

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический университет»

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОПЕРЕЧНО-
СТРОГАЛЬНОГО СТАНКА**

Выпускная квалификационная работа бакалавра
направления подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям)

Идентификационный код ВКР: 879

Екатеринбург 2017

0

БР.44.03.04.879.2017

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Российский государственный профессионально-педагогический университет»
Институт инженерно-педагогического образования
Кафедра электрооборудования и энергоснабжения

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ:
Заведующая кафедрой ЭС
_____ А.О. Прокубовская
« _____ » _____ 2017 г.

МОДЕРНИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОПЕРЕЧНО- СТРОГАЛЬНОГО СТАНКА

Выпускная квалификационная работа бакалавра
направление подготовки 44.03.04 Профессиональное обучение (по отраслям)
профиль подготовки «Энергетика»
профилизация «Энергохозяйство предприятий, организаций, учреждений и
энергосберегающие технологии»

Идентификационный код ВКР: 879

Исполнитель:

студент группы ЗЭС-403С _____ Д.В. Зеленин

Руководитель:

гл. инженер проекта ООО «ПФ
«Тяжпромэлектропривод» _____ В.П. Чудновский

Нормоконтролер:

ст. преподаватель кафедры ЭС _____ Т.В. Лискова

Екатеринбург 2017

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 84 страницах, содержит 10 рисунков, 14 таблиц, 20 источников литературы, а также 6 приложений на 6 страницах.

Ключевые слова: ПОПЕРЕЧНО-СТРОГАТЕЛЬНЫЙ СТАНОК, ЭЛЕКТРОПРИВОД, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ, ДВИГАТЕЛЬ, ДВУХЗОННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ, ТИРИСТОРНЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.

Объектом исследования является главный электропривод поперечно-строгального станка.

Предметом исследования является модернизация главного электропривода поперечно-строгального станка.

Целью является спроектировать регулируемый электропривод. Необходимо при выполнении ВКР решить следующие задачи: произвести выбор электродвигателя главного привода поперечно-строгального станка, произвести проверку выбранного электродвигателя по нагреву, разработать вентильный преобразователь и систему управления электроприводом.

В выпускной квалификационной работе представлен расчёт экономической эффективности проекта, определены основные технико-экономические показатели. Уделено внимание безопасности жизнедеятельности и экологии проекта.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	7
1.1 Оборудование станка	7
1.2 Технологические характеристики станка 7307ГТ	11
1.3 Принцип работы поперечно-строгального станка	12
1.4 Требование к электроприводу. Выбор типа электропривода	14
1.5 Расчёт и выбор двигателя главного электропривода	15
1.6 Построение нагрузочной диаграммы электропривода для тяжёлого (энергоёмкого) режима работы	18
1.7 Проверка выбранного электродвигателя по нагреву	23
1.8 Выбор силового тиристорного преобразовательного агрегата	24
1.9 Выбор питающего силового оборудования	30
1.10 Описание системы регулирования скорости	31
1.11 Исходные данные для расчёта	32
1.12 Расчёт регуляторов структурной схемы САУ скорости	33
1.12.1 Расчёт параметров якорной цепи	33
1.12.2 Расчёт параметров цепи возбуждения	38
1.12.3 Расчёт параметров контура тока	47
1.12.4 Расчёт параметров контура скорости	48
1.12.5 Расчёт параметров контура скорости	49
1.12.6 Расчёт параметров контура ЭДС	50
2 РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	52
2.1 Расчёт экономической эффективности	52
2.2 Вредные производственные факторы и средства защиты от них	56
2.3 Охрана окружающей среды	57

3 МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РУКОВОДСТВА ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОПЕРЕЧНО-СТРОГАЛЬНОГО СТАНКА	58
3.1 Общие сведения	58
3.2 Структура условного обозначения	58
3.3 Условия эксплуатации и принцип действия	59
3.4 Эксплуатация электропривода	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	77
ПРИЛОЖЕНИЕ А	79
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	80
ПРИЛОЖЕНИЕ В	81
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	82
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	83
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	84

ВВЕДЕНИЕ

Современное промышленное производство характеризуется большим многообразием технологических процессов. Основным источником механической энергии в большинстве отраслей промышленности служит электропривод. Совершенствование технологических процессов связано с регулированием работы машин и механизмов, что наиболее просто и экономично осуществляется с помощью регулируемого электропривода.

Развитие электропривода идет по пути повышения экономичности и надежности за счет дальнейшего совершенствования электродвигателей, электроаппаратуры, преобразователей, аналоговых и цифровых средств управления.

Прогрессивным явлением в этом процессе является применение микропроцессоров, позволяющих существенно расширить функциональные возможности автоматизированного электропривода и улучшить его технические и экономические характеристики. Разработка и освоение микропроцессорной системы регулирования были реакцией на резкое возрастание производства регулируемых электроприводов и усложнение алгоритмов управления, ее применение позволило значительно поднять технический уровень, упростить проектирование наладку и эксплуатацию полупроводниковых преобразовательных агрегатов.

Различие в видах используемой электроэнергии обусловлено в основном многообразием потребителей и их спецификой. Разнообразие в видах потребляемой и вырабатываемой электроэнергии вызывает необходимость ее преобразования: выпрямление, инвертирование и преобразование частоты.

В современных электроприводах применяются управляемые полупроводниковые приборы. На их основе разработаны унифицированные комплектные электроприводы на диапазон мощностей от единиц до нескольких сотен киловатт.

В данной квалификационной выпускной работе объектом проектирования является главный электропривод поперечно-строгального станка.

Предметом исследования является модернизация главного электропривода поперечно-строгального станка.

Целью является спроектировать регулируемый электропривод станка, произвести выбор электродвигателя главного привода поперечно-строгального станка, произвести проверку выбранного электродвигателя по нагреву, разработать вентильный преобразователь и систему управления электроприводом.

Задачи, которые необходимо решить при выполнении ВКР:

- определить требования к электроприводу;
- выбрать тип привода;
- рассчитать и выбрать электродвигатель;
- проанализировать работу выбранного электродвигателя по нагрузочной диаграмме и тахограмме;
- выбрать тиристорный преобразователь;
- разработать систему автоматического регулирования;
- оценить технико-экономический эффект от модернизации.

1 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС. ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

1.1 Оборудование станка

Поперечно-строгальный станок 7307ГТ – металлорежущий станок, предназначенный для обработки резцом горизонтальных, вертикальных, наклонных плоских поверхностей, а также для прорезания пазов и отверстий.

Общий вид станка приведён на рисунке 1.

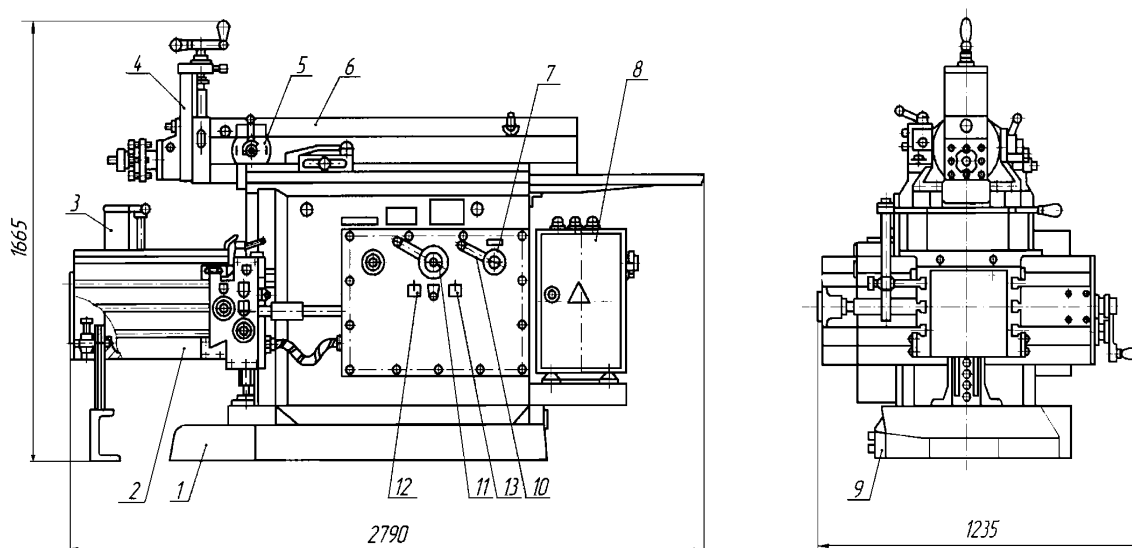


Рисунок 1 - Общий вид поперечно-строгального станка

1 - станина; 2 - поперечина; 3 - стружкосборник; 4 - суппорт; 5 - механизм вертикальной подачи суппорта; 6 - ползун; 7 - коробка скоростей; 8 - электрооборудование; 9 - смазка централизованная; 10 - механизм переключения скоростей; 11 - коробка подач; 12 - кнопка включения станка; 13 - кнопка "Общий стоп"

Станина представляет собой литой корпус, укрепленный на фундаментальной плите, которая крепится болтами к фундаменту. Фундаментальная плита служит резервуаром для масла. Прочность и жесткость станины обеспечивается наличием внутренних ребер. К верхней

части станины прикреплены направляющие планки в форме "ласточкина хвоста". Одна из планок регулируется винтами, что обеспечивает плотность посадки ползуна в направляющих. На передней стенке станины расположены направляющие (плоские) вертикального перемещения поперечины. На боковых и задней стенках станины расположены окна, закрытые крышками, служащие для монтажа и осмотра механизмов, размещенных в станине. Сзади на фундаментальной плите установлен лоток для масла и кронштейн для крепления электродвигателя главного привода.

Коробка скоростей - три вала, смонтированных на подшипниках качения непосредственно в корпусе станины. От электродвигателя через шкив и клиновые ремни вращение сообщается приводному шкиву, который смонтирован на двух шариковых подшипниках. Приводной шкив должен вращаться в направлении, указанном на кожухе. Приводной вал несет на себе два блока зубчатых колес. Второй вал коробки скоростей несет на себе пять неподвижных зубчатых колес, соединенных с валом шлицами. Третий вал несет на себе один подвижный блок зубчатых колес и неподвижное зубчатое колесо, которое входит в зацепление с зубчатым колесом червячно-реечной передачи. Зубчатые колеса соединены с валом шлицами. За счет переключения блоков зубчатых колес механизму поступательного движения ползуна сообщается восемь скоростей.

Приводной шкив с укрепленным на нем зубчатым колесом приводит в действие шестеренчатый насос централизованной смазки.

Монтаж коробки скоростей осуществляется с осевой фиксацией наружных колец подшипников в правой стенке станины с помощью пружинных колец, посаженных во втулке или в корпусе станины. Противоположные подшипники являются относительно корпуса станины плавающими, внутренние кольца которых зафиксированы относительно валов пружинами или гайками.

Механизм переключения скоростей выполнен в виде самостоятельной сборочной единицы и смонтирован внутри станины. Для включения необходимой скорости, отсчет которой ведется по нимбу; рукоятку переключения поворачивают по часовой или против часовой стрелки до требуемого положения. Нельзя допускать переключения скоростей на ходу.

Ползун представляет собой пустотелую чугунную отливку, снабженную внутри ребрами жесткости. Снизу ползун имеет наклонные направляющие в форме «ласточкина хвоста», которыми он скользит по направляющим, образованным станиной и клиньями. Подвижный клин должен быть отрегулирован так, чтобы ползун совершал свое возвратно-поступательное движение легко и без люфта. С левой стороны ползуна смонтирована часть механизма автоматического откидывания резца при обратном ходе ползуна. Для включения и отключения этого механизма служит рукоятка.

Суппорт (резцовая головка) поворотным кругом центрируется по ползуну и прикрепляется к нему хомутом. При работе с поворотом суппорта на угол 60° суппорт должен оставаться вне корпуса станины в течение всего рабочего цикла. На поворотном круге закреплена шкала с делениями от 90 до 30° с рабочей стороны. Спереди поворотный круг имеет направляющие в форме «ласточкина хвоста», по которым перемещаются салазки суппорта. Суппорт имеет ручную подачу и при установке механизма автоматической подачи суппорта - автоматическую подачу. Ручная подача осуществляется рукояткой при помощи винта, на котором имеется нимб с ценой деления $0,05$ мм. Полный оборот винта соответствует перемещению суппорта на 5 мм. К салазкам суппорта прикреплена поворотная доска, допускающая поворот на угол $\pm 15^\circ$. К поворотной доске шарнирно крепится откидная доска с резцедержателем, служащая для откидывания резца или свободного скольжения резца по обрабатываемой заготовке при обратном ходе ползуна и выключенном механизме автоматического откидывания резца. При строгании горизонтальных плоскостей поворотный круг устанавливается на 90° , поворотная доска должна

при этом находиться в средне положении. При строгании вертикальных плоскостей поворотный круг устанавливается на угол 0° , а поворотная доска поворачивается верхним концом до дугообразного паза в сторону от обрабатываемой поверхности.

Механизм вертикальной подачи суппорта расположен на боковой стороне ползуна. При механической подаче суппорт движется только в одном направлении - вниз. Изменение величины подачи осуществляется соответствующим поворотом сектора. Если сектор в положении «0» механизм вертикальной подачи включен.

Коробка подач вмонтирована в боковой нише станины со стороны выступающего конца коробки скоростей. Положение выбранной подачи указывается на шкале корпуса. В механизме подачи стола имеется устройство для автоматического ускоренного перемещения стола. При помощи этого механизма можно установит деталь на нужную высоту либо быстро произвести замену детали.

Поперечина смонтирована на прямоугольных вертикальных направляющих передней стенки станины. Она состоит из собственно поперечины, перемещающейся по вертикальным направляющим станины и стола, перемещающегося по горизонтальным направляющим поперечины.

Стол служит для установки и закрепления обрабатываемых деталей. Детали крепятся к столу болтами, входящими в Т-образные пазы. Мелкие детали закрепляются в тисках, установленных на столе. Стол имеет горизонтальное и вместе с поперечиной вертикальное перемещение от руки, механическое прерывистое и непрерывное ускоренное. Стол должен перемещаться по направляющим поперечины легко, но с плотным к ним прилеганием.

Стружкосборник служит для защиты рабочего от отлетающей во время работы стружки и для ее отбора. Стружкосборник устанавливается на стол станка.

1.2 Технологические характеристики станка 7307ГТ

Технологические характеристики поперечно-строгального станка 7307ГТ приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Технологические характеристики поперечно-строгального станка 7307ГТ

Наименование характеристики	Значение
1	2
Наибольшее расстояние от опорной поверхности резца до станины, мм	800
Наибольшая величина перестановки ползуна, мм	410
Наибольшее расстояние между рабочей поверхностью стола и ползуна, мм.	480
Наибольшие размеры верхней рабочей поверхности стола, мм	
- длина	710
- ширина	450
Наибольшая величина перемещения стола, мм.	
-в горизонтальном направлении	710
-в вертикальном направлении	380
Наибольшая величина перемещения салазок суппорта до входа в станину, мм	170
Наибольший угол поворота суппорта до входа в станину, град.	±60

Наибольший угол поворота доски резцедержателя, град.	± 15
Размеры сечения резца по не менее, мм	40x25
Число ступеней скорости перемещения ползуна	8

Окончание таблицы 1

1	2
Наибольшее усилие резания на ползуне, Н	19600
Масса станка с электрооборудованием, кг	2700
Масса поперечины, кг	250
Масса стола, кг	450
Масса ползуна, кг	500
Масса заготовки, кг	600
Габаритные размеры станка, мм.	
-длина	2790
-ширина	1235
-высота	1665

1.3 Принцип работы поперечно-строгального станка

Основными частями станка являются: станина, ползун, стол, суппорт, коробка скоростей, коробка подач.

Станина имеет коробчатую форму, является достаточно жесткой. На станине сверху имеются горизонтальные направляющие, по которым перемещается ползун с прикрепленным к нему суппортом. В резцедержатели суппорта закреплен резец, совершающий прямолинейное (горизонтальное) возвратно-поступательное движение. Внутри станины расположен механизм

централизованной смазки. Электродвигатель главного привода сообщает вращательное движение коробке скоростей, а через нее движению ползуна, состоящему из рабочего хода, при котором срезается слой металла и обратного хода, при котором резец отводится в исходное положение. На станине имеются вертикальные направляющие, по которым перемещается поперечина. Стол перемещается по горизонтальным направляющим поперечины, что в итоге обеспечивает возможность столу перемещаться в вертикальном и горизонтальном направлениях. Продольную и поперечную подачи осуществляет автоматическая коробка подач, вертикальную подачу - механизм автоматической подачи суппорта.

Кинематическая схема поперечно-строгального станка приведена в приложении А.

Электродвигатель главного привода М1 передает вращательное движение через коробку скоростей червяку, который преобразует вращательное движение вала коробки скоростей в поступательное движение рейки, составляющей единое целое с ползуном. При обратном ходе ползуна возможна работа механизма вертикальной подачи суппорта. Также от коробки скоростей вращательное движение передается коробке подач. При установке определенной подачи стол может перемещаться в горизонтальном направлении и вместе с поперечиной в вертикальном. Также имеется возможность ускоренного перемещения стола в горизонтальном либо в вертикальном направлениях. Для этого имеется второй электродвигатель М2. Движение вертикальной подачи суппорта, горизонтального и вертикального движения стола - прерывистые и осуществляются при обратном ходе ползуна. Ускоренное движение стола - непрерывное и может производиться при любом режиме работы.

1.4 Требования к электроприводу. Выбор типа электропривода

Особенности электропривода поперечно-строгального станка обусловлены процессом его работы, состоящей из последовательно повторных движений. Характерными являются частые переходные процессы при изменении режимов работы. Это обусловлено частыми переходными режимами работы: пуск, набор нагрузки, разгон, сброс нагрузки, торможение.

Запуск производится на холостом ходу для облегчения режима работы двигателя. Усилие резания достаточно велико и, поэтому, сначала двигатель разгоняется до половинной скорости, затем происходит врезание и, только после этого, достигается номинальная скорость. Это обусловлено и технологией снятия слоя металла, а также при чистовой обработке для уменьшения выкрашивания материала.

Для обработки материалов различных свойств и для обработки заготовок в разных режимах (шлифование, чистовая, черновая обработки) требуется регулирование скорости ползуна. В соответствии с требованиями технологии и описанными соображениями сформулируем требования к электроприводу главного движения:

- 1) привод должен быть регулируемый с диапазоном регулирования $D 4:1$;
- 2) режим работы с частыми реверсами;
- 3) двигатели должны иметь принудительное охлаждение для обеспечения работы на пониженных скоростях при постоянстве момента;
- 4) привод должен быть реверсивным и обеспечивать рекуперацию в сеть;
- 5) перегрузки по току при продолжительности перегрузки до 10 секунд при полном магнитном потоке не менее двукратного номинального;
- 6) погрешность скорости при изменении нагрузки не более 3,5%.

Техническое совершенство производственного механизма и осуществляемого технологического процесса в значительной мере

определяется совершенством соответствующего электропривода и степенью его автоматизации на электрической основе. На современном этапе развития широко применяются полупроводниковые приборы, в настоящее время привод реализуется по системе тиристорный преобразователь – двигатель (ТП-Д).

Тиристорные преобразователи отличаются высоким КПД, практически безинерционны, требуют незначительной мощности для управления и с их помощью создаются системы электроприводов, обладающие плавным и широким диапазоном регулирования скорости.

Соответствующие схемные решения обеспечивают формирование необходимых статических и динамических характеристик.

Исходя из технологических требований, выбираем электропривод постоянного тока с системой ТП-Д. Система автоматизированного электропривода должна обеспечивать пониженную частоту вращения электродвигателя, чего целесообразно добиваться регулированием напряжения питания якорной цепи. Для сокращения времени цикла и увеличения производительности скорость обратного хода ползуна должна быть увеличена, что может достигаться ослаблением потока возбуждения двигателя.

Выбранная система главного электропривода ТП-Д постоянного тока обеспечивает выполнение требований к электроприводу, является наиболее экономичной и современной.

1.5 Расчёт и выбор двигателя главного электропривода

Примем для расчета значения номинального режима.

Номинальная скорость $V_N=18$ м/мин;

Усилие резания $F_z=10,7$ кН.

Усилие, необходимое для перемещения ползуна в режиме холостого хода

$$F_{xx} = \mu \cdot g \cdot m_{сн},$$

где μ - коэффициент трения ползуна о направляющие ($\mu=0,06$);

g - ускорение свободного падения ($g=9,81 \text{ м/с}^2$), м/с^2 ;

$T_{\text{суп}}$ - масса суппорта и ползуна, кг.

$$F_{\text{ХХ}} = 0,06 \cdot 9,81 \cdot 0,6 = 0,35 \text{кН}$$

Определим усилие, необходимое для перемещения ползуна в режиме резания:

$$F_C = F_Z + \mu \cdot F_y + F_{\text{ХХ}},$$

где F_y - усилие, прижимающее ползун к направляющим ($F_y = 0,2 \text{ кН}$), кН.

$$F_C = 10,7 + 0,06 \cdot 0,2 + 0,35 = 11,1 \text{кН}$$

Предполагаемая мощность двигателя:

$$P_C = \frac{1,3 \cdot F_C \cdot V_N}{60 \cdot 10^3 \cdot \eta_N},$$

где η_N - номинальный КПД механической передачи.

$$P_C = \frac{1,3 \cdot 11,1 \cdot 18}{60 \cdot 10^3 \cdot 0,75} = 6,0 \text{кВт}$$

Предварительно выбираем двигатель постоянного тока марки 4ПФМ132SG04, основные параметры которого приведены в таблице 2.

Широкорегулируемые двигатели типа 4ПФ предназначены для приводов станков с числовым программным управлением (ЧПУ) и других механизмов, требующих регулировки частоты вращения в широком диапазоне. Двигатели имеют защищенное исполнение IP23 и независимое охлаждение IC06. Класс нагревостойкости изоляции F. Двигатели поставляются укомплектованными энкодерами и датчиками тепловой защиты. Возбуждение независимое с напряжением возбуждения 220В (при последовательном соединении всех катушек возбуждения) или 110 (при соединении катушек в две параллельные ветви). Вентилятор с независимым приводом располагается либо сверху на корпусе двигателя, либо по оси двигателя. Режим работы продолжительный S1. Допускают работу с тиристорными управляющими устройствами при пульсациях выпрямленного тока до 7%. Двигатели допускают перегрузку по

току якоря при номинальной частоте вращения до $1,1I_{ном}$ в течении 2ч; $1,5I_{ном}$ в течении 60 с и $2,5I_{ном}$ в течении 15 с.

Таблица 2 – Параметры двигателя 4ПФМ132SG04

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Номинальная мощность	кВт	6,0
Номинальное напряжение	В	220
Номинальный ток якоря	А	33,9
Номинальная частота вращения	об/мин	1600
Максимальная частота вращения	об/мин	4200
КПД	%	80,5
Сопротивление якоря	Ом	0,269
Напряжение обмотки возбуждения	В	220
Индуктивность якоря	мГн	5,7
Сопротивление обмотки возбуждения	Ом	76
Момент инерции двигателя	кгм ²	0,048
Перегрузочная способность		2,5

Момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\Sigma} = J_{ДВ} + 0,15 \cdot J_{ДВ} + \frac{m_{сун}}{\omega_N^2} \cdot V_N^2,$$

где ω_N - номинальная скорость двигателя, рад/с,

$$\omega_N = \frac{\pi \cdot n_N}{30},$$

где n_N – номинальная частота вращения двигателя, об/мин,

$$\omega_N = \frac{3,14 \cdot 1600}{30} = 167,55 \frac{рад}{с}$$

$$J_{\Sigma} = 0,048 + 0,15 \cdot 0,048 + \frac{600}{167,55^2} \cdot 0,3^2 = 0,057_{кг} \cdot м^2.$$

Момент статического холостого хода:

$$M_{XX} = \frac{F_{XX} \cdot V_N}{\eta_N \cdot \omega_N},$$

$$M_{XX} = \frac{350 \cdot 0,3}{0,75 \cdot 167,55} = 0,835_{Нм}.$$

Момент сопротивления прямого хода ползуна при номинальной нагрузке:

$$M_C = \frac{F_C \cdot V_N}{\eta_N \cdot \omega_N},$$

$$M_C = \frac{11,1 \cdot 10^3 \cdot 0,3}{0,75 \cdot 167,55} = 26,49_{Нм}$$

Момент двигателя номинальный:

$$M_N = \frac{P_N}{\omega_N},$$

где P_N – номинальная мощность двигателя, кВт,

$$M_N = \frac{6000}{167,55} = 35,81_{Нм}$$

Примем пусковой момент 1,7 от номинального момента:

$$M_{II} = 1,7 \cdot M_N,$$

$$M_{II} = 1,7 \cdot 35,81 = 60,73_{Нм}.$$

Определим допустимое ускорение. Разгон при резе металла (участок t_4):

$$M_{II} - M_C = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_{II} - M_C}{J_{\Sigma}},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{60,73 - 26,49}{0,057} = 600,7 \frac{рад}{с}.$$

1.6 Построение нагрузочной диаграммы электропривода для наиболее тяжёлого (энергоёмкого) режима работы

Исходя из технологических требований, примем скорость врезания резца в заготовку:

$$V_{ep} = \frac{1}{2} \cdot V_N,$$

$$V_{ep} = \frac{1}{2} \cdot 0,3 = 0,15 \frac{M}{c}.$$

Скорость перемещения ползуна при перемещении в обратном направлении:

$$V_{обр} = 2 \cdot V_N,$$

$$V_{обр} = 2 \cdot 0,3 = 0,6 \frac{M}{c}.$$

Зная угловую скорость двигателя, определим радиус привидения:

$$\rho = \frac{V_N}{60 \cdot \omega_N},$$

$$\rho = \frac{18}{60 \cdot 167,55} = 1,79 \cdot 10^{-3} M.$$

Угловая скорость двигателя при врезании в заготовку:

$$\omega_{ep} = \frac{1}{2} \cdot \omega_N,$$

$$\omega_{ep} = \frac{1}{2} \cdot 167,55 = 83,8 \frac{рад}{c}.$$

Угловая скорость двигателя при перемещении в обратном направлении:

$$\omega_{обр} = 2 \cdot \omega_N,$$

$$\omega_{обр} = 2 \cdot 167,55 = 335,1 \frac{рад}{c}.$$

Момент статического холостого хода при торможении:

$$M_{ххТ} = \frac{F_{xx} \cdot V_N}{\omega_N} \cdot \eta_N,$$

$$M_{ххТ} = \frac{350 \cdot 0,3}{167,55} \cdot 0,75 = 0,835 Hм.$$

Момент сопротивления прямого хода ползуна при номинальной нагрузке, при прямом направлении потока энергии:

$$M_C = \frac{F_C \cdot V_N}{\omega_N \cdot \eta_N},$$

$$M_C = \frac{11,1 \cdot 10^3 \cdot 0,3}{167,55 \cdot 0,75} = 26,49 \text{ Нм}.$$

Момент сопротивления прямого хода ползуна при номинальной нагрузке, при обратном направлении потока:

$$M_{CT} = \frac{F_C \cdot V_N}{\omega_N} \cdot \eta_N,$$

$$M_{CT} = \frac{11,1 \cdot 10^3 \cdot 0,3}{167,55} \cdot 0,75 = 14,90 \text{ Нм}.$$

Найдем допустимое ускорение при пуске:

$$\varepsilon_{доп} = \frac{1,7 \cdot M_N - M_C}{J_\Sigma},$$

$$\varepsilon_{доп} = \frac{1,7 \cdot 35,81 - 26,49}{0,057} = 603 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Динамический момент:

$$M_{дин} = \varepsilon_{дин} \cdot J_\Sigma,$$

$$M_{дин} = 603 \cdot 0,057 = 34,37 \text{ Нм}.$$

При работе с ослабленным полем вводим фиктивный момент. Фиктивный момент при разгоне:

$$M_{фр} = (M_{XX} + M_{дин}) \cdot \frac{\omega_{обр}}{\omega_N},$$

$$M_{фр} = (0,835 + 34,37) \cdot \frac{335,1}{167,55} = 70,41 \text{ Нм}.$$

Фиктивный момент при скорости обратного хода:

$$M_\phi = M_{XX} \cdot \frac{\omega_{обр}}{\omega_N},$$

$$M_\phi = 0,835 \cdot \frac{335,1}{167,55} = 1,67 \text{ Нм}.$$

Фиктивный момент при замедлении:

$$M_{фм} = (M_{XXT} + M_{дин}) \cdot \frac{\omega_{обр}}{\omega_N},$$

$$M_{фм} = (0,470 + 34,37) \cdot \frac{335,1}{167,55} = 69,68 \text{ Нм}.$$

Время разгона и торможения двигателя на холостом ходу в прямом направлении:

$$t_1 = t_9 = \frac{\omega_{ep}}{\varepsilon_{дон}},$$

$$t_1 = t_9 = \frac{83,8}{603} = 0,139c .$$

Перемещения ползуна за время разгона и торможения двигателя на холостом ходу в прямом направлении:

$$S_1 = S_9 = \frac{V_{ep}}{\varepsilon_{дон}} \cdot t_1,$$

$$S_1 = S_9 = \frac{0,15}{603} \cdot 0,139 = 0,010m .$$

Время разгона и торможения двигателя при резе:

$$t_4 = t_6 = \frac{\omega_N - \omega_{ep}}{\varepsilon_{дон}},$$

$$t_4 = t_6 = \frac{167,55 - 83,8}{603} = 0,139c .$$

Перемещения ползуна за время разгона и торможения двигателя при резе:

$$S_4 = S_6 = \frac{V_N - V_{ep}}{2} \cdot t_4,$$

$$S_4 = S_6 = \frac{0,3 - 0,15}{2} \cdot 0,139 = 0,010m .$$

Примем перемещения на скорости врезания 0,01 м:

$$S_2 = S_3 = S_7 = S_8 = 0,01m .$$

Тогда время этих перемещений составит:

$$t_2 = t_3 = t_7 = t_8 = \frac{S_1}{V_{ep}},$$

$$t_2 = t_3 = t_7 = t_8 = \frac{0,01}{0,15} = 0,067c .$$

Перемещение при рабочем ходе:

$$S_5 = S_{заг} - (S_3 + S_4 + S_6 + S_7),$$

$$S_5 = 0,71 - (0,01 + 0,01 + 0,01 + 0,01) = 0,67m .$$

Время перемещения при рабочем ходе:

$$t_5 = \frac{S_5}{V_N},$$

$$t_5 = \frac{0,67}{0,3} = 2,233c.$$

Время разгона и время торможения от нулевой до номинальной скорости в обратном направлении:

$$t_{10} = t_{14} = \frac{\omega_N}{\varepsilon_{дон}},$$

$$t_{10} = t_{14} = \frac{167,55}{603} = 0,278c.$$

Перемещения, совершаемые за это время:

$$S_{10} = S_{14} = \frac{V_N}{2} \cdot t_{10},$$

$$S_{10} = S_{14} = \frac{0,3}{2} \cdot 0,278 = 0,04m.$$

Время разгона и время торможения от номинальной скорости до скорости обратного хода:

$$t_{11} = t_{13} = \frac{\omega_{обр} - \omega_N}{\varepsilon_{дон}},$$

$$t_{11} = t_{13} = \frac{335,1 - 167,55}{603} = 0,278c.$$

Перемещения, совершаемые за это время:

$$S_{11} = S_{13} = \frac{V_{обр} - V_N}{2} \cdot t_{11},$$

$$S_{11} = S_{13} = \frac{0,6 - 0,3}{2} \cdot 0,278 = 0,04m.$$

Перемещение на скорости обратного хода:

$$S_{12} = S_{заг} + S_1 + S_2 + S_8 + S_9 - S_{10} - S_{11} - S_{13} - S_{14},$$

$$S_{12} = 0,71 + 0,04 - 0,16 = 0,59m.$$

Время перемещения ползуна на скорости обратного хода:

$$t_{12} = \frac{S_{12}}{V_{обр}},$$

$$t_{12} = \frac{0,59}{0,6} = 0,983c.$$

По полученным данным строим нагрузочную диаграмму и тахограмму двигателя (приложение Б).

1.7 Проверка выбранного электродвигателя по нагреву

Проверка по нагреву выполняется по методу эквивалентного момента, исходя из условия:

$$M_{экс} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n \beta \cdot t_i}} < M_N.$$

Так как охлаждение двигателя - принудительное, следовательно, теплоотдача в окружающую среду постоянна, т.е. $\beta = 1$. Тогда

$$M_{экс} = \sqrt{\frac{1}{t_{ц}} \cdot \sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i} < M_N,$$

где M_i, t_i - момент и время работы двигателя на i -ом участке тахограммы,

$t_{ц}$ - время цикла, с.

Все расчёты сводим в таблицу 3.

Таблица 3 – Данные для построение нагрузочной диаграммы

Участок	t_i, c	M_i	$M_i, Нм$	$M_i^2 \cdot t_i, Нм$
1	2	3	4	5
1	0,139	$M_{xx} + M_{дин}$	35,21	172,324
2	0,067	M_{xx}	0,84	0,047
3	0,067	M_c	26,49	47,015

4	0,139	$M_c + M_{дин}$	60,86	514,847
5	2,233	M_c	26,49	1566,941
6	0,139	$M_{ст} - M_{дин}$	-19,47	52,692
7	0,067	M_c	26,49	47,015
8	0,067	M_{xx}	0,84	0,047
9	0,139	$M_{ххт} - M_{дин}$	-33,90	159,740
10	0,278	$-M_{xx} - M_{дин}$	-35,21	344,649
11	0,278	$-\sqrt{\frac{M_{10}^2 + M_{10} \cdot M_{фр} + M_{фр}^2}{3}}$	-53,87	806,749

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5
12	0,983	$-M_{ф}$	-1,67	2,741
13	0,278	$\sqrt{\frac{M_{14}^2 + M_{14} \cdot M_{фр} + M_{фр}^2}{3}}$	52,65	770,622
14	0,278	$-M_{ххт} - M_{дин}$	33,53	312,544

$$M_{эв} = \sqrt{\frac{3940,332}{5,152}} = 30,49 \text{ Нм},$$

$$30,49 \text{ Нм} < 35,81 \text{ Нм},$$

Из расчётов видно, что эквивалентный момент не превышает номинальный момент двигателя, следовательно, электродвигатель проверку по нагреву проходит.

Запас по моменту составляет:

$$\frac{35,81}{30,49} = 1,18.$$

Проверим двигатель по перегрузочной способности, исходя из условия:

$$M_{\max} \leq M_N \cdot \lambda,$$

где M_{\max} - наибольший момент развиваемый двигателем ($M_{\max} = M_{фр} = 70,41 \text{ Нм}$),

λ - перегрузочная способность двигателя ($\lambda = 2,5$),

$$M_{\max} \leq 35,81 \cdot 2,5 = 89,53 \text{ Нм},$$

$70,41 \text{ Нм} < 89,53 \text{ Нм}$, условие проверки выполняется, двигатель проходит проверку по перегрузочной способности.

1.8 Выбор силового тиристорного преобразовательного агрегата

В настоящее время в электротехнической промышленности существует большое количество фирм-изготовителей статических преобразователей напряжения и частоты. Рынок разработчиков и изготовителей преобразователей представлен такими фирмами, как Siemens, ABB, Alien Bradley, AEG, General Electric и другими менее известными производителями. Данные фирмы выпускают как комплектные системы привода, так и отдельные системы управления, с возможностью конфигурации по усмотрению разработчиков.

В своём проекте я выбираю оборудование фирмы Siemens. Выбор оборудования фирмы Siemens сделан не случайно. Из номенклатуры выпускаемой продукции для управления тиристорными преобразователями может быть использовано ограниченное число систем регулирования с цифровым управлением. По техническим и стоимостным характеристикам вне конкуренции комплектные устройства SIMOREG DC - Master, что в конечном счете и определило выбор преобразователя.

Основными техническими данными комплектных тиристорных преобразователей для электроприводов являются номинальные ток I_N и номинальное напряжение U_N . Номинальный ток тиристорного преобразователя (ТП) выбирается по номинальному току двигателя и может быть больше его. Одновременно максимальный ток ТП должен быть не меньше максимального тока электродвигателя. Номинальное напряжение тиристорного преобразователя определяется номинальным напряжением электродвигателя, которое меньше номинального напряжения ТП, определяемого по ГОСТ 25953-2013, на 5-10%, что обеспечивает необходимый запас на регулирование скорости и на

безопасное инвертирование при снижении напряжения питающей сети.

Преобразователи фирмы SIEMENS серии 6RA70 SIMOREG DC MASTER являются полностью цифровыми компактными модулями с трехфазным питанием, предназначенными для питания якоря и обмотки возбуждения двигателей постоянного тока с регулируемой скоростью и с номинальным током якоря в диапазоне от 15А до 2000А. Комплектные преобразователи могут включаться параллельно для обеспечения тока до 10000А. Максимальное значение тока для питания цепи возбуждения равно 40А (уровни токов зависят от номинального тока якоря).

Преобразователи серии 6RA 70 SIMOREG DC MASTER характеризуются своей компактной, малогабаритной конструкцией. Их компактное исполнение гарантирует чрезвычайно легкое техническое обслуживание и ремонт, поскольку обеспечивается быстрый доступ к каждому компоненту. Модуль электроники состоит из основной электронной платы и из дополнительных плат.

Все блоки SIMOREG DC MASTER снабжены простой панелью управления (PMU - Parameterization Unit), закрепленной на дверце преобразователя. Панель состоит из пятиразрядного, семисегментного индикатора, трех светодиодов индикации состояния и трех клавиш параметрирования. На панели управления также находится соединитель типа X300 с интерфейсом USS, соответствующим стандарту RS232 или RS485. Панель обеспечивает все необходимое для регулирования и настройки, а также отображения измеренных значений, необходимых для запуска преобразователя.

Дополнительную панель управления преобразователем OP1S («Дружеская панель управления оператора») можно расположить либо на дверце преобразователя, либо вне ее, например, на двери шкафа. Для этого она может быть подключена с помощью пятиметрового кабеля. При наличии пятивольтового источника питания, допустимо использование кабеля длиной до 200 м. Панель OP1S подключается к SIMOREG с помощью соединителя

X300. Панель OP1S, отображающую измеренные физические параметры, можно использовать в качестве экономичной альтернативы для управления средствами измерения шкафа. Панель OP1S имеет ЖКИ индикатор с количеством символов 4x16, предназначенный для отображения имен параметров в виде простого текста. В качестве языка отображения можно выбрать немецкий, английский, французский, испанский и итальянский. Пользуясь панелью OP1S, можно сохранить наборы параметров для их последующей легкой загрузки в другие устройства.

Параметрирование преобразователя (процесс изменения установок значений с помощью панели оператора, активирование функций преобразователя или отображение измеренных значений) можно так же осуществлять через стандартный PC при использовании соответствующего программного обеспечения. ЭВМ подключается к базовому блоку с помощью последовательного интерфейса. Этот интерфейс используется во время запуска, для сохранения параметров при выключении, а также для диагностики во время работы. Более того, обновленное программное обеспечение преобразователя можно загрузить через этот интерфейс для хранения во *Flash* памяти.

В реверсивных преобразователях цепь якоря питается от двух полностью управляемых трехфазных мостов, включенных встречно-параллельно. На схему возбуждения питание подается через однофазный полууправляемый двухполупериодный мост. Напряжение питания якоря и схемы возбуждения может отличаться по частоте (лежать в диапазоне от 45 до 65 Hz). Последовательность чередования фаз источника питания якоря значения не имеет.

Для преобразователей с номинальным постоянным током от 15 А до 850 А (1200 А при напряжении 400 В), силовая часть для якоря и устройства возбуждения выполнена на изолированных тиристорных модулях, т.е. радиатор является электрически изолированным. Корпус и изолирующие крышки на силовых зажимах обеспечивают защиту от случайного прикосновения при

работе оператора в непосредственной близости от силовой части. Все соединительные зажимы доступны спереди.

Все функции регулирования с замкнутой и разомкнутой ОС, а также функции связи выполняются с помощью двух мощных микропроцессоров. Функции управления двигателем применены в программе как программные модули, которым можно задавать параметры. Номинальные постоянные токи, указанные на табличке с номинальными параметрами могут быть превышены не более, чем на 150%, допустимая перегрузка в процессе работы зависит от конкретного преобразователя. Микропроцессор циклически рассчитывает текущее значение $I t$ для силовой части, чтобы предотвратить повреждение тиристоров при работе с перегрузкой (эта функция использует временную характеристику фактического тока нагрузки, чтобы вычислить временную характеристику перегрева тиристора по отношению к температуре окружающего воздуха).

Выбираем преобразователь типа *D420 /60 Mreq - GeG6V62* с заказным номером *6RA7025 - 6DV62 - 0*, имеющий симметричную трехфазную мостовую схему. Это позволяет получать как положительное, так и отрицательное выпрямленное напряжение, что при неизменном направлении тока обеспечивает работу двигателя в первом и четвертом квадрантах механической характеристики. Преобразователь выполняется реверсивным с изменением полярности напряжения на якоре. На стороне переменного и постоянного тока преобразователь имеет автоматические выключатели. ТП получает питание от сети 380В через автоматический выключатель *QF1* и понижающий трансформатор *TV1*. Таким образом, тиристорный преобразователь получает питание от вторичной обмотки трансформатора ~ 220 В, а номинальное напряжение питания преобразователя ~ 380 В. Выбор такого технического решения объясняется тем, что фирма *SIEMENS* не выпускает преобразователи *SIMOREG DC MASTER* с напряжением питания якоря менее ~ 380 В, и для максимального использования преобразователя по мощности для питания

двигателя постоянного тока с номинальным напряжением якоря 220 В он подключен к сети переменного тока ~380 В через понижающий трансформатор. На стороне постоянного тока защита осуществляется автоматическим выключателем *QF2*.

Система управления СУ по сигналам оператора с пульта управления, сигналам о состоянии коммутационных и защитных аппаратов, получаемых из узлов управления этими аппаратами, сигналам из общей схемы управления технологическим агрегатом, сигналам о токе якоря двигателя и токе возбуждения, сигналам о напряжении на якоре электродвигателя, выдает сигналы управления в СИФУ, узел управления коммутационной аппаратурой и на пульт управления. Узел управления коммутационной аппаратурой и сигнализации по командам оператора и сигналам от СУ включает или выключает аппараты *QF1-QF3*, а также осуществляет сигнализацию о состоянии этих и других коммутационных аппаратов. Для защиты преобразователя в его ветвях включаются предохранители с заказным номером *3NE1817-0*, рассчитанные на ток 50А и напряжение 690В, поэтому внешние предохранители для тиристоров не требуются. На стороне постоянного тока устанавливается предохранитель с заказным номером *3NE4120*, рассчитанный на ток 80А и напряжение 1000В. Для цепи возбуждения используется предохранитель с заказным номером *5SD420* рассчитанный на ток 16А. Для защиты от перенапряжения выбираем варисторы *3RT1916-1BE00*. Для защиты от сетевых помех выбираем RC-цепочки *3RT1916-1CE00*. Для согласования по уровню напряжений преобразователя и контроллера выбираем выходную развязку *3TX7002-3AB01*.

Технические данные тиристорного преобразователя *6RA7025 - 6DV62 - 0 D420/60 Mreq - GeG6V62* приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Технические данные тиристорного преобразователя *6RA7025 - 6DV62 - 0 D420/60 Mreq - GeG6V62*

Параметр	Значение
Номинальное напряжение питания якоря	ЗАС 400 В

Номинальное напряжение питания источника питания электроники	1АС 190...230 (+15% / - 25%), $I_{ном}=2A$
Номинальное напряжение возбуждения	2АС 400
Номинальное постоянное напряжение	420 В
Номинальный постоянный ток	60 А
Перегрузочная способность	Максимум 150% от номинального
Номинальная выходная мощность	25 кВт
Потери при номинальном постоянном токе	240 Вт
Номинальное постоянное напряжение возбуждения	325 /373 В
Номинальный постоянный ток возбуждения	10А
Стабильность управления	$\Delta n = 0,1\%$ от номинальной скорости
Рабочая температура окружающей среды при	0... 45°C
Класс защиты окружающей среды	ЗКЗ
Степень защиты	IP00
Вес (приблиз.)	18,5 кг

1.9 Выбор питающего силового оборудования

Выбирается трехфазный силовой трансформатор для питания комплектного тиристорного электропривода постоянного тока SIMOREG DC MASTER со стороны якоря по трехфазной мостовой схеме ТСЗП-16/0,7-УХЛ4 (параметры трансформатора приведены в таблице 5), имеющий типовую мощность 16 кВА, класс напряжения сетевой обмотки 0,7 кВ и климатическое исполнение УХЛ4. Трансформатор допускает продолжительную работу при повышении напряжения на 10% сверх номинального при сохранении номинальных токов обмоток. Охлаждение трансформатора естественное воздушное при защищенном исполнении.

Таблица 5 – Параметры трансформатора ТСЗП-16/0,7-УХЛ4

Параметр	Значение
Номинальная мощность	14,6 кВА

Номинальное напряжение:	
сетевой обмотки	380В
вентильной обмотки	205 В
преобразователя	230 В
Номинальный ток:	
переменный вентиляторной обмотки	41 А
выпрямительного преобразователя	50 А
Напряжение короткого замыкания	5,2%
Ток холостого хода	8%
Потери:	
холостого хода	120 Вт
короткого замыкания	550 Вт
Схема соединения обмоток	Δ/Y

Коммутирующие реакторы необходимы для ограничения коммутационных импульсных перенапряжений в сети. Коммутирующие реакторы выбираются и для преобразователей цепи якоря двигателя, и для преобразователя цепи возбуждения.

Для питания обмотки возбуждения двигателя выбирается однофазный коммутирующий реактор производства фирмы SIEMENS типа 4EM4605-4CB00, технические параметры которого приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Технические параметры реактора типа 4EM4605-4CB00

Параметр	Значение
Номинальное напряжение питающей сети	230 В
Номинальный ток	5 А
Номинальная частота	50 Гц
Номинальная индуктивность фазы	5,6 мГн

Класс изоляции	40/В
Степень защиты	IP00
Масса	0,47 кг

1.10 Описание системы регулирования скорости

Управление скоростью двигателей двухзонное с зависимым управлением током возбуждения. САУ скорости состоит из двух частей.

Первая часть управляет скоростью двигателя в первой зоне – регулирование скорости от 0 до основного значения. Регулирование скорости производится изменением подводимого к якорю напряжения от 0 до номинального значения. Рассматриваемая часть двухзонной системы представляет собой двухконтурную систему подчинённого регулирования скорости с внутренним контуром регулирования тока якоря и внешним контуром регулирования скорости.

Передаточные функции регулятора тока и регулятора скорости соответствуют пропорционально-интегральным звеньям.

Регулирование скорости во второй части осуществляется двухконтурной системой регулирования потока возбуждения и внешним контуром регулирования ЭДС.

При регулировании скорости во второй зоне напряжение на якоре двигателя остаётся неизменным, равное номинальному значению. А регулирование скорости от основного до максимального значения происходит за счёт ослабления тока возбуждения. При этом ЭДС двигателя сохраняется равная номинальному значению во всём диапазоне второй зоны.

Привод содержит реверсивный преобразователь якорной цепи и нереверсивный преобразователь цепи обмотки возбуждения.

Функциональная схема привода приведена в приложении Г. Структурная схема привода приведена в приложении Д.

1.11 Исходные данные для расчёта

Данные, необходимые для расчёта якорной цепи и цепи обмотки возбуждения, представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Исходные данные для расчёта

Оборудование	Наименование параметра	Обозначение параметра	Значение параметра
1	2	3	4
Электродвигатель 4ПФМ132SG04	Номинальная мощность	P_N	6 кВт
	Номинальная угловая скорость	ω_N	167,55 рад/с
	Номинальный момент	M_N	35,81 Нм
	Номинальное напряжение якоря	$U_{ЯN}$	220 В
	Номинальный ток якоря	$I_{ЯN}$	33,9 А
	Активное сопротивление якорной обмотки	$R_{я0}$	0,269 Ом
	Активное сопротивление добавочных полюсов	$R_{ДП}$	0,220 Ом
	Номинальное напряжение обмотки возбуждения	$U_{ВN}$	220 В
	Номинальный ток обмотки возбуждения	$I_{ВN}$	2,25 А
	Активное сопротивление обмотки возбуждения	$R_{В}$	76 Ом
Окончание таблицы 7			
1	2	3	4
	Число витков обмотки возбуждения на полюс	$\omega_{В}$	825
	Число пар полюсов	p	2
	Суммарный момент инерции	J_{Σ}	0,057 кгм ²
Трансформатор ТСЗП-16/0,7-УХЛ4	Номинальное напряжение вентильной обмотки	U_{2N}	205 В
	Номинальный выпрямленный ток	$I_{ПН}$	60 А
	Напряжение короткого замыкания	$U_{КЗ\%}$	5,2 %
Преобразователь 6RA7025	Схема выпрямления	-	трехфазная мостовая
	СИФУ	-	с пилообразным опорным напряжением
	Коэффициент передачи СИФУ	K_{α}	11 град/В
	Пульсность	m	6
	Амплитудное значение напряжения сравнения	U_m	10В
	Напряжение для системы регулирования	$U_{бр}$	7 В
	Номинальное напряжение цепи возбуждения	$U_{пв}$	220 В
Коммутирующий	Номинальная индуктивность	$L_{КД}$	5,6 мГн

дрессель цепи возбуждения 4EM4605-4CB00	Активное сопротивление	R _{кд}	1,3 Ом
--	------------------------	-----------------	--------

1.12 Расчёт регуляторов структурной схемы САУ скорости

1.12.1 Расчёт параметров якорной цепи

Активное сопротивление цепи якоря двигателя:

$$R_{яд} = k_{тем} \cdot (R_{яо} + R_{дп}) + R_{щ},$$

где $k_{тем} = 1,24$ - коэффициент увеличения сопротивления при нагреве обмот-

ки до расчетной температуры, зависящий от класса нагревостойкости изоляции;

$R_{щ}$ – активное сопротивление щёток коллектора, Ом.

$$k_{тем} = 1 + 0,004 \cdot (\theta_2 - \theta_1),$$

где θ_1 - температура обмоток, при которой указаны сопротивления в каталогах ($\theta_1 = 15$ °C), °C ;

θ_2 - рабочая температура ($\theta_2 = 75$ °C), °C,

$$k_{тем} = 1 + 0,004 \cdot (75 - 15) = 1,24$$

$$R_{щ} = \frac{\Delta U}{I_{яN}},$$

где ΔU – падение напряжения на щётках коллектора ($\Delta U=2$ В), В,

$$R_{щ} = \frac{2}{33,9} = 0,059 \text{ Ом}$$

$$R_{яд} = 1,24 \cdot (0,269 + 0,220) + 0,059 = 0,665 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление цепи якоря двигателя:

$$L_{яд} = C \cdot \frac{U_{яN}}{p \cdot \omega_N \cdot I_{яN}},$$

где C - коэффициент для компенсированных двигателей ($C = 2$),

$$L_{яд} = 2 \cdot \frac{220}{2 \cdot 167,55 \cdot 33,9} = 38,7 \text{ мГн}.$$

Электромагнитная постоянная времени цепи якоря двигателя:

$$T_{я} = \frac{L_{яд}}{R_{яд}},$$

$$T_{я} = \frac{38,7 \cdot 10^{-3}}{0,665} = 0,0582 \text{ с}.$$

Максимальная ЭДС преобразователя:

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot U_{2N} \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m},$$

$$E_{d0} = \sqrt{2} \cdot 205 \cdot \frac{6}{3,14} \cdot \sin \frac{3,14}{6} = 277 \text{ В}.$$

Активное сопротивление главной цепи вентильного преобразователя:

$$R_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot R_T + R_X + R_{ш},$$

где k_{Π} - коэффициент преобразователя ($k_{\Pi}=2$);

R_T - приведенное к цепи выпрямленного тока активное сопротивление одной фазы обмотки трансформатора, Ом;

R_X - фиктивное активное сопротивление преобразователя, обусловленное коммутацией вентилей, Ом;

$R_{ш}$ - активное сопротивление ошиновки, Ом.

$$R_T = 0,2 \cdot \frac{U_{к3\%}}{100} \cdot \frac{\pi}{m} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{\Pi N}},$$

где $I_{\Pi N}$ - номинальный выпрямленный ток вентильного преобразователя

($I_{\Pi N} = 60 \text{ А}$), А.

$$R_T = 0,2 \cdot \frac{5,2}{100} \cdot \frac{3,14}{6} \cdot \frac{277}{60} = 0,0251 \text{ Ом},$$

$$R_X = 0,5 \cdot \frac{U_{к3\%}}{100} \cdot \frac{E_{d0}}{I_{\Pi N}},$$

$$R_X = 0,5 \cdot \frac{5,2}{100} \cdot \frac{277}{60} = 0,12 \text{ Ом},$$

$$R_{ш} = 0,1 \cdot R_{яд},$$

$$R_{III} = 0,1 \cdot 0,665 = 0,0665 \text{ Ом},$$

$$R_{II} = 2 \cdot 0,0251 + 0,12 + 0,0655 = 0,237 \text{ Ом}.$$

Действующее значение линейного первичного тока:

$$I_{1N} = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} \cdot k_1 \cdot I_{III},$$

где k_1 - коэффициент линейного первичного тока для трехфазной мостовой схемы ($k_1=0,816$).

$$I_{1N} = \frac{205}{380} \cdot 0,816 \cdot 60 = 26,413 \text{ А}.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора, приведенное ко вторичной цепи:

$$X_T = \frac{U_{K3\%}}{100} \cdot \frac{U_{1N}}{\sqrt{3} \cdot I_{1N}} \cdot \left(\frac{U_{2N}}{U_{1N}} \right)^2,$$

$$X_T = \frac{5,2}{100} \cdot \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 26,413} \cdot \left(\frac{205}{380} \right)^2 = 0,126 \text{ Ом}.$$

Индуктивность преобразователя:

$$L_{II} = \frac{k_{II} \cdot X_T}{\omega_C},$$

$$L_{II} = \frac{2 \cdot 0,126}{314,16} = 0,802 \text{ мГн}.$$

Сглаживающий дроссель в цепи якоря не требуется, так как двигатели серии 4ПФМ относятся к станочным и могут выдержать высокие пульсации тока якоря.

Эквивалентные параметры главной цепи:

$$R_{\Sigma} = R_{яд} + R_{II}, \quad L_{\Sigma} = L_{яд} + L_{II},$$

$$R_{\Sigma} = 0,665 + 0,237 = 0,902 \approx 0,9 \text{ Ом}, \quad L_{\Sigma} = 38,7 + 0,802 = 39,5 \text{ мГн}.$$

Электромагнитная постоянная времени главной цепи:

$$T_{\Sigma} = \frac{L_{\Sigma}}{R_{\Sigma}},$$

$$T_{\mathcal{E}} = \frac{39,5 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 0,0439c .$$

Электромеханическая постоянная времени:

$$T_M = J_{\Sigma} \cdot \frac{R_{\mathcal{E}}}{(k\Phi_N)^2} ,$$

$$k\Phi_N = \frac{E_{\mathcal{ЯN}}}{\omega_N} = \frac{U_{\mathcal{ЯN}} - R_{\mathcal{ЯД}} \cdot I_{\mathcal{ЯN}}}{\omega_N} ,$$

$$k\Phi_N = \frac{220 - 0,665 \cdot 33,9}{167,55} = 1,18 \frac{B \cdot c}{рад} ,$$

$$T_M = 0,057 \cdot \frac{0,9}{1,18^2} = 0,0368c .$$

Коэффициент усиления вентильного преобразователя:

$$K_{\Pi} = \frac{E_{d0}}{U_M} ,$$

$$K_{\Pi} = \frac{277}{10} = 27,7 .$$

Система базисных величин:

$$U_{\sigma} = E_{\mathcal{ЯN}} = 197,5B ,$$

$$I_{\sigma} = I_{\mathcal{ЯN}} = 33,9A ,$$

$$\Omega_{\sigma} = \omega_N = 167,55 \frac{1}{c} ,$$

$$M_{\sigma} = M_N = \frac{U_{\sigma} \cdot I_{\sigma}}{\Omega_{\sigma}} , M_{\sigma} = \frac{197,5 \cdot 33,9}{167,55} = 39,96Hм ,$$

$$R_{\sigma} = \frac{U_{\sigma}}{I_{\sigma}} , R_{\sigma} = \frac{197,5}{33,9} = 5,83Om .$$

Механическая постоянная времени:

$$T_j = J_{\Sigma} \cdot \frac{\Omega_{\sigma}}{M_{\sigma}} ,$$

$$T_j = 0,057 \cdot \frac{167,55}{39,96} = 0,239c .$$

Параметры главной цепи в системе относительных единиц.

Сопротивление главной цепи в системе относительных единиц:

$$r_{\varepsilon} = \frac{R_{\varepsilon}}{R_{\delta}},$$

$$r_{\varepsilon} = \frac{0,9}{5,83} = 0,154.$$

Коэффициент усиления преобразователя в системе относительных единиц:

$$k_{\Pi} = K_{\Pi} \cdot \frac{U_{\delta P}}{U_{\delta}},$$

где $U_{\delta P}$ - напряжение для системы регулирования ($U_{\delta P} = 7$ В), В,

$$k_{\Pi} = 27,7 \cdot \frac{7}{197,5} = 0,982.$$

Коэффициенты передачи датчика тока, скорости, ЭДС:

$$k_{дт} = K_{дт} \cdot \frac{I_{\delta}}{U_{\delta P}}, K_{дт} = k_{дт} \cdot \frac{U_{\delta P}}{I_{\delta}}, k_{дт} = 1, K_{дт} = 1 \cdot \frac{7}{33,9} = 0,206 \frac{В}{А},$$

$$k_{дс} = K_{дс} \cdot \frac{\Omega_{\delta}}{U_{\delta P}}, K_{дс} = k_{дс} \cdot \frac{U_{\delta P}}{\Omega_{\delta}}, k_{дс} = 1, K_{дс} = 1 \cdot \frac{7}{167,55} = 0,0418 В \cdot с,$$

$$k_{дэ} = K_{дэ} \cdot \frac{U_{\delta}}{U_{\delta P}}, K_{дэ} = k_{дэ} \cdot \frac{U_{\delta P}}{U_{\delta}}, k_{дэ} = 1, K_{дэ} = 1 \cdot \frac{7}{197,5} = 0,034 \frac{В \cdot с}{рад}.$$

Максимальная ЭДС преобразователя в о.е.:

$$e_{d0} = \frac{E_{d0}}{U_{\delta}},$$

$$e_{d0} = \frac{277}{197,5} = 1,40 \text{ о.е.}$$

Номинальная ЭДС преобразователя в о.е.:

$$e_N = \frac{E_{ЯN}}{U_{\delta}},$$

$$e_N = \frac{220}{197,5} = 1,11 \text{ о.е.}$$

1.12.2 Расчёт параметров цепи возбуждения

Определение номинального значения магнитного потока:

$$\Phi_N = \frac{k\Phi_N}{k},$$

$$k = \frac{p}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{N}{a}, \quad k = \frac{3}{2 \cdot 3,14} \cdot 110 = 52,521,$$

$$\Phi_N = \frac{1,18}{52,521} = 0,0225 \text{ Вб}.$$

При обратном ходе поток ослаблен в 2 раза. Значение потока при ослабленном магнитном поле:

$$0,5 \cdot \Phi_N = 0,5 \cdot 0,0225 = 0,0113 \text{ Вб}.$$

По кривой намагничивания на рисунке 2 определим ток возбуждения при ослабленном поле.

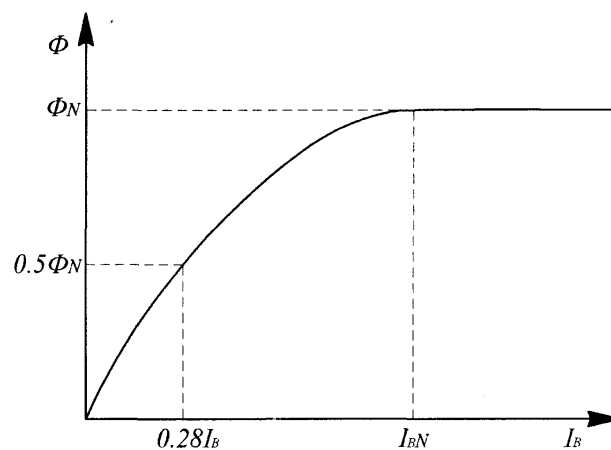


Рисунок 2 – Кривая намагничивания

$$I_B(0,5 \cdot \Phi_N) = 0,28 \cdot I_{BN} = 0,28 \cdot 2,25 = 0,63 \text{ А}$$

Номинальное значение потока рассеяния:

$$\Phi_{\sigma N} = \sigma \cdot \Phi_N, \quad \Phi_{\sigma N} = 0,18 \cdot 0,0225 = 4,05 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Номинальное значение главного потокосцепления:

$$\Psi_{mN} = m_B \cdot \omega_B \cdot \Phi_N,$$

где m_B - коэффициент, зависящий от обмотки возбуждения ($m_B = 2p = 4$),

$$\Psi_{mN} = 4 \cdot 825 \cdot 0,0225 = 74,25 \text{ Вб}$$

Номинальное значение намагничивающего тока:

$$I_{mB} = I_{BN} = 2,25 \text{ А}$$

Значение потокосцепления при ослабленном поле:

$$\psi_{mN}(0,5 \cdot \Phi_N) = 0,5 \cdot \psi_{mN} = 0,5 \cdot 74,25 = 37,125 \text{ Вс}$$

Значение тока намагничивания при ослабленном поле, по кривой намагничивания на рисунке 3 определим ток возбуждения при ослабленном поле:

$$I_{mB}(0,5 \cdot \Phi_N) = 0,28 \cdot I_{mN} = 0,28 \cdot 2,25 = 0,63 \text{ А}$$

Номинальное значение потокосцепления рассеяния:

$$\psi_{\sigma N} = \delta \cdot \psi_{mN},$$

$$\psi_{\sigma N} = 0,18 \cdot 74,25 = 13,37 \text{ Вс}.$$

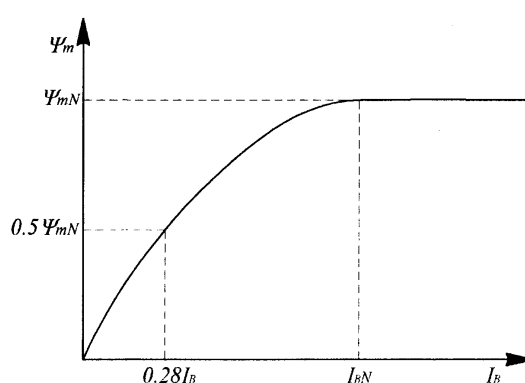


Рисунок 3 - Кривая потокосцепления

Активное сопротивление обмотки возбуждения, приведенное к рабочей температуре:

$$R_{OB} = k_{\text{тепл}} \cdot R_B,$$

$$R_{OB} = 1,24 \cdot 76 = 94,2 \text{ Ом}.$$

Активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов:

$$R_{BT} = \frac{R_{OB}}{\alpha_{BT}},$$

где α_{BT} - конструктивный коэффициент ($\alpha_{BT} = 0,1$ для сплошного ярма),

$$R_{BT} = \frac{94,2}{0,1} = 942 \text{ Ом}.$$

Система базисных величин:

$$I_{\sigma B} = I_{BN} = 2,25 \text{ А},$$

$$R_{\sigma B} = R_{OB} = 94,2 \text{ Ом},$$

$$U_{\delta B} = R_{\delta B} \cdot I_{\delta B} = 2,25 \cdot 94,2 = 212B,$$

$$\Psi_{\delta B} = \Psi_{mN} = 74,25Bc,$$

$$\Phi_{\delta} = \Phi_N = 0,0225B\delta,$$

$$L_{\delta B} = \frac{\Psi_{\delta B}}{I_{\delta B}} = \frac{74,25}{2,25} = 33Гн,$$

$$T_{\delta B} = \frac{\Psi_{\delta B}}{U_{\delta B}} = \frac{74,25}{212} = 0,35c$$

Пересчет кривой намагничивания в систему относительных единиц.

Индуктивность, обусловленная главным потоком машины

$$L_m^o = \frac{d\Psi_m}{dI_m}$$

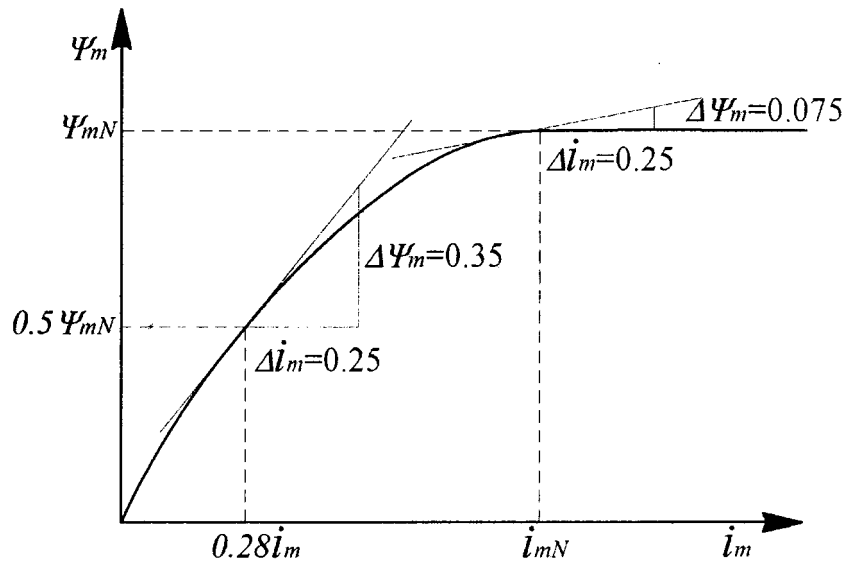


Рисунок 4 - Кривая потокосцепления

Для пересчета необходимо в точках, где нас интересует индуктивность, провести касательные к кривой и определить значение отрезков, которыми являются катеты прямоугольных треугольников (рисунок 4).

При номинальном потоке $i_m=1$ о.е. Тогда индуктивность, обусловленная главным потоком машины в относительных единицах:

$$l_m^o = \frac{d\Psi_m}{di_m} = \frac{\Delta\Psi_m}{\Delta i_m},$$

$$l_m^o = \frac{0,075}{0,25} = 0,3$$

При ослабленном магнитном потоке $i_m = 0,28$ о.е. Тогда индуктивность, обусловленная главным потоком машины в относительных единицах:

$$l_m^o = \frac{0,35}{0,25} = 1,4$$

Значение индуктивности при полном магнитном потоке $\varphi^o = 1$:

$$L_m^o = l_m^o \cdot L_{\delta B},$$

$$L_m^o = 0,3 \cdot 33 = 9,9 \text{ Гн}.$$

Значение индуктивности при половинном магнитном потоке $\varphi^o = 0,5$:

$$L_m^o = 1,4 \cdot 33 = 46,2 \text{ Гн}.$$

Индуктивность рассеяния принимается:

$$l_{OB}^o = \frac{d\varphi^o}{di_B} = 0,18 \text{ о.е.}$$

Индуктивность рассеяния в абсолютных единицах:

$$L_{OB}^o = l_{OB}^o \cdot L_{\delta B},$$

$$L_{OB}^o = 0,18 \cdot 33 = 5,94 \text{ Гн}.$$

Индуктивность обмотки возбуждения в о.е. при $\varphi^o = 1$:

$$l_B^o = l_m^o + l_{OB}^o,$$

$$l_B^o = 0,3 + 0,18 = 0,48.$$

Индуктивность обмотки возбуждения в абсолютных единицах:

$$L_B^o = L_m^o + L_{OB}^o = l_B^o \cdot L_{\delta B},$$

$$L_B^o = 0,48 \cdot 33 = 15,84 \text{ Гн}.$$

Индуктивность обмотки возбуждения в о.е. при $\varphi^o = 0,5$:

$$l_B^o = l_m^o + l_{OB}^o,$$

$$l_B^o = 1,4 + 0,18 = 1,58.$$

Индуктивность обмотки возбуждения в абсолютных единицах:

$$L_B^o = L_m^o + L_{OB}^o = l_B^o \cdot L_{\delta B},$$

$$L_B^\sigma = 1,58 \cdot 33 = 52,14 \text{ Гн}.$$

Активное сопротивление обмотки возбуждения в о.е.:

$$r_B = \frac{R_{OB}}{R_{\delta B}},$$

$$r_B = \frac{94,2}{94,2} = 1.$$

Активное сопротивление эквивалентного контура вихревых токов в о.е.:

$$r_{BT} = \frac{R_{BT}}{R_{\delta B}},$$

$$r_{BT} = \frac{9,42}{94,2} = 10.$$

Постоянные времени цепей схемы замещения при $\phi^\circ = 1$:

$$T_B^\sigma = \frac{l_B^\sigma}{r_B} \cdot T_{\delta B}, \quad T_B^\sigma = \frac{0,18}{1} \cdot 0,35 = 0,063 \text{ с},$$

$$T_{BT}^\sigma = \frac{l_m^\sigma}{r_{BT}} \cdot T_{\delta B}, \quad T_{BT}^\sigma = \frac{0,3}{1} \cdot 0,35 = 0,105 \text{ с},$$

$$T_B^\sigma = \frac{l_B^\sigma}{r_B} \cdot T_{\delta B}, \quad T_B^\sigma = \frac{0,48}{1} \cdot 0,35 = 0,168 \text{ с}.$$

Постоянные времени цепей схемы замещения при $\phi^\circ = 0,5$:

$$T_B^\sigma = \frac{l_B^\sigma}{r_B} \cdot T_{\delta B}, \quad T_B^\sigma = \frac{0,18}{1} \cdot 0,35 = 0,063 \text{ с},$$

$$T_{BT}^\sigma = \frac{l_m^\sigma}{r_{BT}} \cdot T_{\delta B}, \quad T_{BT}^\sigma = \frac{1,4}{10} \cdot 0,35 = 0,049 \text{ с},$$

$$T_B^\sigma = \frac{l_B^\sigma}{r_B} \cdot T_{\delta B}, \quad T_B^\sigma = \frac{1,58}{1} \cdot 0,35 = 0,553 \text{ с}.$$

Максимальная ЭДС преобразователя цепи возбуждения:

$$E_{d0} = 1,35 \cdot U_{пв},$$

$$E_{d0} = 1,35 \cdot 220 = 297 \text{ В}.$$

Максимальная ЭДС преобразователя цепи возбуждения в о.е.:

$$e_{d0} = \frac{E_{d0}}{U_{\delta B}},$$

$$e_{d0} = \frac{297}{212} = 1,4$$

Активное сопротивление вентильного преобразователя:

$$R_{II} = R_{KD} = 1,3 \text{ Ом},$$

где R_{KD} - активное сопротивление коммутирующего дросселя ($R_{KD} = 1,3 \text{ Ом}$).

Индуктивность вентильного преобразователя:

$$L_{II} = L_{KD} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн},$$

где L_{KD} - индуктивность коммутирующего дросселя ($L_{KD} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$).

Эквивалентное активное сопротивление цепи возбуждения:

$$R_B = R_{OB} + R_{II},$$

$$R_B = 94,2 + 1,3 = 95,5 \text{ Ом}.$$

ЭДС преобразователя в точке $\varphi^\circ = 1$ в абсолютном значении и относительных единицах:

$$E_{II}^o = R_B \cdot I_{mN},$$

$$E_{II}^o = 95,5 \cdot 2,25 = 214,9 \text{ В},$$

$$e_{II} = \frac{E_{II}^o}{U_{\delta B}},$$

$$e_{II} = \frac{214,9}{212} = 1,014.$$

ЭДС преобразователя в точке $\varphi^\circ = 1$ в абсолютном значении и относительных единицах:

$$E_{II}^o = R_B \cdot I_{mN},$$

$$E_{II}^o = 95,5 \cdot 0,63 = 60,17 \text{ В},$$

$$e_{II} = \frac{E_{II}^o}{U_{\delta B}},$$

$$e_{II} = \frac{60,17}{212} = 0,284.$$

Расчет нелинейной регулировочной характеристики преобразователя для определения коэффициента усиления. Эквивалентные структурные звенья преобразователя приведены на рисунке 5.

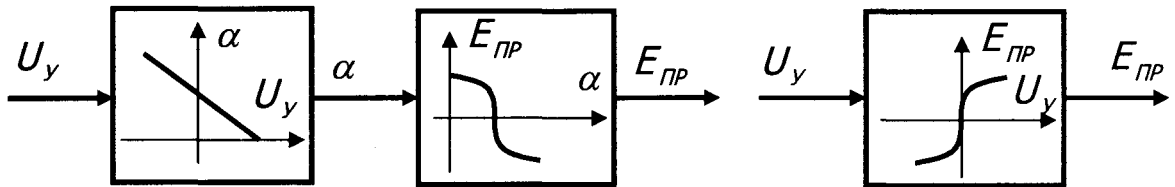


Рисунок 5 – Эквивалентные структурные звенья преобразователя

$$E_{II} = E_{d0} \cdot \cos(\alpha), \text{ где } \alpha = \frac{\pi}{2} \cdot \left(1 - \frac{U_y}{U_M}\right), \text{ тогда получаем}$$

$$E_{II} = E_{d0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{U_M}\right) = E_{d0} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{180^\circ} \cdot K_\alpha \cdot U_y\right).$$

Найдем максимальное напряжение управления, которое обеспечивает E_{d0} :

$$U_{y_{max}} = 8,18B.$$

Расчет нелинейной регулировочной характеристики преобразователя в системе относительных единиц:

$$e_{II} = e_{d0} \cdot \sin(k_\alpha \cdot U_y),$$

$$k_\alpha = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot K_\alpha \cdot U_y,$$

$$k_\alpha = \frac{3,14}{180^\circ} \cdot 11^\circ \cdot 7 = 1,34,$$

$$e_{d0} = \frac{E_{d0}}{U_{\delta B}},$$

$$e_{d0} = \frac{297}{212} 1,4,$$

$$e_{II} = 1,4 \cdot \sin(1,34 \cdot u_y).$$

Найдем максимальное напряжение управления, которое обеспечивает e_{d0} :

$$u_{y_{max}} = 1,17.$$

Напряжение управления при $\varphi^\circ = 1$:

$$u_y = \frac{1}{k_\alpha} \cdot \arcsin\left(\frac{e_{\Pi B}}{e_{d0}}\right),$$

$$u_y = \frac{1}{1,34} \cdot \arcsin\left(\frac{1,014}{1,4}\right) = 0,604,$$

$$U_y = u_y \cdot U_{\delta P},$$

$$U_y = 0,604 \cdot 7 = 4,23B.$$

Напряжение управления при $\varphi^\circ = 1$:

$$u_y = \frac{1}{k_\alpha} \cdot \arcsin\left(\frac{e_{\Pi B}}{e_{d0}}\right),$$

$$u_y = \frac{1}{1,34} \cdot \arcsin\left(\frac{0,284}{1,4}\right) = 0,152,$$

$$U_y = u_y \cdot U_{\delta P},$$

$$U_y = 0,152 \cdot 7 = 1,067B.$$

Коэффициент усиления вентильного преобразователя в окрестностях точек

$$k_{\Pi B} = \frac{de_{\Pi B}}{du_y} = k_\alpha \cdot e_{d0} \cdot \cos(k_\alpha \cdot u_y) = 1,34 \cdot 1,4 \cdot \cos(1,34 \cdot u_y),$$

$$\varphi^\circ = 1 \quad k_{\Pi B} = 1,34 \cdot 1,4 \cdot \cos(1,34 \cdot 0,604) = 1,294,$$

$$K_{\Pi B} = k_{\Pi B} \cdot \frac{U_{\delta B}}{U_{\delta P}}, \quad K_{\Pi B} = 1,294 \cdot \frac{212}{7} = 39,19B,$$

$$\varphi^\circ = 0,5 \quad k_{\Pi B} = 1,34 \cdot 1,4 \cdot \cos(1,34 \cdot 0,152) = 1,837,$$

$$K_{\Pi B} = k_{\Pi B} \cdot \frac{U_{\delta B}}{U_{\delta P}}, \quad K_{\Pi B} = 1,837 \cdot \frac{212}{7} = 55,61B.$$

Коэффициент передачи датчика тока возбуждения:

$$k_{дТ} = K_{дТ} \cdot \frac{I_{\delta B}}{U_{\delta P}}, \quad k_{дТ} = 1,$$

$$K_{дТ} = k_{дТ} \cdot \frac{U_{\delta P}}{I_{\delta B}},$$

$$K_{дТ} = 1 \cdot \frac{7}{2,25} = 3,11 \frac{B}{A}.$$

Постоянные времени схемы замещения цепи возбуждения

$$T_{B1,2}^o = \frac{T_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{T_1}{2}\right)^2 - T_2^2},$$

где T_1 – большая постоянная времени цепи возбуждения, с;

T_2^2 – малая постоянная времени цепи возбуждения, с².

$$\varphi^o = 1 \quad T_1 = T_{BT}^o + T_B^o, \quad T_1 = 0,010 + 0,168 = 0,178c$$

$$T_2^2 = T_{BT}^o \cdot T_B^\sigma, \quad T_2^2 = 0,010 \cdot 0,063 = 6,3 \cdot 10^{-4} c^2,$$

$$T_{B1,2}^o = \frac{0,178}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,178}{2}\right)^2 - 6,3 \cdot 10^{-4}},$$

$$T_{B1}^o = 0,089 + 0,085 = 0,174,$$

$$T_{B2}^o = 0,089 - 0,085 = 0,004,$$

$$\varphi^o = 0,5 \quad T_1 = T_{BT}^o + T_B^o, \quad T_1 = 0,049 + 0,553 = 0,602c$$

$$T_2^2 = T_{BT}^o \cdot T_B^\sigma, \quad T_2^2 = 0,049 \cdot 0,063 = 3,087 \cdot 10^{-3} c^2,$$

$$T_{B1,2}^o = \frac{0,602}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0,602}{2}\right)^2 - 3,087 \cdot 10^{-3}},$$

$$T_{B1}^o = 0,302 + 0,295 = 0,597,$$

$$T_{B2}^o = 0,302 - 0,295 = 0,007$$

Сведём в таблицу найденные параметры силовой цепи в таблицу 8 и параметры цепи возбуждения в таблицу 9.

Таблица 8 – Параметры якорной цепи

k_{II} , о.е.	r_3 , о.е.	T_3 , с	T_m , с	T_j , с	$k_{лт}$, о.е.	$k_{дс}$, о.е.	$k_{дэ}$, о.е.
0,982	0,154	0,0439	0,0368	0,239	1	1	1
0,982	0,154	0,0439	0,1472	0,239	1	1	1

Таблица 9 – Параметры цепи возбуждения

	T_B^o, c	T_B^σ, c	T_{BT}^o, c	l_m^o	l_B^o	r_B	r_{BT}	$k_{ПВ}$	$k_{дт}$	$k_{дэ}$	T_{B1}^o, c	T_{B2}^o, c
$\Phi=1$	0,168	0,063	0,010	0,3	0,48	1	10	1,294	1	1	0,174	0,004
$\Phi=0,5$	0,553	0,063	0,049	1,4	1,58	1	10	1,837	1	1	0,597	0,007

Постоянная времени T_μ

$$T_{\mu \min} = \frac{\pi}{p \cdot \omega_c} = \frac{\pi}{6 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_c},$$

$$T_{\mu \min} = \frac{1}{6 \cdot 2 \cdot 50} = 1,39 \cdot 10^{-3} c.$$

1.12.3 Расчёт параметров контура тока

Объектом регулирования в контуре тока является тиристорный преобразователь и якорная цепь двигателя (рисунок 6).

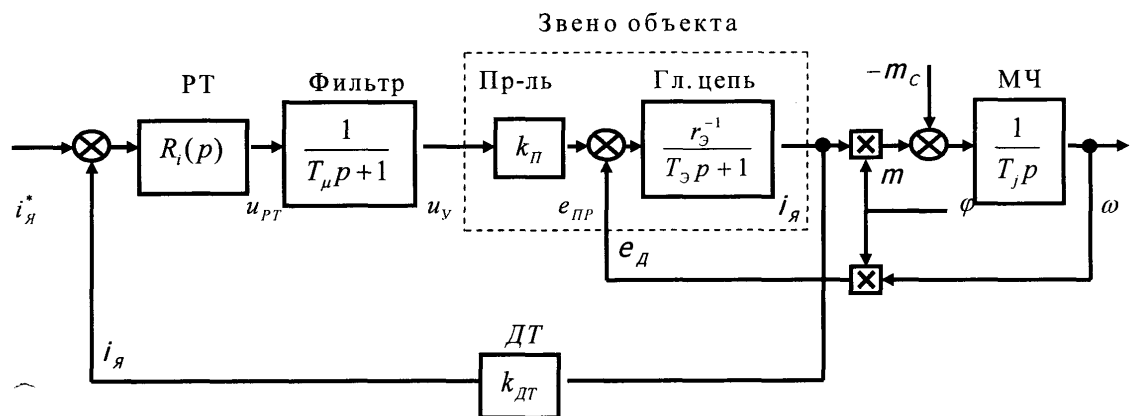


Рисунок 6 – Структурная схема контура тока

$$W_i(p) = \frac{k_{П} \cdot r_{Э}^{-1}}{T_{Э} p + 1}.$$

При настройке на модульный оптимум передаточная функция регулятора

$$R_i(p) = W_i(p)^{-1} \cdot \frac{1}{T_i p} = \frac{T_{Э} p + 1}{2 \cdot k_{П} \cdot r_{Э}^{-1} \cdot T_{μ} p + 1},$$

$$R_i(p) = \frac{0,0439 \cdot p + 1}{2 \cdot 0,982 \cdot 0,154^{-1} \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1} = \frac{0,0439 \cdot p + 1}{0,0408 \cdot p} = 1,076 + \frac{24,51}{p}.$$

Анализ влияния обратной связи по ЭДС

Но, так как $e_d \neq 0$, то ЭДС вращения оказывает влияние на систему автоматического регулирования, т. е. по отношению к заданию имеется установившаяся ошибка $\Delta i_{\text{уст}}$, которая зависит от электромеханических свойств и быстродействия контура.

В данном случае $T_m > 20T_\mu$ ($0,368 > 20 \cdot 0,0032 = 0,064$), следовательно влиянием e_d можно пренебречь и компенсирующий элемент в контур тока не ставится.

1.12.4 Расчёт параметров контура скорости

Синтез регулятора скорости производится аналогично контуру тока. Структурная схема приведена на рисунке 7.

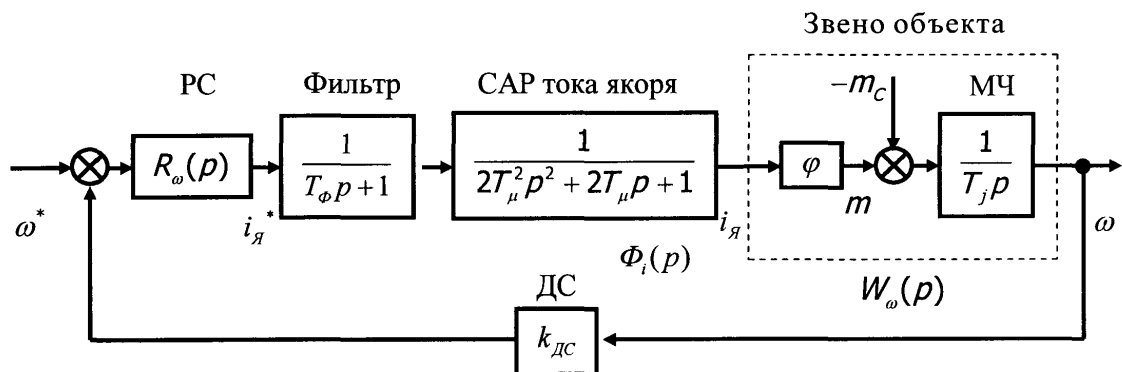


Рисунок 7 – Структурная схема контура регулирования скорости

При синтезе не учитывается m_c , т.е. передаточная функция объекта контура скорости имеет вид:

$$W_\omega(p) = \frac{1}{T_j p}$$

Передаточная функция регулятора скорости определяется

$$W_i(p) = \frac{W_\omega(p)^{-1}}{T_\omega p}$$

$$R_\omega(p) = \frac{T_j}{T_\omega}, \text{ «П» - регулятор,}$$

$$T\omega = 2 \cdot T_i = 4 \cdot T_\mu \text{ при условии настройки на модульный оптимум.}$$

Передаточная функция разомкнутого контура

$$G_{\omega}(p) = \frac{1}{4T_{\mu}p(2T_{\mu}^2p^2 + 2T_{\mu}p + 1)}$$

Передаточная функция замкнутого контура

$$\Phi_{\omega}(p) = \frac{1}{8T_{\mu}^3p^3 + 8T_{\mu}^2 + 4T_{\mu}p + 1}$$

Передаточная функция регулятора скорости

$$R_{\omega}(p) = \frac{0,239}{0,0128} = 18,67$$

1.12.4 Расчёт параметров контура скорости

Для синтеза используется эквивалентное представление объекта регулирования (рисунок 8).

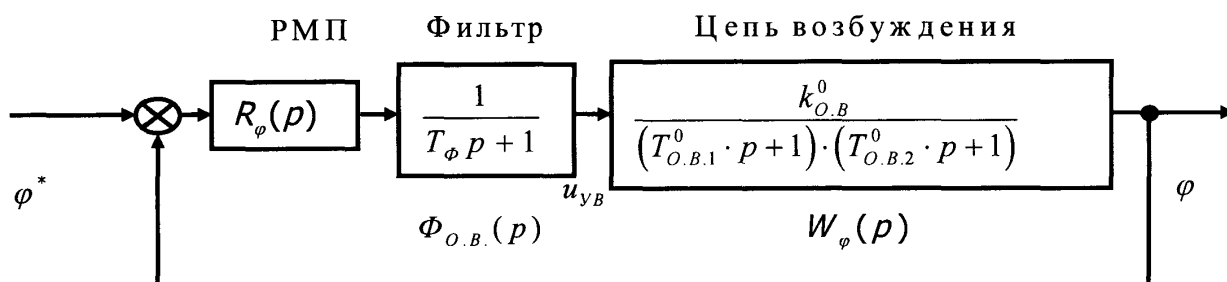


Рисунок 8 – Линеаризованная расчётная схема САР магнитного потока возбуждения двигателя

Здесь модель цепи возбуждения представлена в виде двух апериодических звеньев:

$$W_{\varphi}(p) = \frac{k_{\Pi B}^0}{T_{B1}^0 p + 1} \cdot \frac{1}{T_{B2}^0 p + 1}$$

Но анализ показывает, что $T_{B1} \ll T_{B2}$, поэтому в качестве некомпенсированной части принимается совокупность введенного внешнего фильтра и внутреннего фильтра объекта с малой постоянной времени (рисунок 9).

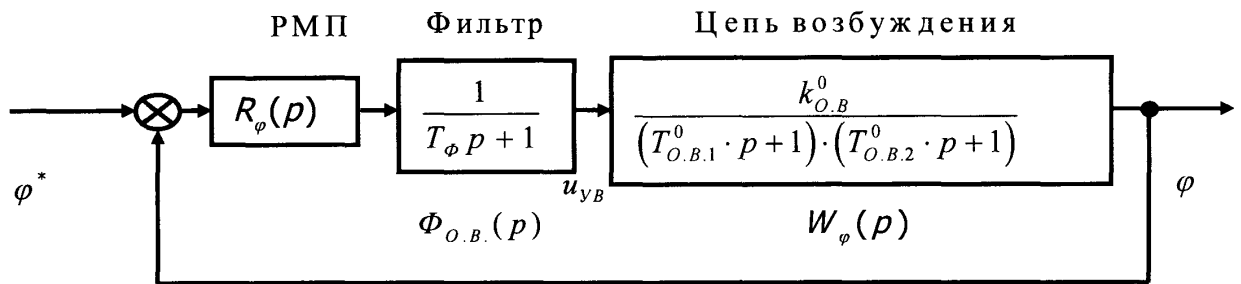


Рисунок 9 – Вариант линеаризованной расчётной схемы САР магнитного потока возбуждения двигателя

$$\Phi_o(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1} \cdot \frac{1}{T_{B2}^o p + 1},$$

$$W_\phi(p) = \frac{k_{\Pi B}^o}{T_{B1}^o p + 1},$$

$$T_\phi = 2 \cdot T_{\mu B} = 2 \cdot (T_\phi + T_{B2}^o), \quad T_\phi = 2 \cdot (0,05 + 0,004) = 0,108c,$$

$$R_\phi(p) = W_\phi^{-1}(p) \cdot \frac{1}{T_\phi p} = \frac{T_{B1}^o p + 1}{k_B^o T_\phi p},$$

$$R_\phi(p) = \frac{0,174p + 1}{0,388 \cdot 0,108p} = 4,15 + \frac{23,85}{p},$$

$$k_B^o = \frac{k_{\Pi B}^o \cdot l_m^o}{r_B},$$

$$k_B^o = \frac{1,294 \cdot 0,3}{1} = 0,388.$$

1.12.6 Расчёт параметров контура ЭДС

Для исключения операции дифференцирования тока (так как в системах подчиненного регулирования в качестве датчиков ЭДС используются вычислители, функционирующие на основе измерения напряжения и тока якоря двигателя) в структуру вычислителя вводится апериодический фильтр с постоянной времени $T_{дэ} = T_{яд}$ (рисунок 10).

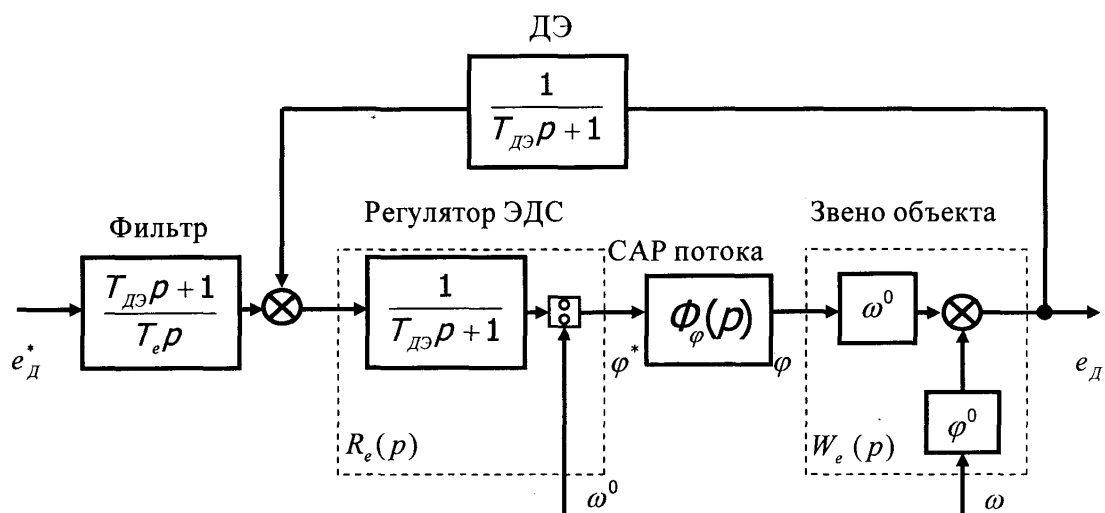


Рисунок 10 - Линеаризованная расчётная схема САР ЭДС якоря двигателя с компенсируемым инерционным датчиком ЭДС

$$\Phi_{\varphi}(p) = \frac{1}{2T_{\mu B}^2 p^2 + 2T_{\mu B} p + 1},$$

$$W_{\omega}(p) = \frac{\omega^0}{T_{дэ} p + 1},$$

$$R_e(p) = W_e^{-1}(p) \cdot \frac{1}{T_e p} = \frac{T_{дэ} p + 1}{\omega^0 T_e p},$$

$$R_e(p) = \frac{0,044 p + 1}{2 \cdot 0,152 p} = 0,144 + \frac{3,29}{p},$$

«ПИ» - регулятор, $T_{дэ} = T_{яд} = 0,044 \text{ с}$,

$$T_e = 2 \cdot (T_{дэ} + T_{\varphi}),$$

$$T_e = 2 \cdot (0,044 + 0,108) = 0,152 \text{ с}.$$

В структуре регулятора ЭДС целесообразно выделить интегрирующее звено с постоянным параметром T_e и делительное звено с переменным параметром ω^0 . Блок деления в структуре регулятора компенсирует влияние изменения скорости на характеристики контура ЭДС.

2 РАСЧЁТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ. БЕЗОПАСНОСТЬ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

2.1 Расчёт экономической эффективности

Экономическая эффективность выбранного варианта достигается за счет:

- а) сокращения простоев, увеличения времени работы оборудования;
- б) повышения производительности станка;
- в) уменьшения эксплуатационных расходов.

Расчет экономической эффективности ведется на основе сравнения двух вариантов:

- до модернизации;
- после модернизации.

Расчет капитальных затрат

Затраты на основное новое оборудование отражены в таблице 10.

Таблица 10 – Затраты на новое оборудование

Наименование	Цена, руб
Двигатель 4ПФМ132SG04	86 000
Трансформатор ТСЗП-16/0,7-УХЛ4	32 300
Коммутирующий дроссель 4EM4605-4CB00	10 134
Предохранитель 3NE1817-0 3 шт.	5 264
Предохранитель 3NE4120	1918
Предохранитель 5SD420	426
Тиристорный преобразователь <i>SimoregDC Master 6RA7025</i>	84 260
Индуктивный датчик ДВИ-М08-45У-2130-Х 4 шт.	5 504
Контроллер <i>Simatic S7-200 CPU-224</i>	21 506
Модуль ввода <i>EM-221</i>	8 720
Итого	264332

Всего затраты на оборудование составили: $K_{об} = 264332$ руб.

В стоимость оборудования включаются: тиристорный преобразователь, двигатель постоянного тока, программируемый контроллер. Полный срок службы не менее 10 лет.

Затраты на транспортировку оборудования принимаем в размере 15 % от его стоимости и они составят:

$$K_{тр} = 0,15 \cdot K_{об} = 0,15 \cdot 264332 = 39649,8 \text{ руб.}$$

Затраты на монтаж оборудования принимаем в размере 5 % от его стоимости и они составят:

$$K_{мон} = 0,05 \cdot K_{об} = 0,05 \cdot 264332 = 13216,6 \text{ руб.}$$

Сумма капитальных затрат составит:

$$\Delta K = K_{об} + K_{тр} + K_{мон} = 264332 + 39649,8 + 13216,6 = 317198,4 \text{ руб.}$$

Расчет эксплуатационных расходов.

Сокращение затрат на переналадку станка.

Переналадка осуществляется через каждые 2 дня работы. Работу производят два наладчика 6 разряда.

Время наладки:

до модернизации $t_{нал1} = 3$ ч;

после модернизации $t_{нал2} = 1$ ч.

Время наладки станка в год:

до модернизации

$$T_{нал1} = \frac{n \cdot t_{нал1}}{2},$$

где n – количество дней работы оборудования в год ($n=285$ д), д.

$$T_{нал1} = \frac{285 \cdot 3}{2} = 427,5 \text{ ч},$$

после модернизации

$$T_{нал2} = \frac{n \cdot t_{нал2}}{2},$$

$$T_{нал2} = \frac{285 \cdot 1}{2} = 142,5 \text{ ч}.$$

Сокращение затрат времени на наладку:

$$\Delta T_{\text{нал}} = T_{\text{нал1}} - T_{\text{нал2}},$$

$$\Delta T_{\text{нал}} = 427,5 - 142,5 = 285 \text{ ч.}$$

Сокращение затрат на зарплату наладчиков:

$$\Delta C_{\text{нал}} = K_{\text{ч}} \cdot Z_{\text{нал}} \cdot T_{\text{нал}},$$

где $K_{\text{ч}}$ - количество наладчиков;

$Z_{\text{нал}}$ - средняя зарплата наладчика 6 разряда за час ($Z_{\text{нал}} = 182,5$ руб./ч),
руб./ч.

$$\Delta C_{\text{нал}} = 2 \cdot 182,5 \cdot 285 = 104025 \text{ руб.}$$

Сокращение затрат на социальные нужды:

$$\Delta C_{\text{осн.нал}} = \Delta C_{\text{нал}} \cdot K_{\text{осн}},$$

где $K_{\text{осн}}$ – страховые взносы ($K_{\text{осн}} = 0,3$).

$$\Delta C_{\text{осн.нал}} = 104025 \cdot 0,3 = 31207,5 \text{ руб.}$$

Сокращение затрат на ремонт и обслуживание станка.

В результате замены оборудования повысилась надежность работы оборудования, увеличились периоды работы между профилактическими ремонтами. Работу по обслуживанию станка производят два электромонтера 6 разряда.

Периодичность профилактических работ по обслуживанию оборудования составляет:

- до модернизации - через 4 дня работы (12 смен);
- после модернизации - через 12 дней работы (36 смен).

Время обслуживания в год:

- до модернизации

$$T_{\text{эл1}} = \frac{n \cdot t_{\text{эл1}}}{4},$$

$$T_{\text{эл1}} = \frac{285 \cdot 4}{4} = 285 \text{ ч,}$$

- после модернизации

$$T_{эл2} = \frac{n \cdot t_{эл2}}{12},$$

$$T_{эл2} = \frac{285 \cdot 4}{12} = 95 \text{ ч.}$$

Сокращение затрат времени на ремонт и обслуживание:

$$\Delta T_{эл} = T_{эл1} - T_{эл2},$$

$$\Delta T_{эл} = 285 - 95 = 190 \text{ ч.}$$

Сокращение затрат на зарплату электромонтеров:

$$\Delta C_{эл} = K_{ч} \cdot Z_{эл} \cdot T_{эл},$$

$$\Delta C_{эл} = 2 \cdot 182,5 \cdot 190 = 69350 \text{ руб.}$$

Сокращение затрат на социальные нужды:

$$\Delta C_{осн.эл} = \Delta C_{эл} \cdot K_{осн},$$

$$\Delta C_{осн.эл} = 69350 \cdot 0,3 = 20805 \text{ руб.}$$

Суммарное сокращение затрат на социальные нужды:

$$\Delta C_{осн} = \Delta C_{осн.нал} + \Delta C_{осн.эл},$$

$$\Delta C_{осн} = 31207,5 + 20805 = 52012,5 \text{ руб.}$$

$$\Delta C = \Delta C_{нал} + \Delta C_{осн.нал} + \Delta C_{эл} + \Delta C_{осн.эл}$$

$$\Delta C = 104025 + 31207,5 + 69350 + 20805 = 225387,5 \text{ руб.}$$

Эффективность дополнительных капиталовложений характеризует срок окупаемости:

$$T_{ок} = \Delta K / \Delta C,$$

$$T_{ок} = 317198,4 / 225387,5 = 1,4 \text{ года.}$$

Показатели экономической эффективности приведены в приложении Е, в таблице Е.1.

Срок окупаемости 1,4 года, при его расчёте не учитывалось повышение производительности работы, амортизация. Реальный срок окупаемости составит примерно 1-1,5 лет. Для данного предприятия нормативный срок окупаемости составляет 2 года. Результаты расчетов показывают, что модернизация станка является экономически целесообразной.

2.2 Вредные производственные факторы и средства защиты от них

Поперечно-строгальный станок 7307ГТ, установленный в ремонтно-механической мастерской является высокопроизводительным агрегатом с непрерывным циклом работы и необходимым контролем со стороны оператора.

При работе поперечно-строгального станка имеют место следующие вредные производственные факторы:

- а) вращающиеся части оборудования;
- б) разброс металлической стружки;
- в) наличие пыли в среде в виде мельчайших частиц металла;
- г) риск придавливания рук оператора тяжёлыми заготовками;
- д) нагрев поверхности заготовки и резца;
- е) шум и вибрация.

Для уменьшения воздействия вредных факторов на человека необходимо по возможности исключить его из зоны их влияния. Но поскольку оборудованию нужен непрерывный контроль со стороны оператора, то необходимо снизить влияние вредных факторов до допустимых норм, применяя средства индивидуальной защиты от воздействия вредных производственных факторов.

Перечень средств защиты от воздействия вредных производственных факторов для оператора поперечно-строгального станка приведён в таблице 11.

Таблица 11 - Перечень средств защиты от воздействия вредных производственных факторов

Наименование вредного производственного фактора	Средство защиты
Вращающиеся части оборудования	Применение защитных кожухов
Разброс металлической стружки	Использование стружкосборника и защитных очков
Наличие пыли в среде в виде мельчайших частиц металла	Применение приточно-вытяжной вентиляции
Риск придавливания рук оператора тяжёлыми заготовками	Использование грузоподъёмных механизмов
Нагрев поверхности заготовки и резца	Применение защитных перчаток

Шум и вибрация	Использование средств защиты слуха (беруши, наушники), применение виброгасящих материалов
----------------	---

2.3 Охрана окружающей среды

При работе поперечно-строгального станка в воздух выделяется определенное количество мелко дисперсной пыли, состоящей в основном из аэрозоли масел и частиц обрабатываемого материала. Пыль, воздействуя на организм человека, может вызвать раздражение кожи, конъюнктивит глаза, а при проникновении в легкие - пневматические заболевания.

Профилактические меры по уменьшению воздействия вредных веществ направлены на повышение эффективности вентиляции.

Вентиляция - это организованный и регулируемый воздухообмен, обеспечивающий удаление из помещения загрязненного воздуха и подачи вместо него свежего наружного.

По способу подачи воздуха вентиляция организуется смешанной (естественная совместно с механической). Естественная вентиляция создает теплообмен за счет разности удельного веса теплого воздуха, воздух, а теплый выходит через вытяжной фонарь, находящийся на крыше. Для поддержания постоянного воздухообмена независимо от метеорологических условий, а также для удаления загрязненного воздуха в сосредоточенных местах, применяется механическая вентиляция. Механическая вытяжная вентиляция удаляет загрязненный воздух через сеть воздуховодов при помощи вентилятора.

Для снижения содержания вредных веществ в воздухе до предельно-допустимой концентрации на выходе вентиляционных установок устанавливаются пылеуловители - ячейковые фильтры.

В результате технологического процесса станка образуется металлическая стружка. Она собирается в специальные ёмкости, прессуется и повторно переплавляется.

Применение эффективных средств защиты обеспечивает полную нейтрализацию вредных воздействий на окружающую среду и человека.

3 МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РУКОВОДСТВА ПО ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОПЕРЕЧНО- СТРОГАЛЬНОГО СТАНКА

3.1 Общие сведения

Назначение: Устройство из серии SIEMENS 6RA70 SIMOREG DC MASTER тиристорного электропривода постоянного тока представляет собой преобразующую систему тиристорного типа применяемую для выполнения регулировки рабочего напряжения, величины тока, скорости вращения, момента на валу, мощности и других параметров электрического двигателя.

Применение: тиристорный электропривод 6RA70 SIMOREG DC применяется в промышленности: металлургической, бумажной, машиностроительной. Применение новой элементной базы (тириستоров, выключателей, предохранителей, интегральных микросхем, программируемых средств) и конструктивных решений позволили снизить массогабаритные показатели электроприводов, повысили эксплуатационную надежность.

3.2 Структура условного обозначения

Условное обозначение: SIEMENS SIMOREG DC 6RA7025 - 6DV62 - 0
D420 /60 Mreq - GeG6V62:

DC – постоянный ток;

420 – номинальное постоянное напряжение;

60 – номинальный постоянный ток.

3.3 Условия эксплуатации и принцип действия

Номинальные значения климатических факторов по ГОСТ 15150-2013 и ГОСТ 15543.1-2013; высота на уровне моря до 1000 м; верхнее рабочее значение температуру окружающего воздуха 40 °С; содержание пыли в окружающем воздухе до 4 мг/м³. Электропривод не предназначен для эксплуатации при непосредственном воздействии солнечной радиации, во взрывоопасной среде и в передвижных установках; группа механического исполнения М39 по ГОСТ 17516.1-2010; степени защиты электроприводов IP21 по ГОСТ 14254-2013, кроме мест выхода силовой ошиновки, резисторов динамического торможения вентиляторов, устанавливаемых на высоту 2200 мм, где степень защиты IP00. Электропривод отвечает требованиям техники безопасности по ГОСТ 12.2.007.0-2013, ГОСТ 12.2.007.7-2013, ГОСТ 12.2.007.11-2013, а также требованиям действующих „Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей" и „Правил технической безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей", утвержденные государственной инспекцией по энергетическому надзору.

Номинальные данные приведены в таблице 12.

Таблица 12 - Номинальные данные КТЭУ-4000/930Е-12Т208ДТ54-УХЛ4

Наименование	Обозначение	Величина
Номинальное выпрямленное напряжение преобразователя	$U_{\text{дном}}$	220 В
Номинальный выпрямленный ток	$I_{\text{дном}}$	60 А
Линейное напряжение вентильной обмотки	$U_{2п}$	205 В
Номинальный ток вентильной обмотки	$I_{2ном}$	

Принцип действия: обеспечивает пуск и торможение двигателей с заданными значениями тока, момента, ускорения, времени. Поддержание заданной частоты вращения или ее регулирование по определенному алгоритму, ограничение максимальных значений тока, частоты вращения, напряжения, момента, ускорения.

Электропривод функционально представляет собой комплекс взаимосвязанных узлов: выпрямитель для питания якорной цепи двигателя; устройств для питания обмотки возбуждения двигателя; устройств для питания электромагнитного тормоза; устройств аварийного динамического торможения двигателя; комплекс реактивного и трансформаторного оборудования, а также релейно-контакторной аппаратуры и автоматических выключателей, обеспечивающих максимальную заводскую готовность электропривода; средств управления и сигнализации, обеспечивающие взаимосвязанное управление всем составным частям электропривода и решение задач регулирования защиты и автоматизации объекта, где используется электропривод; розетки для подключения паяльников и измерительных приборов; разъем для подключения устройств питания обмотки возбуждения тахогенератор и устройств для организации сетей переменного тока напряжением 42 и 220 В для подключения приборов, используемых при наладке электропривода

Включает в себя следующие функциональные узлы и устройства. Силовую часть с трёхфазной мостовой схемой выпрямления; систему автоматического регулирования, защиты и сигнализации фирмы Siemens; устройство питания обмотки возбуждения двигателя; устройство питания электромагнита механического тормоза; устройство питания обмотки возбуждения тахогенератора; устройство динамического торможения; входной преобразовательный трансформатор или сетевой реактор; сглаживающий или токоограничивающий реактор в цепи выпрямленного тока; силовую коммутационную и защитную аппаратуру в цепях переменного и постоянного тока, систему автоматической диагностики состояния элементов электропривода.

3.4 Эксплуатация электропривода

В процессе эксплуатации на промышленном объекте необходимо проводить техническое обслуживание электроприводов с целью обеспечения надежной работы и предотвращения отказов в соответствии с графиками планово-предупредительных ремонтов. Если на каком-либо электроприводе будет зафиксировано частое срабатывание защит, то он должен пройти профилактический осмотр в первую очередь.

Рекомендуется 1 раз в две недели проверять форму и значение напряжений источников питания, установку нулей датчиков, операционных усилителей, 1 раз в квартал необходимо проверять установку ограничения задания тока в ячейке регулятора скорости, уровни срабатывания компаратора в схеме задания скорости, компараторов защит, работу узлов задания скорости, работу узла переключения выпрямительных групп, а также датчика нулевого тока этого узла.

С такой же периодичностью проводят внешний осмотр электропривода, обтирку и продувку деталей и аппаратов от пыли, осматривают разъемы блоков и ячеек и проверяют затяжку болтовых соединений и контактного крепежа.

Один раз в 3-6 месяцев рекомендуется проверять настройку СИФУ и регуляторов, особенно регулятора тока при работе преобразователя на невозбужденный двигатель, а также сопротивление изоляции силовых цепей и цепей управления.

Комплектующая электропривод аппаратура (автоматические выключатели, контакторы, силовые трансформаторы, двигатель вентилятора и др.) подвергается профилактическим осмотрам и ревизии в соответствии с инструкциями по эксплуатации.

Выключатели серии ВАТ-48 осматриваются 1 раз в 3-4 месяцев, с них удаляется пыль. После отключения аварийного тока или после 10 отключений тока, превышающего 0,5 % от номинала, выключатель подлежит внеочередной

ревизии (без разборки), при которой очищаются дугогасительные контакты, рога, внутренние перегородки камеры от налета меди и копоти.

При обгаре более чем на 2 мм дугогасительные контакты и рога неподвижного контакта заменяют запасными. Проверяют и регулируют узел дугогасительного контакта, зазор между рогом и дугогасительным контактом.

При ревизии выключателей 1 раз в год необходимо зачитать или при необходимости заменять дугогасительные контакты, зачищать внутренние перегородки камеры, осматривать оси неподвижного контакта и заменять смазку, заменять смазку поверхности прилегания якоря к сердечнику и зуба защелки, проверять крепление рогов, гибкой связи дугогасительного и подвижного контактов и всех регулировочных элементов, проверять изоляцию элементов выключателя, проверять все регулировки выключателя.

Ремонтировать выключатель следует 1 раз в два года. Ремонт включает в себя выполнение всех работ, предусмотренных при ревизии.

Так как в электроприводах серии 6RA70 SIMOREG DC силовые автоматы при нормальной работе ток не коммутируют, то их достаточно осматривать 1 раз в 3 месяца, а также после каждого отключения аварийного тока. При осмотре следует очистить автомат от пыли и загрязнения, проверить надежность всех резьбовых соединений, проверить отсутствие механических затираний.

При обнаружении повреждения какой-либо детали ее следует заменить на запасную.

Закопченные поверхности контактных колодок, дугогасительной камеры, контактных траверс и самих контактов следует протирать хлопчатобумажной ветошью. При осмотре магнитной системы необходимо обратить внимание на то, чтобы якорь легко поворачивался и имел минимальное перемещение вдоль оси призмы; встречные призмы должны быть установлены так, чтобы не было затирания подвижной системы.

При осмотре контактов необходимо проверять отсутствие перекосов и линию соприкосновения контактов, суммарная длина которой должна равняться не менее 75% ширины подвижного контакта. При включении подвижный контакт должен перекашиваться по неподвижному. Если контакты обгорели или на них образовались застывшие капельки, то поверхность необходимо слегка зачистить бархатным напильником и протереть чистой ветошью. Не разрешается чистить контакты наждачным полотном, так как кристаллы наждака врезаются в материал контактов, что ухудшает надежность контактирования. Смазка контактов не допускается. Раствор контактов, провал и начальное нажатие на контакт являются основными параметрами контактного устройства и не должны выходить за пределы допустимых, поэтому в условиях промышленной эксплуатации аппаратов они подлежат периодической проверке к настройке. После каждого осмотра контактной системы следует следить за установкой и фиксацией камер, проверять отсутствия затирания в них неподвижных контактов. Проверять при необходимости счищать с камер копоть и нагар.

При осмотре силовых трансформаторов проверяется затягивание болтовых соединений, характер гудения и уровень наполнения негорючей жидкостью. У масляных трансформаторов дополнительно проверяется уровень заполнения и цвет масла, отсутствие течи. Ревизию масляного трансформатора рекомендуется проводить 1 раз в год.

У вентилятора проверяется отсутствие затирания и перегрева подшипников двигателя с разборкой к замене смазки 1 раз в год.

После аварийного отключения основная задача эксплуатационного персонала - скорейшее обнаружение неисправного узла, замена или ремонт его и включение электропривода в работу. Поиск неисправностей облегчается системой сигнализации электропривода и другими устройствами, позволяющими локализовать неисправность. Для обнаружения неисправного узла эксплуатационный персонал должен иметь необходимое оборудование:

электронно – лучевые осциллографы, комбинированные измерительные приборы, мегаомметр, электрощуп, инструмент для съема силовых блоков, удлинители, обеспечивающие возможность измерения напряжения в различных точках ячеек и субблоков при их подключении к шкафу электропривода. Необходимо иметь резервные проверенные ячейки и силовые блоки. Ячейки управления некоторых типов используются в нескольких блоках и могут иметь разные параметры и даже схемы за счет установки перемычек внутри ячейки. Поэтому при установке в блок управления схема включения перемычек ячейки должна быть приведена в соответствие с заменяемой. Для наиболее ответственных электроприводов желательно иметь заранее налаженный стопроцентный резерв ячеек.

Электроприводы снабжаются устройствами запоминания и индикации аварийного сигнала. Соответствие между номером загоревшегося светодиода и аварийным сигналом указывается в таблице на дверях шкафа управления. В таблице 13 приведен список аварийных сигналов электропривода типа 6RA70 SIMOREG DC.

Таблица 13 – Аварийные сигналы.

Светодиод	Авария
ПМ1.2	Нет готовности тиристорного преобразователя
ПМ1.3	Аварийное отключение силового автомата
ПМ1.4	Отключен рубильник силовой цепи
ПМ1.5	Отключен источник постоянного тока 220 В
ПМ1.6	Отключено возбуждение тахогенератора
ПМ1.7	Превышение максимальной скорости
ПМ1.8	Перегрузка двигателя (для двухдвигательных приводов)
ПМ1.9	Отключен линейный контактор
ПМ1.10	Переключатель режимов в положении "проверка"
ПМ2.1	Недопустимое уменьшение тока возбуждения
ПМ2.2	Напряжение двигателя выше допустимого
ПМ2.3	Превышение времени стоянки двигателя под током
ПМ2.4	Отключены источники питания блоков
ПМ2.5	Неисправность цепи динамического торможения
ПМ2.7	Защита высоковольтного ввода
ПМ2.8	Газовая защита трансформатора
ПМ2.9	Ток возбуждения двигателя выше допустимого
ПМ3.1	Открыта дверь вентильной секции при работе
ПМ3.4	Перегрев подшипников двигателя
ПМ3.5	Температура масла трансформатора выше допустимой

ПМ3.6	Сгорел один предохранитель
ПМ3.7	Отсутствует вентиляция преобразователя
ПМ3.8	Недопустимый уровень масла трансформатора
ПМ3.9	Снижение изоляции главной цепи
ПМ3.10	Отсутствует вентиляция двигателя

Рассмотрим наиболее характерные причины неисправностей.

При сигнале «нет готовности преобразователя» могут быть отключены источники силового, оперативного и опорного напряжений, может отсутствовать вентиляция преобразователя, сработать ячейка ДИА, могут быть сгоревшие предохранители. Конкретная причина аварии устанавливается осмотром табло на дверях шкафов и светодиода на ячейке ДИА.

Аварийное отключение сигналов с ячейки ДИА может иметь место при неисправностях преобразователя или регулятора тока. Исправность регуляторов тока проверяется наблюдением прохождения сигналов на осциллографе или с помощью встроенной в систему управления модели двигателя. В преобразователе проверяется форма импульсов управления и смещение их при изменении u_{α} , правильность работы узла реверса, наличие бестоковой паузы, работа датчика нулевого тока, а также исправность силовых тиристоров.

Сигнал "аварийное отключение силового автомата" формируется по логической схеме: выключатель отключен, а управляющий им переключатель находится в положении "включено". Отключение выключателя происходит под действием аварийных сигналов, контролируемых светодиодами. Если ни один светодиод, кроме ПМ1.3, не горит, это означает, что отключение произошло под действием максимального (или теплового) расцепителя выключателя в результате длительной работы с током, превышающим номинальный. При отключении под действием максимального расцепителя без срабатывания ячейки ДИА необходимо проверить исправность ячейки, и если она исправна, то произвести повторно калибровку установок ДИА и максимального расцепителя (например, реле РДШ выключателей типа ВАТ-48).

Превышение максимальной скорости, как правило, происходит при неисправностях в цепи возбуждения, причина неисправности обнаруживается по сигнализации ПМ2.1 и по проверке за прохождением сигналов н регуляторе тока. В некоторых случаях сигнал превышения скорости может появиться при работе с минимальным током возбуждения и неисправности регуляторов скорости или тока, что обнаруживается наблюдением сигналов этих регуляторов.

Аварийный сигнал "перегрузка двигателя" используется только в двухдвигательных электроприводах, у которых в цепи якоря каждого двигателя установлено максимальное реле. Установка срабатывания этих реле выбирается несколько выше половины значения тока отключения выключателя. Поэтому отключение этих реле (или одного из них) без срабатывания ячейки ДИА указывает на неисправность регулятора возбуждения одного двигателя или узла выравнивания нагрузки.

Сигнал "отключен линейный контактор" формируется в случае отключения его при наличии напряжения на якоре двигателя. Такое отключение запрещено логикой управления, так как контактор размещен таким образом, что его отключающая способность ограничена. Обычно отключение контактора происходит из-за разрыва цепей его катушек или промежуточного реле РКЛ или из-за отключения РКЛ вследствие неисправности ячейки усиления УЛ.

Недопустимое уменьшение тока возбуждения может иметь место при неисправности регулятора тока возбуждения, возбудителя ТПВ. при неточной настройке нуль-органа, фиксирующего "обрыв поля". Нуль-орган настраивается таким образом, чтобы при минимальном токе возбуждения, имеющем место при отключении выключателя нагрузки, сигнал "обрыв поля" не формировался. Исправность регулятора тока возбуждения отыскивается при наблюдении за прохождением сигналов. Исправность ТПВ проверяется наблюдением формы и смещения отпирающих импульсов и формы тока и напряжения на нагрузке.

Нуль - орган, фиксирующий превышение допустимого напряжения двигателя, обычно настраивается таким образом, чтобы он не срабатывал при $E=E_{do} \cos \alpha_{min}$, поэтому появление аварийного сигнала обычно указывает на неисправность цепи регулирования возбуждения. О проверке этой цепи уже говорилось.

В зависимости от схемы подключения ячейки защиты ЗСТ появление аварийного сигнала ПМ2.3 может быть вызвано задержкой трогания (стопорением) двигателя больше установленной при наладке (1 20 с) или длительной перегрузкой двигателя током. Появление аварийного сигнала вызывается неправильными действиями операторов, управляющих технологическим агрегатом, или неисправностью ячейки ЗСТ.

Неисправный источник питания определяется по светодиодам, установленным на лицевых панелях источников.

Контроль исправности цепи динамического торможения используется при применении тиристоров при замыкании этой цепи. Аварийный сигнал формируется, если появился ток при отсутствии сигнала динамического торможения. Причиной появления аварийного сигнала могут являться неисправность нуля – органа, фиксирующего протекание тока в цепи и динамического торможения, пробой тиристоров динамического торможения или неисправностью ячейки, формирующей отпирающий импульс.

Появление аварийного сигнала «ток возбуждения двигателя выше допустимого» обычно связано с неисправностью регулятора тока возбуждения или отказом датчика тока возбуждения. Если эти элементы исправны, то необходимо проверить тиристорный возбудитель.

Преобразователи с номинальным током 60 А допускают длительную работу при наличии одного сгоревшего предохранителя в каждом плече вентиляционной части ТП. Во избежание развития аварии неисправный предохранитель необходимо как можно быстрее заменить. При появлении предупреждающего сигнала ПМ 3.6 при первой же остановке электропривода,

например при технологическом прогоне или после окончания смены, необходимо снять силовое напряжение, заменить неисправный тиристорный блок или отдельно предохранитель. Если защищаемый предохранителем тиристор не заменяется, то необходимо проверить его исправность.

При появлении предупреждающего сигнала «отсутствует вентиляция преобразователя» следует иметь в виду, что через 3-5 мин электропривод будет аварийно отключен. Поэтому дежурный персонал должен немедленно сообщить операторам, обслуживающим технологический агрегат, о необходимости остановки его, затем устранить причину аварии. Вначале проверяется фактическое наличие потока воздуха; если он существует, то производится ревизия или замена реле контроля воздуха РСВ. Если вентиляции отсутствует, то необходимо проверить наличие напряжения на двигателе вентилятора, а при имеющемся напряжении заменить вентилятор с двигателем.

При снижении сопротивления изоляции силовой цепи необходимо при остановке технологического агрегата, отключив последовательно участки силовой цепи, с помощью мегаомметра определить участок с поврежденной изоляцией и устранить неисправность.

Многие неисправности электропривода не сопровождаются аварийной или предупреждающей сигнализацией. Наиболее характерные ИЗ НИХ методы их устранения приведены ниже.

Не собирается схема включения автоматического выключателя на стороне постоянного тока при отсутствии аварийной или предупреждающей сигнализации. Так как для сборки схемы необходимо иметь нулевое напряжение ТП и нулевое положение командоаппарата, задающего скорость, то с помощью осциллографа проверяется исходное состояние нуль-органов этих сигналов. При исправной работе этих устройств проверяется состояние внешних блокировок по выходным сигналам ячеек ввода ВЛ. Если на всех выходах присутствуют разрешающие сборки сигналы, то причиной неисправности могут быть отказы микросхем или потери контакта в разъеме.

Необходимо заменить ячейку УР или отыскать неисправную цепь.

При повороте ключа включения линейного контактора он не включается. Вначале необходимо проверить, включаются ли реле КЗ. Если оно включается, то необходимо проверить цепь замыкающего контакта этого реле. Если не включается, но горит светодиод 2 в ячейке усилителей мощности УЛ1, то неисправна цепь катушки реле КЗ. Если этот светодиод не включен, но горит светодиод РКЛ в ячейке УР, то неисправна ячейка УЛ1, которую необходимо заменить. Если же светодиод при повороте ключа не загорается, а выключатель нагрузки включен, то следует проверить наличие логических сигналов «О» на выходах каналов 6 и 7 ячейки ВЛ4, а также наличие таких же сигналов на выходах нуль-индикаторов ячеек ИН. При исправности этих узлов нужно проверить состояние логических входов ячейки УР и при их правильности заменить ячейку УР.

Не растормаживается электромеханический тормоз. Вначале необходимо убедиться в наличии напряжения на выходе блока БГР 1 при включенных реле К1 и К2. Это напряжение должно составлять примерно 340 В. Если это напряжение равно 170-200 В, то схема выпрямления работает как однополупериодная, если это напряжение близко к нулю, то схема не работает полностью. Необходимо убедиться, что контакты реле замкнуты, и заменить субблок управления тормозом.

Если же реле К1 и К2 не включаются и не горят светодиоды 3 и 4 ячейки УЛ2 и светодиод 5 ячейки ИИ6 (а до подачи сигнала на растормаживание последний горел), то неисправна и подлежит замене ячейка УЛ2. Если же светодиод 5 в ячейке ИИ6 горит, то сигнал растормаживания не формируется, и необходимо проверить правильность логических сигналов в ячейке ЯК2.

При установке командоаппарата в нулевое положение во время работы двигатель не останавливается, в преобразователе отсутствует срыв импульсов. Необходимо при отключенном электроприводе установить нули в датчике скорости, в потенциальных разделителях и устройствах задания скорости,

отрегулировать чувствительность нуля-органа AU .

Во время работы электропривода частота вращения электродвигателя не соответствует заданной. Необходимо проверить уровень напряжения задания частоты вращения на входе ячейки регулятора скорости.

Если это напряжение не соответствует заданному, то в зависимости от режима задания частоты вращения необходимо обнаружить и заменить неисправную ячейку. Если напряжение задания частоты вращения соответствует требуемому, то необходимо проверить соответствие напряжения на входе обратной связи частоте вращения электродвигателя. Причиной неисправности могут являться неисправность датчика напряжения тахогенератора или потеря контакта в разъеме. Если же эти узлы исправны, то необходимо проверить прохождение сигналов в ячейках регулирования скорости, тока, ЭДС, тока возбуждения. При отсутствии дефектов в ячейках системы регулирования необходимо проверить преобразователь.

При набросах нагрузки или в процессе разгона электропривод часто отключается с включением светодиода "КЗ " на ячейке ДИА. Причиной этой неисправности может явиться неправильная уставка ограничения задания тока в ячейке регулятора скорости, которая близка или выше уставки защиты по постоянному току в ячейке ДИД. Необходимо скорректировать значения уставок. Кроме того, регулятор тока может быть настроен с большой колебательностью или имеется пропуск в работе тиристорov. В первом случае необходимо скорректировать настройку регуляторов, во втором проверить наличие импульсов управления и исправность тиристорov.

В таблице 14 приведены некоторые характерные неисправности в системе управления преобразователем и в выключателях. Нумерация микросхем и других элементов соответствует указанной на схемах ячеек, которые поставляются заказчику вместе с изготовленным электрооборудованием.

Таблица 14 - Неисправности систем управления и способы их устранения

Внешнее проявление	Причина неисправности	Способ устранения
1	2	3
Неисправности системы управления преобразователем		
Отсутствует управляющий импульс в одном канале на выходе ячейки мультивибратора	Вышла из строя одна из микросхем Д9, Д10, Д11,	Заменить ячейку
Промежуток времени между двумя последующими импульсами управления значительно отличается от 3.3 мс	Вышел из строя операционный усилитель А1 или А2 в ячейке фазосмещения	То же
Нарушена симметрия импульсов в диапазоне регулирования угла управления или в режиме ограничения α_{max}	1. Неодинаковы масштабы прямого и инверсного сигналов управления в ячейке фазосмещения 2. Неисправна ячейка фазосмещения	1. Выровнять масштабы с помощью установленного на ячейке резистора 2. Заменить ячейку
То же в режиме ограничения α_{min}	То же для ячейки фильтров	То же для ячейки фильтров
Отсутствуют управляющие импульсы во всех каналах ячейки мультивибратора	Вышел из строя генератор частоты - усилитель А 1	Заменить ячейку
В одном канале импульс не имеет высокочастотного заполнения	Неисправен или неподпаян диод V3, VS или VI2 в ячейке мультивибратора	1. Проверить исправность диодов 2. Проверить пайку диодов
Отсутствует периодическое напряжение прямоугольной формы на выходах As, Bs, Cs. - As, -Cs ячейки фазосмещения	Неисправны компараторы в ячейке фазосмещения	Заменить ячейку

Отсутствуют импульсы на выходах ячеек усилителей при наличии импульсов на выходе ячейки мультивибратора	Неисправна ячейка усилителей	То же
---	------------------------------	-------

Продолжение таблицы 14

1	2	3
Не переключаются выпрямительные мосты при изменении полярности напряжения реверса и отсутствии сигнала наличия тока	Неправильно отрегулирован узел контроля нулевого тока в ячейке ЯФУ0177 узла реверса	Перестроить чувствительность узла резистором, установленным в этой ячейке
Перегревается выходной транзистор ячейки усилителей импульсов	На силовой блок не поступает напряжение 72 В	Проверить и восстановить правильность монтажа
Значительное снижение напряжений источников питания	1. Сгорел предохранитель 2. Вышел из строя диод выпрямительного моста	1. Заменить предохранитель блока СК 2. Заменить выпрямительную ячейку
Не загораются светодиоды Н1 или Н2 в ячейке ДИА	1. Неисправны светодиоды 2. Неисправна микросхема ДЗ	1. Заменить светодиод 2. Заменить ячейку
При неисправных предохранителях не горит табло "Сгорел 1 Пр"	Неисправно одно из реле Р1.Р2.Р3 в ячейке ЯКП	Заменить ячейку
Не включается какой-то тиристор	1. Параметры импульсов управления не соответствуют номинальным 2. Неисправен тиристор	1. Проверить выход усилителей импульсов и импульсный узел, при их неисправности заменить усилитель импульсов, импульсный узел или силовой блок 2. Заменить тиристор или силовой блок
Неисправности выключателей серии ВАТ-42		
Выключатель или полюс не	1. Обрыв в цепях	1. Восстановить цепь

включается	управления или в катушке 2. Слишком большой натяг отключающей или контактной пружины 3. Слишком большой зазор между контактами выключателя в предвключенном положении или между гайкой и скобой дугогасительного контакта	или заменить катушку. 2. Проверить и отрегулировать натяг 3. Отрегулировать зазоры
------------	---	--

Продолжение таблицы 14

1	2	3
<p>Якорь выключателя не удерживается во включенном положении</p>	<p>1. Постороннее тело в стыке якоря и сердечника</p> <p>2. Слишком большой натяг отключающей или контактной пружины</p> <p>3. Слишком большой зазор между контактами выключателя в предвключенном положении или между гайкой и скобой лугогасительного контакта</p> <p>4. Ухудшение прилегания якоря к сердечнику катушки</p> <p>5. Обрыв удерживающей цепи</p>	<p>1. Проверить поверхность соприкосновения якоря и сердечника</p> <p>2. Отрегулировать натяг</p> <p>3. Отрегулировать зазоры</p> <p>4. Равномерной регулировкой сопротивлений в цепи удерживающей катушки увеличить удерживающий ток, но не более чем до 1,4 А для однополюсных выключателей и 2,8 А для двухполюсных при 220 В. Сделать 20-40 включений и отключений выключателя</p> <p>5. Устранить обрыв</p>

Продолжение таблицы 14

1	2	3
<p>Полнос выключателя остается в предвключенном положении (не сбивается зацепка механизма свободного расцепителя)</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Слишком сильный натяг контактной катушки 2. Слишком большой зазор между контактами в предвключенном положении или между гайкой и скобой дугогасительного контакта 3. Ослаблена пружина, связывающая якорь и защелку механизма свободно расцепления 4. Отсутствует смазка зуба защелки 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Отрегулировать натяг 2. Отрегулировать зазоры 3. Заметить пружину 4. Смазать зуб защелки
<p>Рычаг механизма свободного расцепления срывается с защелки Выключатель не включается</p>	<p>Не отрегулирован механизм свободного расцепления Обрыв цепи катушки ИДП</p>	<p>Отрегулировать механизм Проверить цепь катушки ИДП, устранить короткое замыкание, смснить тиристор. Устранить причину перегорания и сменить плавкую вставку. Устранить обрыв</p>
<p>Сильный нагрев резисторов</p>	<p>Перепутаны концы проводов, подключенных к зажимам батарей конденсаторов</p>	<p>Проверить подсоединение конденсаторов</p>

Окончание таблицы 14

1	2	3
<p>Выключатель включается, но не удерживается во включенном положении</p>	<p>При срабатывании привода ИДП - разрыв цепи контактов РДШ</p> <p>Наводка в проводах, идущих от РДШ к БУ</p>	<p>Проверить контакт и добиться, чтобы падение напряжения на контактах не превышало 10-20 мВ</p> <p>Устранить наводку экранировкой проводов или изменением расположения проводов относительно источника помех</p>
<p>ИДП не срабатывает при размыкании контактов реле РДШ</p>	<p>Обрыв в цепи управления тиристора</p>	<p>Устранить обрыв</p>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе решены поставленные задачи, а именно: произведён выбор электродвигателя главного привода поперечно-строгального станка, произведена проверка выбранного электродвигателя по нагреву и перегрузочной способности, разработан вентильный преобразователь и система управления электроприводом. Применение нового оборудования на станке 7307ГТ позволяет расширить технологические возможности, снизить трудоемкость технологического процесса, упростить управление.

В проекте была рассчитана экономическая эффективность, которая показывает целесообразность применения регулируемого электропривода.

Помимо этого в ВКР были рассмотрены вопросы, посвящённые безопасности жизнедеятельности и охране окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Анхинюк В. Л., Опейко О. Ф. Проектирование систем автоматического управления электроприводами. Москва.: Высшая школа, 1986. – 395 с.
- 2 Гуровец О.Г. Вопросы экономики и организации производства в дипломных проектах. Москва: Высшая школа, 1978. – 200 с.
- 3 Григорьев О.П. и др. Тиристоры. Справочник. – Москва: Радио и связь, 1990. – 400с.
- 4 Диоды: Справочник / О. П. Григорьев, В. Я., Замотин Б. В., Кандратьев, С. Л. Пожидаев. - Москва: Радио и связь, 1990. - 336с.
- 5 Забродин Ю. С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. - Москва: Высшая школа, 1982. - 496с.
- 6 Зимин Е. Н. и др. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями. – Москва: Энергия, 1981. – 397 с.
- 7 Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для ВУЗов. – Москва: Энергия, 1980-360с.
- 8 Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Горобец, Б.И. Мошкович и др.; Под ред. В.М. Перельмутера.- Москва: Энергоатомиздат, 1988. - 319с.
- 9 Лебедева К.Л. Техника безопасности и промышленная санитария на предприятиях. - Москва: Металлургия, 1976. - 115с.
- 10 Лихошерст В.И. «Полупроводниковые преобразователи электрической энергии для электроприводов постоянного тока». - Свердловск: УПИ, 1987. – 150 с.
- 11 Макаленко С.М. Автоматизированный электропривод. - Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 416 с.
- 12 Методические указания по курсу «Теория электропривода»/ И. Я. Браславский, В.П. Метельков. - Свердловск: УПИ, 1990. - 33с.

13 Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами / под. Ред. В.И. Круповича, Ю.Г. Барыбина. 3-е изд. Перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1982. - 416с.

14 Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. Т. 1. - Москва: Энергоатомиздат, 1988. - 456 с.

15 Справочник по автоматизированному электроприводу. /Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского.- Москва: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.

16 Справочник по проектированию электропривода силовых и осветительных установок. /Под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Самовера. изд. 2-е, перераб. и доп. - Москва: Энергия, 1974. -728 с.

17 Справочник по проектированию электропривода и систем управления техноло-гическими процессами /под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. изд. 3-е, перераб. и доп. - Москва: Энергоиздат, 1982. – 400 с.

18 Чебовский О. Г. и др. Силовые полупроводниковые преобразователи: справочник / Чебовский О. Г., Моисеев А. Г. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.

19 Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода. - Москва: Энергоатомиздат, 1981. - 575с.

11 Шрейнер Р.Т. «Системы подчиненного регулирования электроприводов» часть 1. Учебное пособие для ВУЗов. - Екатеринбург: Изд. Урал.гос. проф.-пед. Ун-та, 1997. - 279с.

20 Чиженко И.М. и др. Основы преобразовательной техники: учебное пособие / Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И.М. – Москва: Высшая школа, 1980. – 430 с.