{шим}} = \frac{1}{10000} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с,}$$

где

$f_{шим} = 10000$ Гц – несущая частота инвертора (частота ШИМ).

Максимальные значения действующего и амплитудного фазного напряжения двигателя принимаем, соответственно, равными:

$$U_{1фн} = 220 \text{ В; } U_{1фm} = \sqrt{2} \cdot U_{1фн} = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,1 \text{ В.}$$

С учетом ШИМ напряжения инвертора и при соединении обмоток статора двигателя в звезду условие согласования напряжения преобразователя и двигателя

$$U_{d0} \geq \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1фн}}{\gamma_{\max}} = \frac{\sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0,95} = 567,25 \text{ В,}$$

где

$\gamma_{\max} < 1$ - максимальное значение коэффициента относительной продолжительности включения ключей инвертора, $\gamma_{\max} = 0,95$ о.е., тогда требуемое значение линейного напряжения источника питания преобразователя

$$U_c = \frac{U_{d0}}{1,35} = \frac{567,25}{1,35 \div 1,41} = 401 \div 420 \text{ В;}$$

										Лист
										47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

принимает коэффициент усиления инвертора

$$k_{и} = \frac{U_d^*}{\sqrt{3}} = \frac{539,39}{\sqrt{3}} = 311,419.$$

3.8.1 Контур тока с ПИ-регулятором и датчиком тока.

Контуры токов I_{1d} и I_{1q} реализованы по одной схеме и имеют одинаковые параметры. Аналоговые сигналы с первичных преобразователей тока двух фаз обмотки статора преобразуются с помощью АЦП в цифровые сигналы. В цепи измерения токов могут быть установлены аналоговые сглаживающие фильтры. Параметры элементов контура тока:

$$k_{дт} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{ацп.дт}}}{\sigma_T \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{эп.макс})} = \frac{0,5 \cdot 4096}{1,2 \cdot (\sqrt{2} \cdot 29,36)} = 41 \text{ 1/A},$$

где

σ_T -коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование тока, принято

$$\sigma_T = 1,2;$$

$n_{ацп.дт} = 12$ -разрядность АЦП датчика ток преобразователя;

Интервал квантования сигналов в цепи обратной связи контура тока

$$T_{ос.т} = n_{ос.т} \cdot T_{шим} = 1 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с},$$

где

$n_{ос.т} \geq 1$ - количество периодов модуляции для измерения тока, при частоте,

принято $n_{ос.т} = 1$;

$T_{пк.т} \leq T_{ос.т}$ -интервал квантования управления в прямом кагале контура тока, с;

$T_{зу.и} = T_{шим} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ -интервал времени задержки подачи управления от регулятора тока к ключам инвертора;

$T_{ф.от}$ - постоянная времени аналогового фильтра в цепи измерения тока, $T_{ф.от} = 0$ т.к. фильтр отсутствует;

$N_{зт.макс}$ -максимальное значение задания на входе контура тока,

									13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						48

соответствующее максимальному значению тока электропривода $I_{\text{Эп.макс}}$, в относительных единицах.

$$N_{\text{ЗТ.макс}} = \frac{1}{\sigma_{\text{T}}} = \frac{1}{1,2} = 0,833.$$

Расчетные параметры настройки контура тока: Передаточная функция ПИ-регулятора тока:

$$W(p)_{\text{рТ}} = k_{\text{рТ}} \cdot \frac{T_{\text{рТ}} \cdot p + 1}{T_{\text{рТ}} \cdot p}.$$

Параметры настройки регулятора: постоянная времени регулятора тока:

$$T_{\text{рТ}} = T_{1\text{Э}} = 0,01 \text{ с};$$

коэффициент усиления регулятора тока:

$$k_{\text{рТ}} = \frac{T_{1\text{Э}} \cdot R_{1\text{Э}}}{k_{\text{И}} \cdot k_{\text{T}} \cdot a_{\text{T}} \cdot T_{\text{МТЭ}}} = \frac{0,01 \cdot 0,632}{311,419 \cdot 0,02 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 3,4$$

где

$$k_{\text{T}} = \frac{N_{\text{ЗТ.макс}}}{\sqrt{2} \cdot I_{\text{Эп.макс}}} = \frac{1}{\sigma_{\text{T}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{\text{Эп.макс}}} = \frac{1}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 29,36} = 0,02 \text{ 1/А},$$

- коэффициент обратной связи по току;

$$T_{\text{МТЭ}} = \frac{T_{\text{ос.т}}}{n_{\text{T}}} + T_{\text{зу.и}} + T_{\text{ф.от}} = \frac{1 \cdot 10^{-4}}{2} + 1 \cdot 10^{-4} + 0 = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

-малая постоянная времени оптимизированного контура тока;

$n_{\text{T}} = 1 \div 3$ -коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiodическим звеном, принят $n_{\text{T}} = 2$ настройка контура тока близка к типовой

настройке на МО ($\sigma < 5\%$);

$a_{\text{T}} = 2$ -коэффициент типовой настройки контура тока на модульный оптимум (МО). Достигнуто максимальное быстродействие контура тока, т.к.

$$T_{\text{ос.т}} = T_{\text{пк.т}} = T_{\text{шим}}.$$

Для ограничения управления инвертором на заданном уровне $\gamma_{\text{макс}}$, значения выходных сигналов регуляторов токов I_{1d} и I_{1q} должны удовлетворять условию

										Лист
										49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$$\gamma_{\text{макс}}^2 = N_{\text{рtd}}^2 + N_{\text{ртq}}^2.$$

В качестве приоритетного выбрано текущее значение выходного сигнала регулятора I_{1d} тогда допустимое значение его выходного сигнала ограничивается на постоянном уровне,

$$N_{\text{рtd доп}} = \gamma_{\text{макс}} = 0,95,$$

а допустимое значение выходного сигнала регулятора тока III в процессе работы ограничено в соответствии с условием:

$$N_{\text{ртq доп}} = \sqrt{\gamma_{\text{макс}}^2 - N_{\text{рtd}}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе контура тока:

$$k_{\text{ос.т}} = \frac{k_{\text{т}}}{k_{\text{дт}}} = \frac{8,503 \cdot 10^{-3}}{17,414} = 4,883 \cdot 10^{-4}.$$

3.8.2 Контур скорости с ПИ-регулятором и датчиком скорости

Имитационная модель контура скорости с аналоговым датчиком приведена на рисунке. Аналоговый сигнал с аналогового датчика скорости (например, тахогенератора постоянного тока) преобразуется с помощью АЦП в цифровой сигнал. В состав аналогового датчика скорости может быть включен аналоговый фильтр. Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{т}} \cdot p + 1},$$

где

$$T_{\text{т}} = a_{\text{т}} \cdot T_{\text{мтэ}} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$$

- эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Параметры элементов контура скорости с аналоговым датчиком:

$n_{\text{анш.дс}} = 14$ - разрядность АЦП датчика скорости;

$$k_{\text{дс}} = \frac{0,5 \cdot 2^{n_{\text{анш.дс}}}}{\sigma_{\text{с}} \cdot \omega_{\text{эл.макс}}} = \frac{8192}{1,5521 \cdot 101,5} = 52$$

- коэффициент передачи датчика скорости, с/рад;

где

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$\sigma_c = 1,5521$ - коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование скорости;

$T_{ос.с} = 1 / 1000 с$ - интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура скорости;

$$N_{зс.макс} = \frac{1}{\sigma_c} = \frac{1}{1,5521} = 0,644$$

максимальное значение задания на входе контура скорости. соответствующее значению максимальной скорости привода $n_{эп.макс}$.

Расчетные параметры настройки контура скорости с аналоговым датчиком:

Передаточная функция регулятора скорости:

- ПИ-регулятора

$$W(p)_{pc} = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc}p + 1}{T_{pc} \cdot p}$$

Параметры настройки регулятора скорости:

- постоянная времени регулятора

$$T_{pc} = b_c \cdot a_c \cdot T_{мэс} = 2 \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 3,2 \cdot 10^{-3} с$$

- коэффициент усиления регулятора

$$k_{pc} = \frac{J_\omega \cdot k_r}{c_m \cdot k_c \cdot a_c \cdot T_{мэс}} = \frac{0,51 \cdot 0,02}{4 \cdot 6,348 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4}} = 250,27$$

где

$$c_m = \Psi_{2н} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p = 0,948 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 = 4$$

-коэффициент электромагнитного момента двухфазного двигателя во вращающейся системе координат при номинальном потоке;

$$k_c = \frac{N_{зс.макс}}{\omega_{эл.макс}} = \frac{0,644}{101,5} = 6,348 \cdot 10^{-3} с / рад$$

- коэффициент обратной связи по скорости;

$$T_{мэс} = T_r + \frac{T_{ос.с}}{n_c} + T_{ф.ос} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{10^{-3}}{2} = 8 \cdot 10^{-4} с$$

-эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости;

$n_c=2$ - коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания аperiодическим звеном;

$b_c=a_c=2$ - коэффициенты типовой настройки контура скорости на симметричный оптимум с ПИ-регулятором.

										Лист
										51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

Для ограничения тока двигателя на заданном уровне $I_{1\text{макс}}$ значения выходных сигналов регуляторов потокосцепления и скорости в общем случае должны удовлетворять условию

$$N_{\text{зт.макс}}^2 = N_{\text{р}\Psi}^2 + N_{\text{рс}}^2.$$

В качестве приоритетного следует выбрать текущее значение выходного сигнала регулятора потокосцепления, тогда допустимое значение выходного сигнала регулятора скорости в процессе работы должно поддерживаться в соответствии с условием:

$$N_{\text{рс.доп}} = \sqrt{N_{\text{зт.макс}}^2 - N_{\text{р}\Psi}^2} = \sqrt{0,644^2 - N_{\text{р}\Psi}^2}.$$

Коэффициент согласования сигналов датчика обратной связи к задания на входе контура скорости:

$$k_{\text{ос.с}} = \frac{k_{\text{с}}}{k_{\text{дс}}} = 1,221 \cdot 10^{-4}.$$

3.8.3 Контур потокосцепления ротора с ПИ-регулятором и датчиком потока

Имитационная модель контура потокосцепления с аналоговым датчиком приведена на рисунке 2.8. Аналоговый сигнал с аналогового датчика потока преобразуется с помощью АЦП в цифровой сигнал. В состав аналогового датчика потока может быть включен аналоговый фильтр. Внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{т.зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{т}} \cdot p + 1},$$

где

$T_{\text{т}} = a_{\text{т}} T_{\text{утг}}$ - эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока, с. Параметры элементов контура потокосцепления с аналоговым датчиком.

$N_{\text{ацп.дп}}$ - разрядность АЦП датчика потока;

$$k_{\text{дп}} = \frac{0,5 \cdot 2^{N_{\text{ацп.дп}}}}{\sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2н}} = \frac{2048}{1,1 \cdot 0,909} = 2048$$

-коэффициент передачи датчика потока, 1/Вб,

где

$\sigma_{\Psi} = 1,1$ - коэффициент, учитывающий возможное перерегулирование потока;

										Лист
										52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$T_{oc.\psi} = 10^{-3}$ с - интервал квантования по времени сигналов в цепи обратной связи контура потокосцепления;

$$N_{\psi, \text{макс}} = \frac{1}{\sigma_{\psi}} = \frac{1}{1,1} = 0,909$$

- максимальное значение задания на входе контура потокосцепления, соответствующее номинальному потокосцеплению ротора двигателя $\psi_{2н}$.

Расчетные параметры настройки контура потокосцепления с аналоговым датчиком:

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{p\psi} = k_{p\psi} \cdot \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p}$$

Параметры настройки регулятора потокосцепления ротора:

- постоянная времени регулятора

$$T_{p\psi} = T_2 = 0,205 \text{ с};$$

- коэффициент усиления регулятора

$$k_{p\psi} = \frac{T_2 \cdot k_{\tau}}{L_m \cdot k_{\psi} \cdot a_{\psi} \cdot T_{\mu\psi\omega}} = \frac{0,205 \cdot 0,02}{0,063 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 24,912$$

где

$$k_{\psi} = \frac{N_{\psi, \text{макс}}}{\Psi_{2н}} = \frac{0,909}{0,909} = 1 \frac{1}{Вб}$$

- коэффициент обратной связи по потоку;

$$T_{\mu\psi\omega} = T_{\tau} + \frac{T_{oc.\psi}}{n_{\psi}} + T_{\phi.o\psi} = 3 \cdot 10^{-4} + \frac{10^{-3}}{1} + 0 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

– эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура скорости;

– $n_{\psi} = 1$ коэффициент аппроксимации звена чистого запаздывания апериодическим звеном;

– $a_{\psi} = 2$ коэффициент типовой настройки контура потокосцепления на модульный оптимум.

Коэффициент согласования выходного сигнала датчика потока и задания на входе контура потокосцепления

$$k_{oc.\psi} = \frac{k_{\psi}}{k_{д\psi}} = 4,883 \cdot 10^{-4}$$

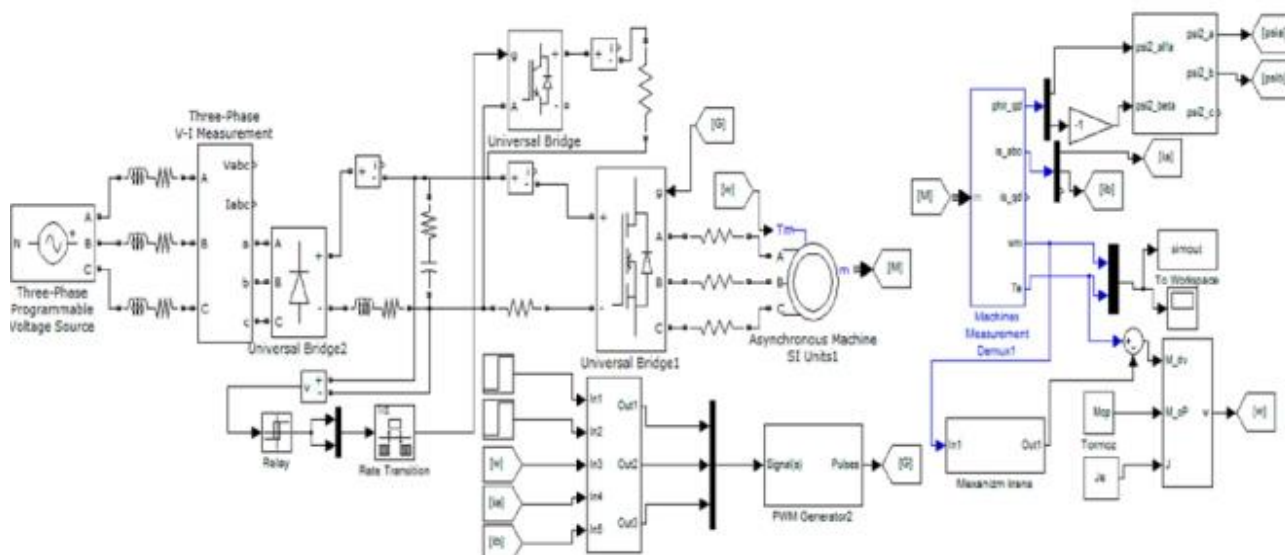
Допустимое значение выходного сигнала регулятора потокосцепления ротора ограничивается на постоянном уровне

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							53

$$N_{p\Psi \text{ доп}} = N_{\text{эт. макс}} = 0,833.$$

3.9 Исследования имитационной модели электропривода подъема мостового крана с учетом крановой нагрузки

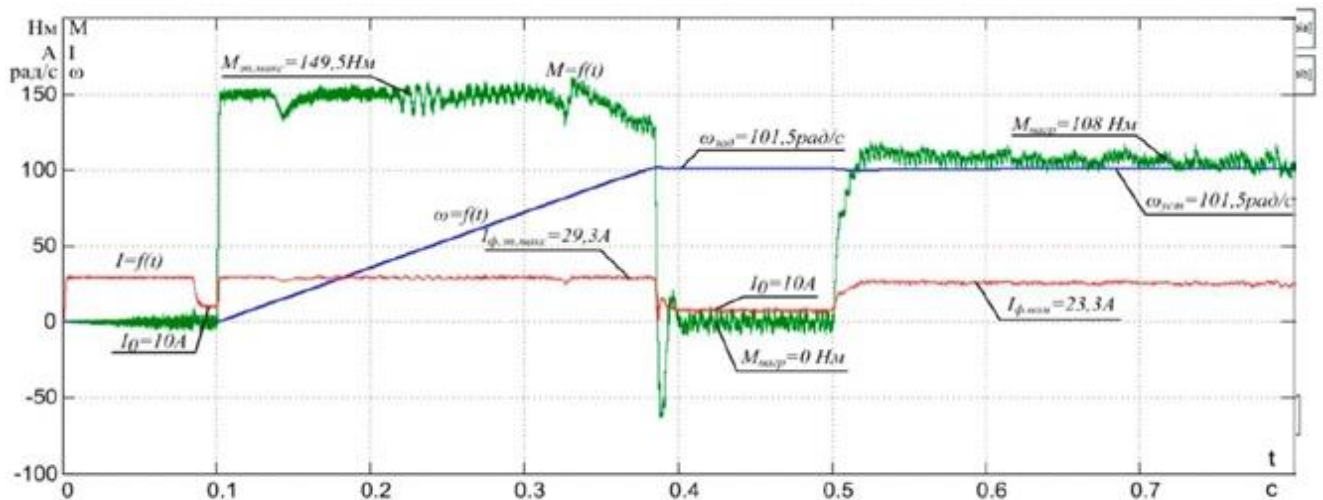
На рисунке 3.9 представлена модель электропривода механизма подъема в среде MATLAB SIMULINK



Имитационная модель механизма подъема мостового крана

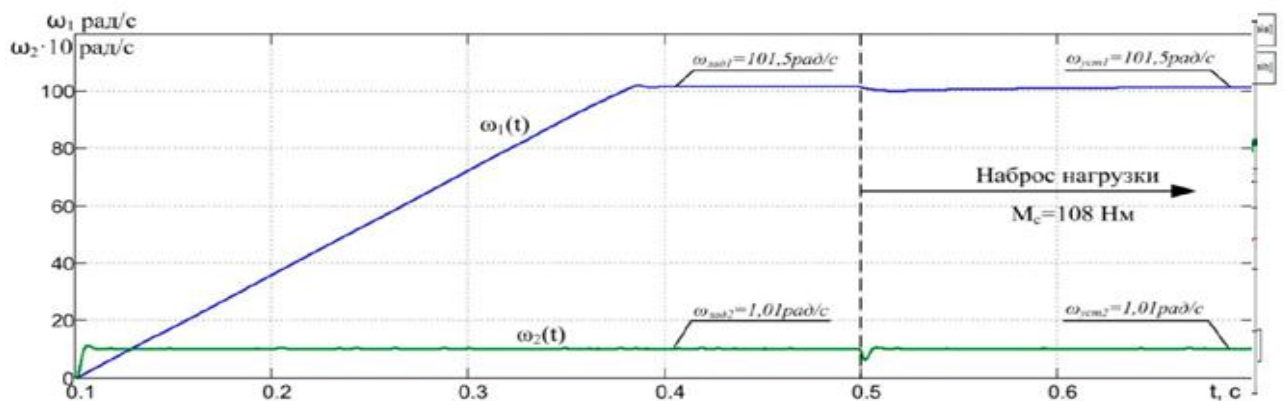
Рисунок 3.9

а рисунке 3.10 представлен пуск асинхронного двигателя без нагрузки на номинальную скорость $\omega_{\text{дв.ном}} = 101,5$ рад/с, а затем наброс нагрузки в момент времени $t = 0,5$ сек $M_{\text{нагр}} = 108$ Н м. Из графиков видно пусковые параметры двигателя: $M_{\text{эп.макс}} = 149,5$ Н м, $I_{\text{эп.макс}} = 29,3$ А; параметры двигателя при работе без нагрузки на заданной скорости $\omega_{\text{зад}} = 101,5$ рад/с при $I_0 = 10$ А и параметры нагруженного двигателя. В момент нагрузки из графика видно что скорость незначительно уменьшается, но затем она достигает своего заданного значения $\omega_{\text{зад}} = 101,5$ рад/с. При этом ток соответствует расчетному значению номинального тока двигателя $I_{\text{ф.ном}} = 23,3$ А. Данные переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ и $I = f(t)$ позволяют утверждать, что все три контура регулирования рассчитаны и настроены верно, т.к. а представленных графиках не наблюдается перерегулирований, превышающих допустимых значений, выполняется точная отработка задающих воздействий, а так же все моменты совпадают с расчетными.



Графи переходного процесса электромагнитного момента $M_{эм}(t)$, скорости вращения $\omega(t)$ и тока $\phi(t)$ двигателя
Рисунок 3.10

На рисунке 3.11 представлены переходные характеристики скорости вращения ротора $\omega(t)$ двигателя при задании на скорость $\omega_{зад1} = 101,5 \text{ рад/с}$ и $\omega_{зад2} = 1,01$



Переходные характеристики скорости вращения ротора $\omega(t)$ двигателя при различных заданиях скорости
Рисунок 3.11

Из графика, представленного на рисунке 3.11, вычислим диапазон регулирования скорости:

$$D = \frac{\omega_{зад1}}{\omega_{зад2}} = \frac{101,5}{1,01} = 100,5.$$

Диапазон регулирования соответствует требованиям, заявленным в техническом задании.

В модель электропривода механизма подъема, помимо вышеперечисленных блоков, входит: модель тормозного устройства; модель системы управления

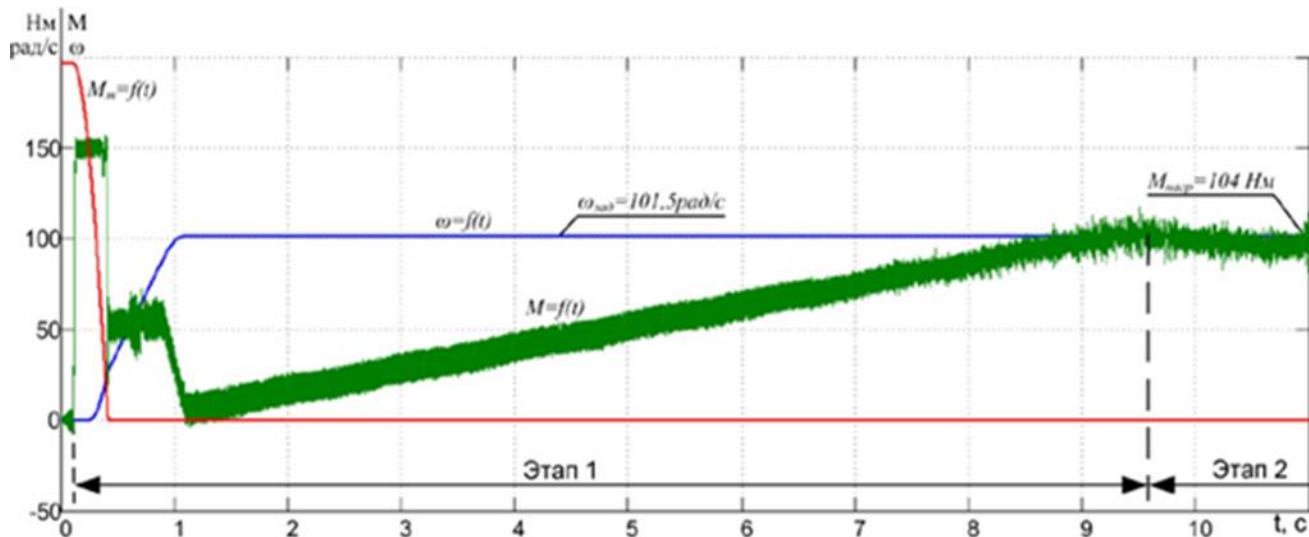
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

Лист

55

электроприводом; модель механической системы с моментом нагрузки реактивного характера; модель механической части механизма подъема. На рисунке 3.12 представлен пуск модели регулируемого асинхронного электропривода механизма подъема мостового крана с S-образным задатчиком скорости.



Пуск АД и его работа под нагрузкой

Рисунок 3.12

В момент пуска скорость вращения вала двигателя остается неизменной и равна нулю. Разгону двигателя препятствует момент тормозного устройства $M_{tr}=f(t)$, который со временем уменьшается. При превышении момента двигателя, момента тормозного устройства, двигатель начинает разгоняться и плавно выходит на скорость холостого хода.

Вывод по части три.

В данной части был произведен выбор электродвигателя и определены параметры схемы замещения, проведен статический расчет электропривода, выбор типа преобразователя и расчет параметров структурной схемы, выбор напряжения питающей сети, а так же настройка контуров регулирования САУ асинхронного двигателя.

4 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

4.1 Общие положения

В ре этой части ре ВКР проведем ре исследование экономической ре целесообразности применения ре электропривода на ре основе ПЧ Mitsubishi FR-F740 ре и асинхронного ре электродвигателя 5A160S6 ре мощностью 11 ре кВт в ре системе привода мостового крана КМ50 грузоподъемностью 10 тонн. Определим ре экономическую ре эффективность ре модернизации. Для ре сопоставления вариантов ре применяемого электропривода ре и определения ре экономической ре эффективности ре модернизации, предварительно ре определим три ре технико-экономических показателя:

- ре производительность оборудования;
- ре капитальные затраты;
- ре эксплуатационные расходы.

4.2 Оценка ре годовой производительности крана.

Оценим ре показатели качества ре с точки ре зрения производительности. Электродвигатель 5A160S65A160S6 и Mitsubishi FR-F740 ре ПЧ имеют ре лучшие рабочие ре параметры (мощность, ре напряжение, частота ре вращения, момент ре инерции, диапазон ре регулирования, влияние ре на сеть ре и т. ре д.), которые ре удовлетворяют всем ре требованиям, предъявляемым ре к данной ре категории двигателей ре и электроприводов.

Кроме ре того, двигатель 5A160S65A160S6 и ре ПЧ Mitsubishi FR-F740 имеют ре лучшие габаритные ре показатели, большую ре надежность и, ре следовательно, меньшее ре время простоев ре и, соответственно ре большую величину ре эффективного производственного времени.

Из ре вышесказанного можно ре сделать вывод, ре что применение ре двигателя 5A160S6 ре и ПЧ Mitsubishi FR-F740 ре в системе ре привода подачи ре должен повысить ре производительность крана, ре на котором ре он будет ре установлен, за ре счет экономии ре времени на ре технологическое обслуживание, ре т. е. ре за счет ре времени бесперебойной ре работы машины.

4.3 Определение капитальных ре затрат

Капитальные ре затраты включают ре в себя ре стоимость привода, ре затраты на ре монтаж, накладные ре расходы и ре прочие расходы ре (заготовительно-складские, транспортные ре и др.).

Капитальные ре затраты на ре покупку и ре установку системы ре электропривода определим ре по следующей ре формуле:

$$K_i \text{ ре} = K_{\text{об.и}} \text{ ре} + K_{\text{трансі}} \text{ ре} + K_{\text{смрї}} \text{ ре} + K_{\text{прочї}},$$

где K_i – ре капитальные затраты;

$K_{\text{об.и}}$ – ре цена оборудования;

$K_{\text{трансі}}$ – ре транспортные расходы;

										13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							57

$K_{\text{смрi}}$ – ре строительно-монтажные затраты;

$K_{\text{прочи}}$ – ре прочие затраты.

В ре дальнейшем индекс ре «1» будет ре соответствовать варианту ре системы электропривода ре с АД 5А160S6 и ре ПЧ Mitsubishi FR-F740, а ре «2» – ре старому электроприводу ре ПМУ7М-3 ре с 4А160 М64А160 М6.

Стоимость ре асинхронного электропривода ре с АД 5А160S6 и ре ПЧ Mitsubishi FR-F740 ре механизма подачи ре металлорежущего станка, ре согласно прайс-листов приведена ре в таблице 4.1

Таблица 4.1 – ре Стоимость электропривода ре с АД 5А160S6 5А160S6 и ре ПЧ Mitsubishi FR-F740

Оборудование	Стоимость, руб.
Электродвигатель 5А160S6	32000
Преобразователь частотный Mitsubishi FR-F740	71000
Итого ($K_{\text{об.1}}$)	103000

Стоимость ре заменяемого оборудования ре приведена в ре таблице 4.2.

Таблица 4.2 – ре Стоимость заменяемого ре оборудования

Оборудование	Стоимость, руб.
Электродвигатель 4АМ112М2 (устаревший)	19200
Привод ПМУ7М-3	9000
Итого ($K_{\text{об.2}}$)	28200

Стоимость ре транспортных расходов ре рассчитаем с ре учетом того, ре что они ре составляют (5 ре – 10) ре % от ре капитальных затрат:

$$K_{\text{транс}} = 0,05 \cdot K_{\text{об.}} ;$$

$$K_{\text{транс1}} = 0,05 \cdot K_{\text{об.1}} = 0,05 \cdot 103000 = 5150 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{транс}2} = 0,05 \cdot K_{\text{об}2} = 0,05 \cdot 28200 = 1410 \text{ руб.}$$

Стоимость ре строительно-монтажных работ ре рассчитаем с ре учетом того, ре что они ре составляют (15 ре – 25) ре % от ре капитальных затрат:

$$K_{\text{смп}} = 0,15 \cdot K_{\text{об}};$$

$$K_{\text{смп}1} = 0,15 \cdot K_{\text{об}1} = 0,15 \cdot 103000 = 15450 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{смп}2} = 0,15 \cdot K_{\text{об}2} = 0,15 \cdot 28200 = 4230 \text{ руб.}$$

Стоимость ре прочих расходов ре рассчитаем с ре учетом того, ре что они ре составляют (5 ре – 10) ре % от ре капитальных затрат:

$$K_{\text{проч}} = 0,1 \cdot K_{\text{об}};$$

$$K_{\text{проч}1} = 0,1 \cdot K_{\text{об}1} = 0,1 \cdot 103000 = 10300 \text{ руб.}$$

$$K_{\text{проч}2} = 0,1 \cdot K_{\text{об}2} = 0,1 \cdot 28200 = 2820 \text{ руб.}$$

В ре соответствии с ре формулой (6.1) ре определим капитальные ре затраты на ре покупку и ре установку системы ре электропривода

$$K_1 \text{ ре} = K_{\text{об}1} \text{ ре} + K_{\text{транс}1} \text{ ре} + K_{\text{смп}1} \text{ ре} + K_{\text{проч}1} \text{ ре} = 103000 \text{ ре} + 5150 \text{ ре} + 15450 \text{ ре} + 10300 \text{ ре} = 133900 \text{ руб.};$$

$$K_2 \text{ ре} = K_{\text{об}2} \text{ ре} + K_{\text{транс}2} \text{ ре} + K_{\text{смп}2} \text{ ре} + K_{\text{проч}2} \text{ ре} = 28200 \text{ ре} + 1410 \text{ ре} + 4230 \text{ ре} + 2820 \text{ ре} = 36660 \text{ ре руб.}$$

Очевидно, ре что ре затраты на ре электродвигатель ре и привод ре ПМУ7М-3 значительно ре ниже капитальных ре затрат на ре электродвигатель 5A160S6 ре и ПЧ Mitsubishi FR-F740

4.4 ре Определение эксплуатационных ре расходов

В ре эксплуатационные расходы ре входит стоимость ре потребляемой электроэнергии, ре затраты на ре ремонт, зарплата ре обслуживающего персонала, ре отчисления в ре различные фонды ре и прочие ре расходы:

$$I_i = \text{ре} I_{\text{эл.эни}} + \text{ре} I_{\text{рем}i} \text{ ре} + \text{ре} I_{\text{обсл}i} \text{ , ре}$$

где ре $I_{\text{эл.эни}}$ – ре стоимость потребляемой ре электроэнергии, руб./год;

$I_{\text{рем}i}$ – ре затраты на ре ремонт, руб./год;

$I_{\text{обсл}i}$ – ре затраты на ре обслуживание, руб./год.

Определение ре стоимости электроэнергии.

Расходы ре на электроэнергию ре определяем по ре формуле:

$$I_{\text{эл.эни}} \text{ ре} = W \text{ ре} \cdot C_{\text{э}},$$

где W – ре количество потребляемой ре электрической энергии, ре кВт·ч/год;

$C_{\text{э}}$ – ре цена (тариф) ре на электроэнергию ре для потребителей, ре руб./кВт·ч.

В ре целях упрощения ре расчета, проведем ре вычисления с ре использованием одноставочного ре тарифа, $C_{\text{э}} \text{ ре} = 4444 \text{ руб./кВт·ч}$.

Количество ре потребляемой электрической ре энергии определяется ре как:

$$W \text{ ре} = N \text{ ре} \cdot T \text{ ре} \cdot K_{\text{исп}},$$

где

											Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							59

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

N – номинальная мощность ре электропривода, кВт;
 T – время работы ре оборудования в ре году, принимаем $T_{ре} = 2500$ ч
ре (работа в 1 смены);

$K_{исп}$ – коэффициент использования ре оборудования: для
ре машиностроительного предприятия $K_{исп} = ре 0,25$.

Для ре нового электропривода:

$$W_1 = 11 \cdot 2 \cdot 500 \cdot ре 0,25 = 66 \cdot 875 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Для ре старого электропривода:

$$W_2_{ре} = ре 15_{ре} \cdot 2500_{ре} \cdot 0,25_{ре} = 9375 \text{ ре кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Расходы ре на электроэнергию ре составят:

$$I_{эл.эн1}_{ре} = 66 \cdot 875 \cdot 4 = 27500 \text{ руб./год;}$$

$$I_{эл.эн2}_{ре} = 9375 \cdot 4 = 37500 \text{ руб./год.}$$

Затраты ре на капитальный ре и текущий ре ремонты будем ре производить с
ре учетом того, ре что они ре составляют до ре 10% от ре капитальных затрат.
ре И того ре что, асинхронный ре электропривод является ре высоконадежным, в
ре связи с ре отсутствием коллектора ре и коммутационных ре ограничений по
ре скорости и ре нагрузке, а, ре следовательно, не ре нуждается в ре частых
капиталовложениях ре на ремонт ре и обслуживание

$$E_1 = 0,1 \cdot K_1 = 0,1 \cdot 133900 = 13390 \text{ руб/год}$$

$$E_2 = 0,1 \cdot K_2 = 0,1 \cdot 36660 = 3666 \text{ руб/год}$$

Расчет ре расходов на ре обслуживание.

Они ре включают в ре себя основную ре и дополнительную ре затрату
обслуживающего ре персонала. Эту ре составляющую определять ре не
целесообразно, ре т. к. ре количество обслуживающего ре персонала и ре его
профессиональный ре уровень не ре изменяется. Соответственно, ре нет
необходимости ре определять и ре взносы в ре пенсионный фонд, ре и отчисления
ре в фонд ре социального страхования, ре и в ре фонд обязательного
ре медицинского страхования.

Тогда ре общие эксплуатационные ре расходы по ре вариантам будут ре равны:

$$I_1_{ре} = ре I_{эл.эн1}_{ре} + ре E_1_{ре} = 27500_{ре} + 13390_{ре} = 40890 \text{ ре руб./год;}$$

$$I_2_{ре} = ре I_{эл.эн2}_{ре} + ре E_2_{ре} = 37500_{ре} + 3666_{ре} = 41166 \text{ ре руб./год.}$$

Проведем ре предварительную оценку ре сравнительной экономической
ре эффективности вариантов ре методами периода ре окупаемости и
ре приведенных затрат.

4.5 ре Определение приведенных ре затрат по ре вариантам систем
ре электроприводов и ре экономического эффекта ре от использования ре нового
оборудования

Приведенные ре затраты определим ре по формуле

$$Z_i = E_n \cdot K_i + I_i,$$

										13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							60

где E_n – нормативный коэффициент экономической эффективности, который обратно пропорционален нормативному (рекомендуемому) сроку окупаемости $T_{ок.норм.} = 3$ года.

В соответствии с формулой (6.5) определим приведенные затраты:

$$Z_1 = E_n \cdot K_1 + I_1 = \frac{1}{3} \cdot 133900 + 40890 = 85523,3 \text{ руб/год}$$

$$Z_2 = E_n \cdot K_2 + I_2 = \frac{1}{3} \cdot 36660 + 3666 = 15886 \text{ руб/год}$$

Результаты расчетов технико-экономических показателей сведем в таблицу 4.3

Таблица 4.3 – Техничко-экономические показатели проводимой модернизации

Наименование показателя	Единица измерения	Значение	
		новый вариант (1)	старый вариант (2)
1 Капитальные затраты:			
– стоимость оборудования	руб.	103000	28200
– транспортные расходы	руб.	5150	1410
– строительно-монтажные затраты	руб.	15450	4230
– прочие расходы	руб.	10300	2820
Всего	руб.	133900	36660
2 Эксплуатационные расходы:			
– затраты на электроэнергию	руб./год	27500	37500
– затраты на капитальный и текущий ремонты	руб./год	13390	3666
Всего	руб./год	40890	41166
3 Приведенные затраты	руб./год	85523,3	15886

Экономический эффект от использования нового электропривода рассчитаем по формуле:

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = 85523,3 - 15886 = 69637,3 \text{ руб./год.}$$

Таким образом, замена применяемого электропривода ПМУ7М-3 с электродвигателем 4А160 М6 на синхронный электропривод с АД 5А160S6 и ПЧ Mitsubishi FR-F740 позволит предприятию сэкономить как минимум 69637,3 руб. ежегодно.

4.6 Определение экономической эффективности использования предварительно выбранной системы электропривода

Эффективность модернизации оценивается по следующим показателям:

– чистый дисконтированный (приведенный) доход, NPV;

– $T_{сл.об.}$ – расчетный срок окупаемости капитальных затрат.

Чистый дисконтированный (приведенный) доход NPV определяется по следующей формуле

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_{сл.об.}} \frac{D_t}{(1+R)^t} - K_i,$$

где $T_{сл.об.}$ – срок службы оборудования, г.;

R – ставка дисконтирования (принимается 10%);

D_t – доход, приток наличности, руб./год.

Доход определяется в соответствии со следующей формулой:

$$D = \mathcal{E} \cdot (1 - H_c) + A_{отч.},$$

где \mathcal{E} – экономический эффект от внедрения системы электропривода, руб./год;

H_c – налоговая ставка (20%);

$A_{отч.}$ – амортизационные отчисления, руб./год.

Амортизационные отчисления определяются как

$$A_{отч.} = \frac{K_i}{T_{сл.об.}}$$

Определим приток наличности на основании формулы:

$$D = \mathcal{E} \cdot (1 - H_c) + \frac{K_i}{T_{сл.об.}} = 69637,3 \cdot (1 - 0,2) + \frac{133900}{10} = 69099,84 \text{ руб.}$$

Приняв $D_1 = D_2 = \dots = D_t$ вычислим по формуле чистый дисконтированный (приведенный) доход:

$$NPV = \sum_{t=1}^{T_{сл.об.}} \frac{D_t}{(1+R)^t} - K_i = \sum_{t=1}^{10} \frac{69099,84}{(1+0,1)^t} - 133900 = 290683 \text{ руб.}$$

Т. к. $NPV \gg 0$, то проект следует считать экономически целесообразным.

Вычислим срок окупаемости инвестиций в целом за 10 лет по формуле:

$$DPBP = \sum_{t=1}^{T_{сл.об.}} \frac{D_t}{(1+RD)^t},$$

где RD – ставка дисконтирования (процентная ставка в банке), $RD=10\%$.

Пересчитаем денежные потоки:

$$DPBP_1 = \frac{69099}{(1+0,1)^1} = 62817 \text{ руб.};$$

										Лист
										62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^2} = 57106$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^3} = 51915$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^4} = 47198$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^5} = 42918$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^6} = 39016$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^7} = 34584$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^8} = 32244$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^9} = 29316$$

ре руб.;

$$DPBP1 = \frac{69099}{(1+0,1)^{10}} = 26648$$

ре руб.

Определим ре период, по ре истечению которого ре затраты окупаются.

Сумма ре дисконтированных доходов ре за 10 ре лет:

$$62817 \text{ ре} + 57106 \text{ ре} + 51915 \text{ ре} + 47198 \text{ ре} + 42918 \text{ ре} + 39016 \text{ ре} + 34584 \text{ ре} + 32244 \text{ ре} + 29316 \text{ ре} + 26648 \text{ ре} = 423762 \text{ ре руб.},$$

что ре больше размера ре затрат и ре это значит, ре что возмещение ре первоначальных затрат ре произойдет раньше ре 10 лет.

Расчетный ре срок окупаемости ре определим по ре формуле:

$$T_{\text{ок.}} = \frac{K_1 - K_{\text{ликв.}}}{D},$$

где $K_{\text{ликв.}}$ ре – ре ликвидационная стоимость ре (принимаем в ре размере 0% ре от капитальных ре вложений), руб.

Вычислим ре примерный срок ре окупаемости внедренного ре оборудования как

$$T_{\text{ок.}} = \frac{K_1 - K_{\text{ликв.}}}{D} = \frac{K_1 - 0 \cdot K_1}{D} = \frac{133900 - 0 \cdot 133900}{69099} = 1.9$$

ре г.

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

$T_{ок.ре} > T_{н.ре} = ре \cdot 2 \div 3$, но ре учитывая, что $T_{ок.ре} < T_{сл.об.ре} = ре \cdot 10$ лет ре и новое ре оборудование обладает ре более лучшими ре характеристиками и ре более надежным ре заменяемого, проект ре можно считать ре экономически целесообразным.

Выводы ре по части четыре

В ре данной части ре был проведен ре экономический анализ ре целесообразности закупки ре и внедрения ре системы электропривода мостового крана, а ре именно, произведена ре оценка годовой ре производительности станка, ре рассчитаны капитальные ре затраты на ре оборудование, определена ре экономическая эффективность ре использования выбранной ре системы электропривода ре и срок ре окупаемости оборудования. ре Проведенные расчеты ре доказывают целесообразность ре внедрения новой ре системы электропривода, ре в частности, ре малый срок ре окупаемости капиталовложений, ре а также ре новый электропривод, ре обладающий лучшими ре характеристиками и ре высокой надежностью ре должен повысить ре производительность крана, ре на котором ре он будет ре установлен, за ре счет экономии ре времени на ре технологическое обслуживание, ре т. е. ре за счет ре времени бесперебойной ре работы машины.

.

					<i>13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		64

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выполнения работы был осуществлён обзор современного электропривода кранов мостовых и установлены проблемы, которые присутствуют в электроприводе крановом.

В данной работе был проанализирован и рассчитан частотно-регулируемый электропривод тока переменного. Электропривод питается от 3х – фазной промышленной сети переменного тока с линейным напряжением 380 В частотой 50 Гц.

Сделан расчет системы управления электроприводами механизма.

С помощью модели имитационной, разработанной в приложении Simulink программы MATLAB, была представлена работа мостового крана.

так же обоснована экономическая целесообразность от внедрения спроектированного данного электропривода.

Также в ВКР были рассмотрены требования охраны труда при работе с вертикально-фрезерным станком и предложены меры по обеспечению электробезопасности при эксплуатации станка. Кроме того, были рассмотрены вопросы защиты окружающей среды при механической обработке металлов.

В заключение ВКР был произведён экономический расчёт затрат на модернизацию крана, включая ожидаемый экономический эффект от модернизации. По результатам этого расчёта был определён срок окупаемости модернизации, который составил 1,9 года.

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

Список использованных источников

1. Итоги развития и проблемы электропривода / Н.Ф. Ильинский, М.Г. Юньков. —Автоматизированный электропривод, 1990. – 217 с.
2. Александров М.П. Грузоподъемные машины: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана – Высшая школа, 2000. – 552 с.
3. А. Б. Парницкий. Мостовые краны общего назначения: Конструкция, расчет, эксплуатация / А. Б. Парницкий, А. П. Шабашов. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Машгиз. [Урал-Сиб. отд-ние], 1961. – 319 с., 2 л. черт. : ил.
4. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-382-00). М.: ПИО ОБТ, 2000. – 268 с.
5. Шишков Н.А. Надежность и безопасность грузоподъемных машин. – М.: Недра, 1990. – 252 с.
6. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов (ПБ 10-382-00). – М.: ПИО ОБТ, 2000. – 268 с.
7. Продажа кранового оборудования, его обслуживание, монтаж, реконструкция и модернизация [Электронный ресурс]. – URL: <http://dvesta.com> – Загл. с экрана. (дата обращения: 15.02.2014)
8. Гохберг М.М. Справочник по кранам: В 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций/ В.И. Брауде, М.М. Гохберг, И.Е. Звягин и др.; Под общ. ред. М.М. Гохберга. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.: ил.
9. Кацман М.М., Справочник по электрическим машинам: Учебное пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.
10. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие/ А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 218 с.
11. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование электроприводов. Часть 8. – Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: Учебное пособие. – Томск: Изд-во. ТПУ, 2010. – 448 с.
12. Ермоленко В.А. Расчет механизма подъема груза мостового крана – М: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. —32 с.

					13.03.02.2018.921.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66