

## Оглавление

Введение.....	3
1 Общая часть.....	5
1.1 Характеристика ООО «ЭТЕРНО», описание технологического процесса закалочного комплекса.....	5
1.2 Характеристика закалочного комплекса .....	9
1.3 Параметры рольганга.....	13
1.4 Определение момента, необходимого для вращения роликов рольганга. ....	15
1.5 Характеристики разрабатываемого автоматического закалочного комплекса и кинематическая схема .....	18
1.6 Требования, предъявляемые к электроприводу рольганга.....	20
1.7 Выбор системы электропривода.....	21
1.8 Расчет и построение нагрузочных диаграмм и тахограммы работы электропривода.....	24
1.9 Выбор основного силового электрооборудования.....	25
1.10 Датчики слежения за материалом .....	27
1.11 Решение подобных задач на других производствах .....	28
1.12 Патентный поиск по теме диплома.....	31
2 Специальная часть .....	34
2.1 Выбор преобразователя частоты .....	34
2.2 Выбор выпрямителя.....	38
2.2.1 Выбор сетевого фильтра .....	41
2.2.2 Выбор сетевого коммутационного дросселя .....	41
2.2.3 Выбор выходного дросселя.....	42
2.2.4 Выбор выходного фильтра.....	42
2.2.5 Защита электропривода, расчет уставок защитных устройств .....	43

2.2.6	Защита, осуществляемая средствами преобразователя .....	44
2.2.7	Защита на стороне питающей сети .....	47
2.2.8	Защита преобразователя автоматическими выключателями	48
2.2.9	Защита помехоподавляющим фильтром .....	49
2.2.10	Защита сетевыми предохранителями.....	49
2.3	Выбор и разработка функциональной схемы САР электропривода .....	50
2.3.1	Принцип построения системы управления электроприводом .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.3.2	Функциональная схема САР	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
2.4	Расчет структурной схемы САР и выбор параметров регуляторов .....	59
2.4.1	Расчет параметров выбранного двигателя .....	59
2.4.2	Составление структурной схемы .....	63
2.4.3	Расчет и анализ переходных процессов .....	73
2.5	Управление оператором .....	74
	Заключение .....	76
	Библиографический список .....	77

## **Введение**

Соединительные детали трубопровода - это необходимые соединительные элементы для трубопровода, которые служат для плавного перехода направления труб в процессе монтажа при помощи сварки однотипных труб.

Соединительные детали трубопроводов расположены в местах разветвлений и поворотов, а также в местах перехода трубы на иной диаметр.

Такие элементы обеспечивают надежность эксплуатации и герметичность труб, а также их долговечность.

Без отводов, тройников, переходов невозможно выполнить ни одну конструкцию технологической системы.

Существуют цеха и даже целые заводы по производству СДТ, и одним из таких цехов является ООО «ЭТЕРНО». Это современный цех, использующий все последние разработки в этой области.

В связи с ростом требований к качеству выпускаемой продукции и необходимостью повышения производительности технологических агрегатов все большее распространение получают регулируемые электропривода различных производительных механизмов. В настоящее время широкое распространение получили автоматизированные электропривода на основе частотного регулирования электроприводов переменного тока с использованием специальных асинхронных двигателей, питающихся от непосредственного преобразователя частоты. Это обусловлено целым рядом их преимуществ:

- экономия электроэнергии в случае переменной нагрузки (то есть работы электродвигателя с неполной нагрузкой);
- точность регулирования;
- эксплуатационная надёжность;
- стабилизация скорости вращения при изменении нагрузки;
- плавный пуск двигателя, что значительно уменьшает его износ.

Их широкое внедрение оказалось возможным в связи с бурным развитием микропроцессорной техники, которое позволило реализовать с высокой точностью систему автоматического регулирования с очень сложным алгоритмом функционирования.

В связи с этим в качестве темы выпускной квалификационной работы была выбрана разработка мехатронной системы транспортировки изделий закалочного комплекса термомеханического участка ООО «ЭТЕРНО».

## **1 Общая часть**

### **1.1 Характеристика ООО «ЭТЕРНО», описание технологического процесса закалочного комплекса**

ООО «ЭТЕРНО» производит соединительные детали трубопроводов. На сегодняшний день ООО «ЭТЕРНО» способно выпускать следующие виды продукции: соединительные отводы, тройники, переходы, днища, переходные кольца, разрезные тройники и тройники с решетками типоразмерами от 530 до 1420 мм в диаметре.

ООО «ЭТЕРНО» состоит из трех производственных участков: участок штамповки, участок сборки и участок отделки. Также на территории цеха находится склад листа и склад готовой продукции.

На складе листа установлена портальная машина термической резки SUPRAREX SXE-P 7000, которая вырезает из листовой заготовки заданные листы для дальнейшей штамповки их в половины отводов, заготовки для тройников или в днища.

На участке штамповки установлены пресс гидравлический двойного действия усилием 7000-2500 тонн и пресс гидравлический двойного действия усилием 4000-1200 тонн, печь с выкатным подом типа LOI WH-40.25.55/20-G3-1100.

Участок сборки оборудован тремя сварочными комплексами CaB 460C и сварочными манипуляторами PEMA APS 35000 S.

На участке отделки установлены три газорезательные машины Kolke AUTO PICLE, машина для калибровки торцев усилием 1500 тонн, машина для калибровки торцев 3000 тонн, индукционная установка для нагрева торцев, три камеры абразивной зачистки, две печи с откидывающейся рабочей камерой тип LOI H-41.26.30/20-G2-1100, две закалочные ванны тип LOI WT-41.26.23/15-H-C-90, две печи с выкатным подом типа LOI WH-30.24.75/25-G4-

1050, дробеметная установка PG42x42-6TR-2P10T, дробеструйная установка АС 10x6.7x6, станок специальный с УЧПУ модель SMS0003, станок специальный с УЧПУ модель SMS0004 [1].

Список операций технологического процесса приведен ниже на примере изготовления соединительных отводов:

- входной контроль;
- транспортирование листа;
- заготовительная часть;
- нагрев под штамповку;
- штамповка половин;
- обрезка технологического припуска по разьему;
- абразивная зачистка кромок;
- сборка половин отводов;
- сварка;
- машинная газокислородная резка торцев;
- зачистка швов;
- калибровка торцев (при необходимости);
- неразрушающий контроль. Визуальный и измерительный контроль качества сварного шва;
- неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль сварного соединения и основного металла торцев;
- неразрушающий контроль. Радиационный контроль;
- исправление дефектов (при необходимости);
- термическая обработка – закалка;
- термическая обработка – высокий отпуск;
- очистка дробеметная/дробеструйная;
- зачистка поверхности (при необходимости);
- неразрушающий контроль. Ультразвуковой контроль сварного шва;
- механическая обработка;
- контроль остаточной магнитной индукции;

- капиллярный контроль торцев;
- окончательная сдача;
- вырезка темплетов для проведения механических испытаний;
- подготовка к гидравлическим испытаниям;
- маркировка;
- защита торцев (при необходимости);
- упаковка;
- транспортирование.

Термообработка – это совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения изделий с целью обеспечения механических свойств основного металла и сварных соединений деталей.

Закалка – вид термообработки соединительных деталей трубопроводов, при котором детали, нагретые выше температуры критической точки АСЗ или АС1 (выше 890°С или 720°С соответственно, для низколегированных сталей), подвергаются ускоренному охлаждению в закалочной среде.

Высокий отпуск – вид термообработки СДТ, при котором детали, прошедшие термообработку по режиму закалки или детали, на которых проводилась операция сварки, подвергаются нагреву и выдержке при температуре от 500°С, но не выше критической точки АС1 для снятия внутренних напряжений и повышения пластических свойств деталей.

Колпаковая печь – термическая печь периодического действия, предназначенная для нагрева деталей перед закалкой.

Закалочная ванна – емкость с горячей или холодной водой, предназначенная для закалки СДТ, оборудованная системой перемешивания и гидравлическим подъемным столом.

Жаропрочный поддон – поддон из жаропрочной стали, предназначенный для установки на него деталей и последующей загрузки его вместе с размещенными на нем деталями в колпаковую печь для последующего нагрева перед закалкой.

Печь с выкатным подом – термическая печь периодического действия, предназначенная для проведения термообработки изделий по режиму высокого отпуска, нормализации, отжига.

Специальный погрузчик – специализированный погрузчик в жаропрочном исполнении, оборудованный четырьмя вилами и предназначенный для выполнения операций по загрузке жаропрочного поддона с изделиями в колпаковую печь для нагрева перед закалкой, выгрузке жаропрочного поддона из колпаковой печи и их загрузке на рабочий стол закалочной ванны, а также снятию жаропрочного поддона с охлажденными изделиями с рабочего стола закалочной ванны [2].

Тема диплома затрагивает изменение технологического процесса изготовления продукции в отдельных операциях. Ниже приведен пример технологического процесса термообработки отводов:

- деталь доставлена на участок термообработки;
- термист с помощью мостового крана либо с помощью водителя погрузчика устанавливает деталь на жаропрочный поддон;
- водитель погрузчика с помощью специального погрузчика устанавливает жаропрочный поддон с изделием в колпаковую печь;
- термист по заданию проводит закалку изделия;
- водитель погрузчика с помощью специального погрузчика достает жаропрочный поддон с изделием из колпаковой печи и устанавливает его на рабочий стол закалочной ванны;
- после того, как жаропрочный поддон с изделием поднялся из закалочной ванны термист с помощью мостового крана либо с помощью водителя погрузчика устанавливает деталь на под печи с выкатным подом для осуществления высокого отпуска;
- термист по заданию проводит высокий отпуск изделия;
- термист с помощью мостового крана либо с помощью водителя погрузчика снимает деталь с пода печи с выкатным подом и передает деталь дальше по технологическому процессу.



После внедрения в производство предложенное изменение технологический процесс будет выглядеть следующим образом:

- деталь доставлена на участок термообработки;
- термист с помощью мостового крана либо с помощью водителя погрузчика устанавливает деталь на жаропрочный поддон, расположенный на рольганге;
- термист из поста управления осуществляет загрузку жаропрочного поддона с изделием в колпаковую печь с помощью перемещающих рольгангов;
- термист по заданию проводит закалку изделия;
- термист из поста управления осуществляет выгрузку жаропрочного поддона с изделием на рабочий стол закалочной ванны с помощью перемещающих рольгангов;
- после того, как жаропрочный поддон с изделием поднялся из закалочной ванны термист с помощью мостового крана либо с помощью водителя погрузчика устанавливает деталь на под печи с выкатным подом для осуществления высокого отпуска;
- дальнейший процесс термообработки остается неизменным.

## **1.2 Характеристика закалочного комплекса**

Колпаковая печь применяется для нагрева перед закалкой деталей трубопроводов в составе закалочного комплекса. Диапазон рабочих температур: 300-1100°C.

Печь спроектирована в соответствии с новейшими требованиями к термическому оборудованию с учетом заданных габаритных размеров.

Детали устанавливаются на жаропрочный поддон, который устанавливается непосредственно на бетонные подовые опоры печи.

Печь имеет откидывающуюся рабочую камеру. За задней стенкой печи установлены опоры с двумя самоустанавливающимися подшипниками. Камера печи соединена с шарнирными опорами за счет специальной металлоконструкции, которая соединена с двумя гидроцилиндрами.

Подъем и опускание рабочей камеры печи осуществляется за счет перемещения штоков гидроцилиндров. Для работы гидроцилиндров печь оборудована гидростанцией с двумя насосами. Печь имеет защиту от самопроизвольного опускания камеры.

Герметичность камеры достигается за счет прижима камеры печи к поду под собственным весом.

Для теплоизоляции пода используется жаропрочный бетон.

Печь оснащена нагревательным оборудованием, рассчитанным на нагрев садки массой 20 тонн из холодного состояния до температуры 1100°C со скоростью 100-500°C в час.

Печь оснащена высокоскоростными рекуперативными горелками производства компании Elster Kromschroeder. Горелки расположены на боковых стенках печи и задней стенки неподвижной части печи. Пламя от горелок располагается между поверхностью пода печи и поверхностью нагреваемого материала, установленного на жаропрочный поддон. Тепло передается от печи к нагреваемому материалу посредством теплового излучения и гарантирует равномерность температуры.

Камера печи делится на две зоны контроля в поперечном направлении. Принцип регулировки – режим включения/выключения. Заданная температура постоянно отслеживается в каждой зоне контроля.

Горелки имеют оптимальные настройки, оборудованы системой автоматического розжига и системой контроля пламени. Воздух для горения подается с помощью радиального вентилятора. Газ и воздух для горения проходят по отдельной трубной обвязке, оборудованной датчиками, необходимыми для безопасной работы горелок.

Около 80% отработанных газов проходят через горелки, предварительно нагревая подающийся для горения воздух, и затем выводятся через вытяжную трубу.

Оставшаяся часть газов выходит через расположенный сзади печи двойной прерыватель тяги. Это необходимо для регулирования давления в пространстве печи.

Рекуперативная система сгорания включает в себя все необходимые для работы печи горелки, клапана, регуляторы, реле давления и манометры. Все компоненты системы рассчитаны на необходимые расходы, диапазон температур и давление.

В передней части печи расположена цепь аварийной защиты, которая автоматически останавливает поступление горючего газа в печь в случае недостаточного количества воздуха для горения или отключения электричества. Печь может быть запущена заново только после устранения неисправности.

Ванна применяется для закалки деталей трубопроводов. Закалочная ванна представляет собой стальную прямоугольную конструкцию с размерами 8,2 x 4,4 x 5,7 метров.

Для обеспечения равномерности температуры закалочной среды и более интенсивного отвода тепла от деталей в процессе закалки вода в ванне постоянно циркулирует. Циркуляция воды осуществляется с помощью шести турбинных мешалок.

Загрузка закаливаемой детали в/из ванны осуществляется с помощью специального грузочного механизма. Механизм состоит из следующих основных компонентов:

- опорная конструкция для подъемной платформы;
- платформа с рабочим столом;
- гидравлический привод и система блоков для вертикального движения.

Детали на специальных поддонах устанавливаются в печь, после достижения требуемой температуры поддон с изделиями перемещается в

закалочную ванну. В момент загрузки-снятия поддона с деталями рабочий стол расположен над уровнем закалочной ванны. Ванна имеет усиленную конструкцию, позволяющую погрузчику вплотную подъехать к рабочему столу.

Для поддержания заданной температуры воды в закалочной ванне, а также переналадки на другой температурный режим, используется система стабилизации температуры, нагрева и охлаждения воды.

По окончании процесса закалки температура воды повышается примерно на 10°C. Перед следующим циклом закалки температуру воды необходимо снизить до требуемого уровня. Для охлаждения воды используется система охлаждения с водоподготовкой.

Система охлаждения воды состоит из следующих компонентов:

- воздушный охладитель с принудительной подачей воздуха;
- теплообменники для этиленгликоля и воды;
- циркуляционные насосы для охлаждения этиленгликоля;
- циркуляционные насосы для охлажденной воды;
- циркуляционные трубы для воды;
- циркуляционные трубы для этиленгликоля;
- дополнительная система водоснабжения с регулировочным клапаном;
- фильтры воды;
- насос для сточных вод;
- трубная связка для сточных вод.

С помощью специального насоса вода перемещается из закалочной ванны в теплообменник через фильтр и затем обратно в закалочную ванну. Контур охлаждения наполнен этиленгликолем, который течет по второму замкнутому контуру и охлаждается посредством конвекции в воздушном охладителе с искусственной тягой.

Уровень воды в ванне поддерживается на постоянном уровне автоматически. Подпиточная вода подается в необработанном состоянии. В целях экономии, вода смягчается частично, в зависимости от доливаемой

воды, при этом концентрация веществ в общем объеме ванны остается на одном уровне.

### 1.3 Параметры рольганга

К основным параметрам, характеризующим размер и тип рольганга, относят: диаметр роликов  $d$ , длина бочки ролика  $l$ , шаг роликов  $t$ , то есть расстояние между осями соседних роликов, общая длина рольганга  $L$  и скорость рольганга.

Диаметр роликов рольганга должен быть возможно меньше, так как в этом случае снижается вес ролика, так и маховый момент, и поэтому уменьшение диаметра ролика ведет снижению не только общего веса рольганга, но и также мощности привода [3].

Таблица 1.1 Диаметр роликов у различных рольгангов

№	Назначение рольганга	Диаметр роликов, мм
1	Рабочие рольганги слябингов, крупных блумингов (1200-1300) и толстолистовых станов	500
2	Рабочие рольганги блумингов 1100-1500	450
3	Рабочие рольганги блумингов (800-1000) и рельсобалочных станов, транспортные рольганги слябингов и крупных блумингов и поводящие рольганги тонколистовых непрерывных станов	400
4	Рольганги среднелистовых станов и транспортные рольганги блумингов и рельсобалочных станов	350
5	Рабочие рольганги среднесортных станов 350-500	300
6	Рольганги сортовых станов 250-350 и транспортные рольганги среднесортных тонколистовых станов	250

Продолжение таблицы 1.1

7	Рольганги холодильников сортовых станов 250-350	200
---	---	-----

Согласно таблице 1.1 [3] выбирается диаметр роликов рольганга 250 мм, так как максимальный транспортируемый вес на рольганге составляет 15 тонн.

Длина бочки роликов у транспортных рольгангов обычно делается

$$l = b + \Delta, \quad (1.1)$$

где  $b$  – ширина передвигаемого по рольгангу поддона с изделиями (в данном случае поддон имеет длину 3800 мм);

$\Delta$  – некоторый зазор, принимаемый 200-250 мм

То есть:

$$l = 3800 + 200 = 4000 \text{ мм.}$$

Шаг роликов рольгангов выбирается исходя из следующих двух условий:

1 Шаг ролика не должен быть больше чем половина минимальной длины поддона, проходящего по рольгангу, то есть согласно этому условию поддон должен находиться одновременно не менее чем на двух роликах;

2 Шаг роликов не должен быть слишком большим, чтобы не происходило прогиба поддона от силы тяжести. Согласно этому условию шаг роликов для транспортного рольганга должен быть 0,5-0,7 метров.

$$n_p = \frac{1}{2} \cdot b \quad (1.2)$$

где  $n_p$  – шаг роликов

$$n_p = \frac{1}{2} \cdot 3800 = 1900 \text{ мм}$$

$$n_p < 1900 \text{ мм}$$

В рольгангах, ввиду того что они большей частью имеют повторно-кратковременный режим работы, следует различать две скорости: номинальную и рабочую.

Скорость, которая соответствует нормальному числу оборотов электродвигателя, приводящего рольганг, называется номинальной скоростью, а скорость, с которой происходит передвижение поддона по рольгангу, - рабочей скоростью.

У транспортных рольгангов скорость выбирается в зависимости от требуемой пропускной способности рольгангов.

#### **1.4 Определение момента, необходимого для вращения роликов рольганга.**

При равномерном движении поддона момент, необходимый для вращения ролика, должен преодолевать только трение цапф ролика в подшипниках. Трением качения поддона по ролику в данном случае следует пренебрегать ввиду его незначительности. Статический момент, необходимый для вращения ролика определится по формуле (1.3):

$$M_{cm} = (Q + G) \cdot \mu_1 \cdot \frac{d_1}{2}, \quad (1.3)$$

где  $Q$  – нагрузка на ролик от веса передвигаемого поддона;

$G$  – вес ролика;

$d_1$  – диаметр цапф;

$\mu_1$  – коэффициент трения в цапфах.

Привод ролика должен быть рассчитан на момент значительно больший. Во время работы рольганга очень часто бывают случаи, когда движение по каким-либо причинам внезапно задерживается, а ролики при этом еще

продолжают вращаться. В этом случае момент привода должен преодолевать не только трение в цапфах, но и трение самого ролика о поддон, то есть:

$$M'_{cm} \leq (Q + G) \cdot \mu_1 \cdot \frac{d_1}{2} + Q \cdot \mu \cdot \frac{d}{2}, \quad (1.4)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между роликом и передвигаемым поддоном;

$d$  – диаметр ролика.

Таким образом, максимальный момент, необходимый для равномерного вращения рольганга, определяются из условия буксирования ролика по транспортируемому поддону.

Ориентировочно коэффициент трения для горячего металла принимается  $\mu \approx 0,3$ , для роликовых подшипников  $\mu_1 = 0,005$ .

Чтобы поддон по рольгангу двигался с ускорением, по направлению его движения должна действовать сила:

$$T = \frac{G_M}{g}, \quad (1.5)$$

где  $G_M$  – вес металла;

$g$  – ускорение свободного падения;

$a$  – ускорение металла.

Сила  $T$ , очевидно, должна быть больше, чем  $G_M$ , то есть:

$$T \leq \frac{G_M \cdot \mu}{g} \text{ или } \frac{G_M \cdot \mu}{g} \cdot a \leq G_M \cdot \mu, \text{ откуда:}$$

$$a \leq \mu \cdot g, \quad (1.6)$$

То есть поддон по рольгангу может двигаться лишь с ускорением, не превышающим коэффициент трения между роликом и поддоном,



умноженным на ускорение свободного падения. При попытке транспортировать поддон с более высоким ускорением, чем  $\mu g$ , между роликом и поддоном будет происходить буксование, и тогда ускорение поддона будет еще меньше, вследствие того, что коэффициент трения при скольжении ниже коэффициента трения покоя. При указанных выше значениях  $\mu$  максимально возможное ускорение металла будет

$$a_{max} = 0.15 \div 0.3g = 1.46 \div 2.92 \text{ м/сек}^2$$

Динамический момент, потребный для вращения ролика, определится по формуле (1.7):

$$M_{дин} = \frac{G \cdot D^2 + Q \cdot d^2}{4 \cdot g} \cdot \frac{2a}{d}, \quad (1.7)$$

где  $G \cdot D^2$ - маховый момент ролика.

Подставляя значение ускорения согласно неравенству (1.6), получим:

$$M_{дин} \leq \left( \frac{G \cdot D^2}{d} + Q \cdot d \right) \cdot \frac{\mu}{2} \quad (1.8)$$

Полный момент, необходимый для вращения ролика рольганга будет

$$M = M_{ст} + M_{дин}$$

Или

$$M \leq (Q + G) \cdot \mu_1 \cdot \frac{d_1}{2} + \left( \frac{G \cdot D^2}{d} + Q \cdot d \right) \cdot \frac{\mu}{2} \quad (1.9)$$

Если к ролику прикладывать больший момент, то ролик будет вращаться со слишком высоким ускорением, и тогда между роликами и поддоном будет происходить буксование.

Технические данные транспортного рольганга указаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические данные транспортного рольганга

Наименование	Величина
Диаметр бочки ролика	250 мм
Длина бочки	4000 мм
Размер поддона	
- длина	3800 мм
- ширина	2500 мм
Вес поддона	15 т
Количество роликов	15
Шаг роликов	1500 мм
Масса ролика	1000 кг

### **1.5 Характеристики разрабатываемого автоматического закалочного комплекса и кинематическая схема**

Для автоматизации процесса закалки деталей трубопроводов в ООО «ЭТЕРНО» предложено использовать вместо специального погрузчика автоматизированный комплекс, состоящий из шагающих балок с эксцентриковыми дисками, создающими круговое движение балок, поворотным столом с боковыми линейками перед транспортным рольгангом, обеспечивающий перемещение жаропрочного поддона и бесприводными роликами, установленными на рабочем столе закалочной ванны. Передача поддона с изделиями с рабочего стола закалочной ванны на транспортный рольганг осуществляется с помощью гидравлического толкателя. В зависимости от технологического процесса, направление движения роликов рольганга можно изменять.

На рисунке 1.1 показана кинематическая схема поворотного стола.

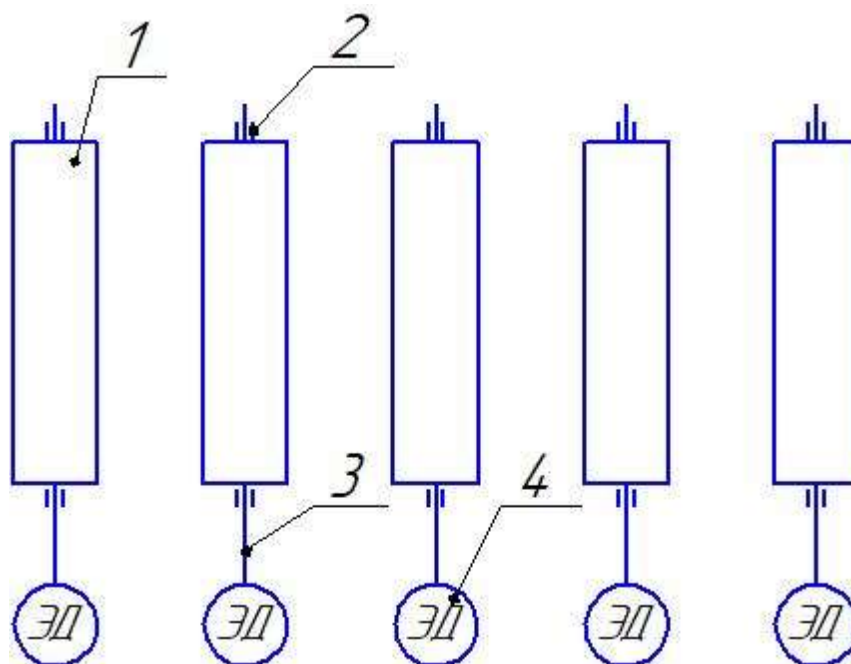


Рисунок 1.1 Кинематическая схема привода поворотного стола

1 – ролик; 2 – подшипник; 3 – вал; 4 – электродвигатель.

На рисунке 1.2 показана кинематическая схема одной части транспортного рольганга.

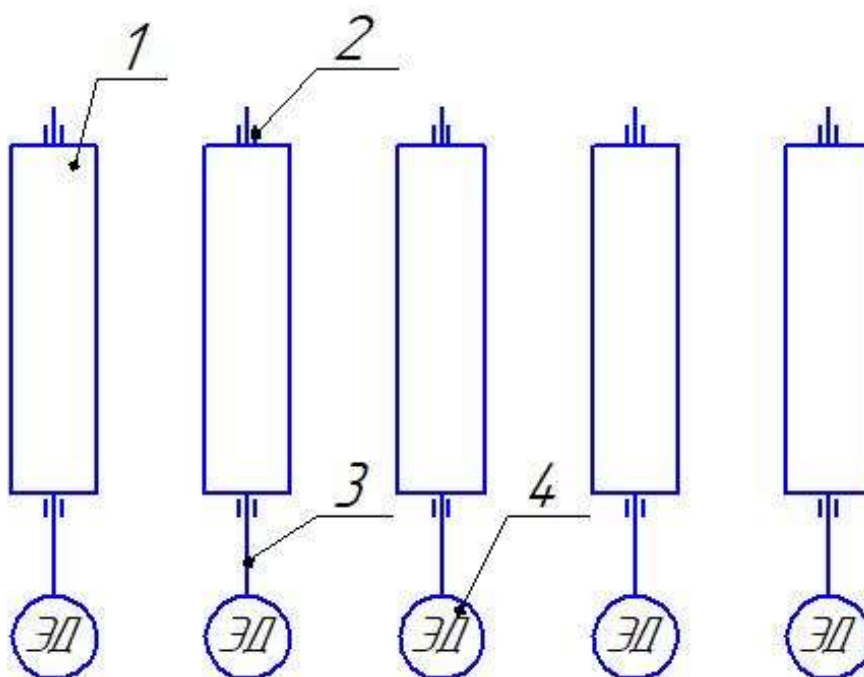


Рисунок 1.2 Кинематическая схема привода одной части транспортного рольганга

1 – ролик; 2 – подшипник; 3 – вал; 4 – электродвигатель.

На рисунке 1.3 показана кинематическая схема шагающих балок.

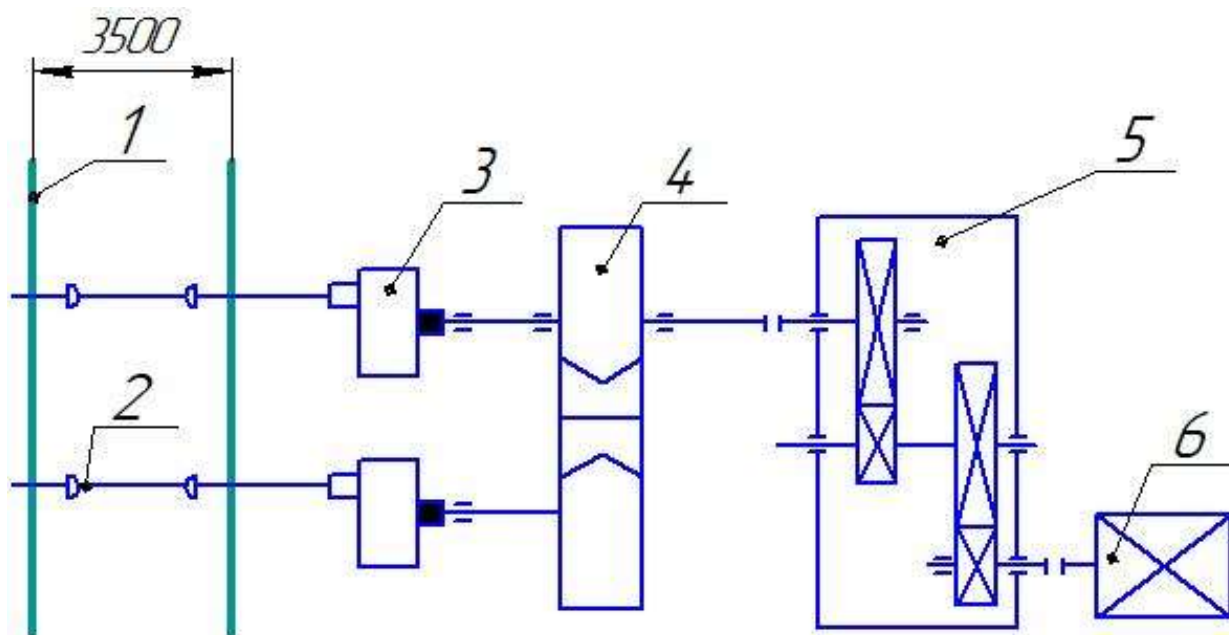


Рисунок 1.3 Кинематическая схема привода шагающих балок

1 – балки; 2 – шпиндели; 3 – эксцентровые диски; 4 – шестеренная клеть; 5 – главный редуктор; 6 – электродвигатель.

Привод рольганговых роликов осуществляется индивидуально от двигателей трехфазного тока через шарнирный вал. Двигатели жестко закреплены болтами на основании, прикрепленном к фундаменту. Что касается привода, весь рольганг разделен на 4 группы. Группа 1 состоит из 5 роликов и представляет из себя поворотный стол. Группа 2, 3 и 4 – состоят из 5 роликов каждая и служат для транспортировки поддона с изделиями с печи на рабочий стол ванны и обратно.

### 1.6 Требования, предъявляемые к электроприводу рольганга

1. Циклический режим работы с высокими темпами разгона, торможения, реверсирования, задаваемый технологом или оператором;
2. Диапазон регулирования скорости до 10:1;
3. Необходимость режимов токоограничения и эффективной защиты от

- перегрузок;
4. Необходимость эффективных тормозных режимов, в том числе электродинамического торможения для точной остановки;
  5. Схемой управления должна обеспечиваться аварийная и экстренная остановка с сохранением параметров;
  6. Привод должен обладать максимальным быстродействием по управляющему воздействию, что необходимо для успешной работы систем автоматического регулирования скорости;
  7. Обеспечивать защиту силового электрооборудования;
  8. Технологический момент должен составлять не более 60 секунд.

### 1.7 Выбор системы электропривода

Для приводов переменного тока с подчиненным регулированием координат принимается пусковой момент, определяемый по формуле (1.10):

$$M_{\text{п}} = J_{\text{по}} \cdot \frac{d \cdot \omega}{dt} + M_{\text{с}}, \quad (1.10)$$

где  $J_{\text{по}}$  - суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции, Н\*м<sup>2</sup>;

$M_{\text{с}}$  - момент статического сопротивления транспортируемого слитка, Н;

$\frac{d \cdot \omega}{dt}$  - требуемое ускорение технологией прокатки, м/с<sup>2</sup>.

Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции определяется по формуле (1.11):

$$J_{\text{по}} = J_{\text{р}} + J_{\text{дв}}, \quad (1.11)$$

где  $J_{\text{дв}}$  - момент инерции двигателя, Н\*м<sup>2</sup>;

$J_{\text{р}}$  - момент инерции ролика, Н\*м<sup>2</sup>.

Момент инерции ролика определяем по формуле (1.12):

$$J_p = \gamma \cdot \frac{\pi}{32} \cdot l \cdot D^4, \quad (1.12)$$

где  $\gamma$  - плотность стали, кг/м<sup>3</sup> ( $\gamma = 7800$  кг/м<sup>3</sup>);

$l$  - длина бочки ролика, м;

$D$  - диаметр бочки ролика, м.

$$J_p = 7800 \cdot \frac{3,14}{32} \cdot 4 \cdot 0,25^4 = 11,96 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$$

$$J_{p0} = 11,2 + 11,96 = 23,16 \text{ Н}\cdot\text{м}^2$$

$$M_{II} = 23,16 \cdot 0,5 = 11,58 \text{ Н}\cdot\text{м} = 23,16 \cdot 0,5 = 11,58 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Из формулы (4) определится статический момент:

$$M_{cm} = (15000 \cdot 9,8 + 6126 \cdot 9,8) \cdot 0,005 \cdot \frac{0,08}{2} + 15000 \cdot 9,8 \cdot 0,3 \cdot \frac{0,25}{2} =$$
$$41,40 + 5512,5 = 5553,9 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Приблизительная величина номинальной мощности приводного двигателя рольганга рассчитывается по формуле (1.13):

$$P_n \geq (1,3 \div 2,0) \cdot M_c \cdot \omega_p, \quad (1.13)$$

где  $1,3 \div 2,0$  - коэффициент, учитывающий динамическую нагрузку привода;

$\omega_p$  - скорость двигателя, которая обеспечивает максимальную скорость транспортировки.

Приблизительная угловая скорость двигателя при транспортировке:

$$\omega_p = \frac{V}{r}, \quad (1.14)$$

где  $V$  - максимальная линейная скорость, определяемая технологией, м/с;

$r$  - радиус ролика, м.

$$\omega_p = \frac{1,2}{0,25} = 4,8 \text{ p/c}$$

Таким образом:

$$P_H \geq (1,3 \div 2,0) \cdot 5553,9 \cdot 4,8 = 34656,336 \text{ Вт}$$

Для выбора двигателя кроме мощности двигателя необходимо руководствоваться следующими данными:

- 1) Тип исполнения - в виду загрязнённости и запылённости двигатель выбирается защищенного исполнения с принудительной вентиляцией;
- 2) Режим исполнения - длительный;
- 3) Номинальное напряжение - согласно техническим условиям питание двигателя осуществляется от сети 10 кВ и преобразователя частоты [4].

Для привода механизма транспортного рольганга выбирается электродвигатель переменного тока фирмы VEM типа KV0R 225 M4. Технические данные двигателей приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические данные двигателей

Наименование	Величина
Количество	20
Синхронная скорость, об/мин	1500
Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>	0,5250
Номинальный момент, Н·м	6784
Мощность, кВт	45
Номинальный ток, А	47
Номинальное напряжение, В	3·400 Y
$\lambda = \frac{M_k}{M_f}$	2,3
cosφ при M <sub>эф</sub>	0,86
η при M <sub>эф</sub>	93,3
Масса двигателя, кг	360

Данные двигатели имеют степень защиты класса IP55, температурный класс F (400С). Охлаждение осуществляется тремя вентиляторами типа «наездник» со следующими данными: 380 В; 50 Гц; 0,69 кВт; 1,4 А. Режим работы – S1 (продолжительный). Работа двигателя выполняется с постоянной нагрузкой достаточно продолжительное время для достижения установившегося режима.

### **1.8 Расчет и построение нагрузочных диаграмм и тахограммы работы электропривода**

По технологии закалки разрешается транспортировать закаливаемое изделие от закалочной печи до рабочего стола закалочной ванны не более 60 секунд. Отсюда следует, что время на прохождение одной секции рольганга, состоящей из 5 роликов, допустимо время равно  $t_1=7$  с. На разворот жаропрочного поддона с изделиями на поворотном столе отводится 15 секунд  $t_{пов}=15$  с. На доставание поддона с помощью шагающих балок из закалочной печи с дальнейшей установкой его на ролики рольганга доступно 15 секунд  $t_6=15$  с. Таким образом, на весь цикл отводится:

$$t = t_1 \cdot 4 + t_6 \quad (1.15)$$

$$t = 7 \cdot 4 + 15 + 15 = 58 \text{ с}$$

В момент времени  $t_6$  двигатель разгоняется с пусковым моментом 5553,9 Н·м до скорости  $\omega_p = 1,2$  1/с. Момент статический равен  $M_c=5512,5$  Н·м. В момент времени  $t_{пов}$  поддон разворачивается на месте, его скорость равна 0. В момент времени  $t_1$  поддон движется прямолинейно со скоростью  $\omega_p = 1,2$  1/с под действием момента  $M_c=5512,5$  Н·м. Поддон движется под действием инерции по рабочему столу закалочной ванны до упора. На рисунке 1.4 показана нагрузочная диаграмма и тахограмма электропривода рольганга.



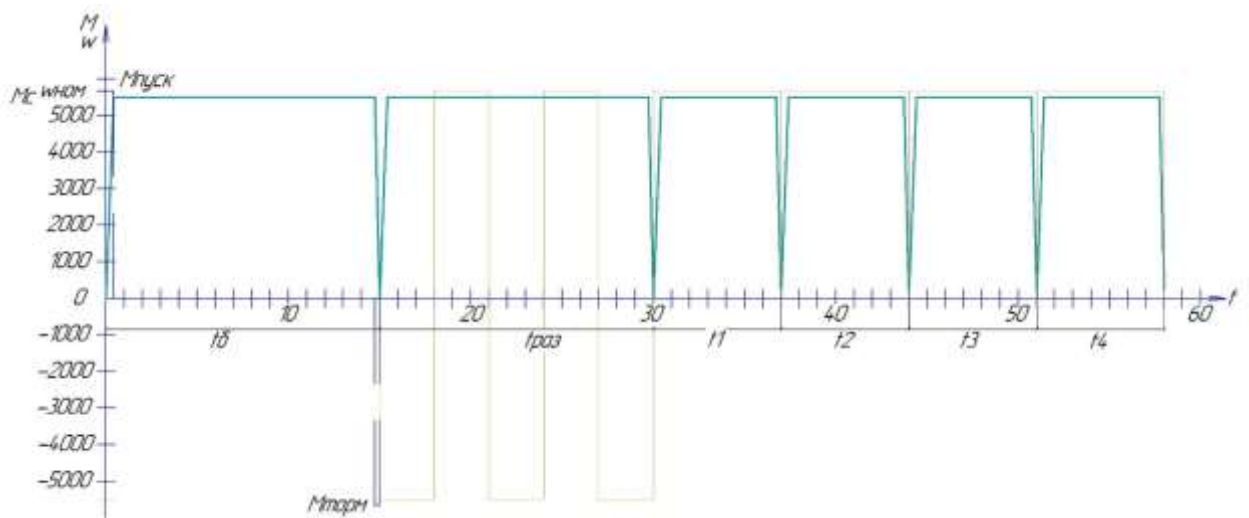


Рисунок 1.4 Нагрузочная диаграмма и тахограмма электропривода рольганга.

где  $t_0$  – время передачи шагающими балками,  $t_{раз}$  – время разворота на поворотном столе,  $t_1$  – время через I Группу,  $t_2$  – время через II Группу,  $t_3$  – время через III Группу,  $t_4$  – время через IV Группу.

### 1.9 Выбор основного силового электрооборудования

В настоящее время получают всё большее распространение асинхронные электропривода переменного тока, они повсеместно вытесняют электропривод постоянного тока, благодаря своей надежности, относительно невысокой стоимости, хорошим эксплуатационным качествам, простоте обслуживания. Массовое применение регулируемых электроприводов переменного тока стало возможным при создании новых средств электропривода и, в первую очередь, тиристорных и транзисторных преобразователей частоты. В настоящее время во всём мире широко реализуется этот способ управления асинхронной машиной, которая сегодня рассматривается не только с точки зрения экономии энергии, но и с точки зрения совершенствования управления технологическим процессом.

Современные системы частотно-регулируемого электропривода характеризуются применением преобразователей частоты, выполненных на

транзисторных IGBT модулях, рассчитанных на токи до нескольких килоампер, напряжением до нескольких киловольт и имеющих частоту коммутации 30 кГц и выше, а также применением в структуре управления средств микропроцессорной техники. Современный уровень силовой полупроводниковой техники и микропроцессорных средств управления позволяет строить системы регулируемого асинхронного электропривода, не уступающего по своим качествам и статическим характеристикам электроприводам постоянного тока, а по своим экономическим и эксплуатационным качествам во многом превосходящих их.

Для работы электропривода рольганга применяются асинхронных двигателя с преобразователями частоты, что соответствует самым высоким требованиям надежности и готовности, а также минимуму технического обслуживания.

Применяемый преобразователь с блоком выпрямления преобразует трехфазную сеть на входе в сеть постоянного напряжения и питает этим напряжением инвертор. Блок выпрямления состоит в силовой части из 6-ти пульсного выпрямительного моста с блоком предварительной зарядки конденсаторов, обеспечивающего передачу энергии от питающей сети к сети постоянного тока. Этот блок может обеспечивать работу только в двигательном режиме. Инвертор основан на трёхфазной мостовой схеме, в плечах которой находятся биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT.

Векторное управление с управлением частотой, скоростью и моментом (управление с ориентацией по полю) обеспечивает динамические характеристики, сравнимые с двигателем постоянного тока. Это достигается с помощью отдельного управления активными и реактивными составляющими тока двигателя с частотой ШИМ 2,5кГц.

Такой нереверсивный преобразователь подходит для связи нескольких инверторов на общей шине постоянного тока. Это обеспечивает обмен энергией между двигательными и генераторными приводами и осуществляет

экономии энергии. При этом сумма номинальных токов установленных инверторов может превысить номинальный ток нереверсивного преобразователя.

### **1.10 Датчики слежения за материалом**

На каждой из трех групп транспортных роликов и поворотном столе установлены датчики слежения за поступаемым поддоном с изделиями.

Датчик 1 установлен на поворотном столе и оповещает систему о наличии или отсутствии на роликах поддона. В случае наличия информации о наличии поддона, ролики начинают движение на разворот поддона, когда сработает датчик 2 наличия развернутого поддона, происходит запуск в движение I Группы транспортных роликов. Затем поддон, двигаясь по направлению движения к ванне, перекрывает датчик слежения 3, расположенный в начале первой группы роликов, запускает в движение II Группу транспортных роликов. При срабатывании датчика 4, расположенного в конце I Группы, происходит остановка движения Поворотного стола. Когда сработает датчик 5, запустится III Группа. При срабатывании датчика 6 отключится движение I Группы. И так далее до последней группы.

В режиме, когда поддона нужно доставить из закалочной ванны в одну из групп роликов для разгрузки или транспортировать в закалочную печь, происходит следующее: толкатель, расположенный около ванны, выталкивает поддон с изделиями на IV Группу транспортных роликов, при этом срабатывает датчик 10, запуская в движение IV и III Группы роликов. Поддон, проходя через датчик 9, перекрывает его, тем самым запуская в работу II Группу роликов. При срабатывании датчика 8 отключается IV Группа роликов.

На рисунке 1.5 представлены схема расположения датчиков слежения за положением поддона на рольганге.

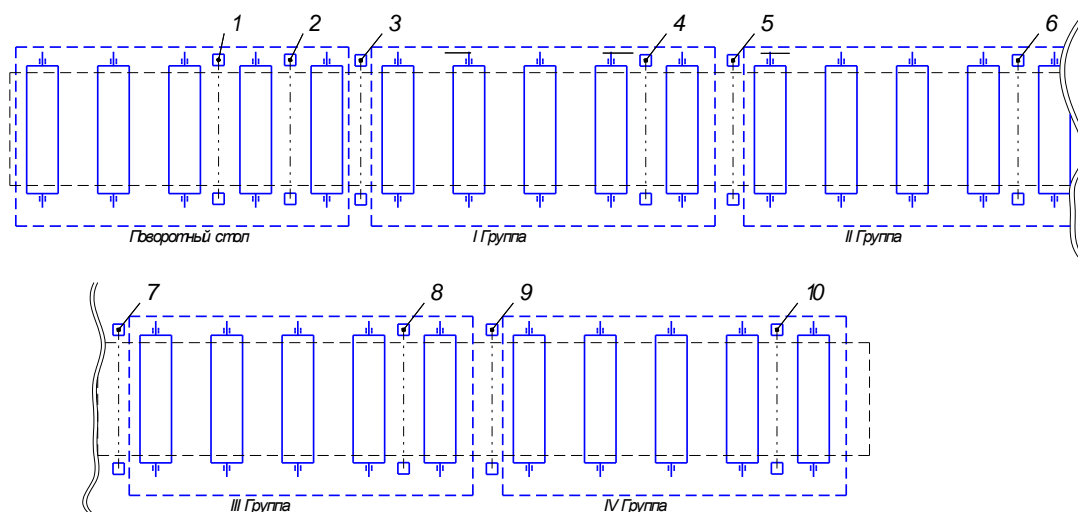


Рисунок 1.5 Схема расположения датчиков слежения за положением поддона на рольганге.

Исходя из требований повышенной температуры был выбран датчик IRIS 111-09. Данный фотодатчик является самым последним достижением в новом поколении диодов и имеет большую чувствительность и скорость передачи информации. Фотодатчик обладает такой чувствительностью, что может реагировать на наличие или отсутствие света, в оптоволоконной системе, в течении несколько микросекунд.

IRIS легко конфигурируется для удовлетворения требований в конкретных условиях применения. Переключатели DIP обеспечивают регулировку для усиления работы датчика и порога чувствительности.

Выходы IRIS «ON» или «OFF» предназначены для передачи сигналов соответственно наличие или отсутствия света. При помощи переключателя DIP можно создать некую задержку времени выключения сигнала, при этом давая возможность датчику игнорировать холодные пятна, пятна от накипи и т.д.

### 1.11 Решение подобных задач на других производствах

Автоматизированные закалочные комплексы имеют очень много преимуществ и являются уникальным оборудованием для закалки металлов. Закалка позволяет укреплять поверхность изделия и повышать сроки его эксплуатации. После закалки изделие становится более устойчивым ко всем внешним воздействиям, в том числе и к появлению коррозии металла.

Основная функция закалочного комплекса – точная и равномерная закалка металлических изделий. Закалке подвергаются детали, которые впоследствии будут нести большую ответственность за работу механизма и должны иметь высокий уровень эксплуатации. После закалки металл становится крепче и устойчивее ко всем механическим повреждениям. Металл, прошедший процесс закалки, не восприимчив к коррозионному покрытию.

Автоматизированный закалочный комплекс контролирует процесс закалки при помощи программного обеспечения, поэтому закалка получается равномерной и на необходимый уровень глубины. С помощью технических масел никогда не удастся получить такой точный уровень закалки.

Применяется автоматизированный закалочный комплекс на предприятиях, создающих детали из стали и различные изделия, например, шестерни, валы, зубчатые колеса, бурильные трубы и т.п.

На предприятии, занимающимся изготовлением валов для рольгангов используется подобный автоматизированный закалочный комплекс для термообработки изделий разных форм и размеров. Данный комплекс включает в себя такие элементы системы, как:

- Специальная оснастка, в которой закрепляется изделие. При помощи специального привода оснастка вращает прикрепленную деталь.

- Закалочный станок, который может быть выполнен в вертикальном или горизонтальном виде. Горизонтальный закалочный станок применяется для закалки изделий более 3000 мм в длину.

- Установка нагрева ТВЧ.

- Станция охлаждения, позволяющая охлаждать оборудование при помощи дистиллированной воды.

- Пульт управления, с помощью которого можно в точности запрограммировать станок на нужные параметры закалки.

В России и за рубежом используются автоматизированные закалочный комплексы для обработки тонколистовой брони, различных деталей, в том числе деталей вращения, различных валов, шестерней, колес, тормозных шкивов кранов, различных цилиндрических деталей.

Комплексно-механизированный участок термической обработки разнообразных деталей в различных режимах, с нагревом в камерных печах и полной механизацией транспортных операций.

На участке автоматизированы процессы загрузки и разгрузки технологического оборудования, управления температурным режимом печей, процессы мойки и очистки моечного раствора. Управление агрегатами линии в автоматическом режиме проводится дистанционно. Предусмотрен наладочный режим работы.

Данная технология включает в себя:

- нагрев в камерных печах;
- охлаждение в фиксированном положении с использованием специальных закалочных штампов или устройств;
- загрузочные машины садового типа различной грузоподъемности для обслуживания камерных печей.

- садовая машина в составе комплексного механизированного участка термообработки.

Также, вместо использования печей, работающий на природном газе или вместо трудоемкой и пожароопасной технологии химико-термической обработки используют технологию индукционной закалки, которая:

- по сравнению с серийной технологией обеспечивается получение более дисперсной микроструктуры металла и соответственно - более высоких значений служебных свойств обрабатываемых деталей;

- исключается использование цементационных шахтных печей и изготовление дорогостоящих приспособлений, имеющих малый ресурс использования;

- высвобождается закалочная печь;

- исключается использование охлаждающей среды - закалочного масла.

В технологии индукционной закалки охлаждающей средой является вода из системы оборотного водоснабжения;

- повышается производительность в 2 раза по сравнению с цементацией.

Автоматизированная линия малодеформационной закалки в штампе при нагреве ТВЧ, с одновременным контролем качества термообработки, разбраковки деталей и укладки годных деталей в контейнер предусматривает:

- поштучная выдача деталей из магазина;

- перемещение их через индуктор нагрева, обеспечивающий нагрев до температуры 980°C;

- термостабилизация в трубчатой печи;

- спрейерная закалка в фиксирующем устройстве (штампе) с одновременным приложением пульсирующей нагрузки.

### **1.12 Патентный поиск по теме диплома**

Задачи патентных исследований: определение технического уровня разрабатываемых в России мехатронных систем транспортирования изделий посредством рольгангов в закалочных комплексах типа закалочная печь-закалочная ванна, обоснование целесообразности использования данного вида автоматизации, прогнозирование дальнейшего развития и использования мехатронных систем в цеху ООО «ЭТЕРНО».

Цель поиска информации:

- определение достигнутого технического уровня в России;

- обоснование целесообразности использования автоматизации;

- формирование групп патентов-аналогов для дальнейшей оценки перспективности использования данного вида автоматизации.

Обоснование регламента поиска: в соответствии с поставленной задачей в рамках диплома. Поиск проводился по патентной литературе в объеме патентных фондов развитых стран, по ведущим базам данных патентной информации, а также в научно-технической литературе, включая отечественные и зарубежные научные журналы, обзоры и монографии. Глубина поиска – 50 лет [5].

В таблице 1.4 представлены результаты патентного поиска.

Таблица 1.4 – Результаты патентного поиска

Предмет поиска	С тр а п а о и с-ка	Источники информации, по которым будет производиться поиск								Ре тр о с- пе кт и в- н о с т ь	Наименование информационной базы	
		Патентные		НТИ		Конъюнкту рные		Другие				
		Наим енова ние	Класси фикац о нные индексы	Наимено вание	Руб рик а УД К и дру гие	Наим енова ние	К о д ва ра	Наим енова ние	Класси фикац ионные индексы			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Закалочные комплексы	RU	Патенты	E01B11/46	Рельсовый и термообработывающий комплекс  Станок для автоматизированной	УДК 004.057.							<a href="http://www.freepatent.ru/">http://www.freepatent.ru/</a>  <a href="http://www.freepatent.ru/">http://www.freepatent.ru/</a>





такой операции как загрузка и разгрузка закалочной печи специальным погрузчиком и сама скорость загрузки и разгрузки закалочной печи.

За счет автоматических действий мехатронного комплекса скорость разгрузки закалочной печи, транспортировка поддона с изделиями до рабочего стола закалочной ванны всегда остается неизменной, заданной условиями технологического процесса закалки изделий. Также, практически исключаются возможные неправильные действия со стороны оператора-термиста. Это все вкуче даст повышение показателей качества термообработки выпускаемой продукции.

В цеху ООО «ЭТЕРНО» на участке ТМУ имеется два закалочных комплекса. Из вышеперечисленных достоинств внедрения мехатронного комплекса следует, что подобную или точно такую же технологию возможно будет использовать и на втором закалочном комплексе. Также не исключена возможность использования наработок по данной теме и на других участках цеха, например, на участке штамповки.

## **2 Специальная часть**

### **2.1 Выбор преобразователя частоты**

Индуктивное сопротивление асинхронного двигателя определяется по формуле (2.1):

$$X_K^* = \frac{x_K \cdot I_H}{U_H}, \quad (2.1)$$

где  $x_K = x_1 + x_2$  - индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания, Ом

$$x_K = 0,124 + 0,092 = 0,21 \text{ Ом}$$

$$X_K^* = \frac{0,216 \cdot 47}{400} = 0,02538 \text{ Ом}$$

Относительное действующее значение полного тока при номинальной нагрузке определяется по формуле (2.2):

$$I^* = \sqrt{1 + \left(\frac{0,046}{X_K^*}\right)^2} \quad (2.2)$$

$$I^* = \sqrt{1 + \left(\frac{0,046}{0,02538}\right)^2} = 2,07 \text{ А}$$

Номинальная длительно-допустимая мощность инвертора (2.3):

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_H \cdot I_H \cdot I^* \quad (2.3)$$

$$S_H = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot 47 \cdot 2,07 = 67,405 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

Выбираем преобразователя частоты (инвертора), исходя из следующих данных (2.4), (2.5), (2.6), (2.7), (2.8):

$$S_{H.пч} \geq \kappa_3 \cdot S_H, \quad (2.4)$$

где  $\kappa_3 = 1,2$  – коэффициент запаса мощности.

$$S_{H.пч} \geq 1,2 \cdot 67,405 = 80,886 \text{ кВ} \cdot \text{А}$$

$$I_{H.пч} \geq I_{H.об} \quad (2.5)$$

$$I_{max.па} \geq I_{max.да} \quad (2.6)$$

$$f_{min} < f_H < f_{max} \quad (2.7)$$

$$I_{max.да} = k_{п} \cdot I_{н.дв}, \quad (2.8)$$

где  $k_{п}$  - кратность пускового тока.

$$I_{max.да} = 2,5 \cdot 47 = 117,5 \text{ А}$$

Учитывая перегрузочную способность преобразователя, номинальный ток ПЧ может быть принят (2.9):

$$I_{н.пч} \geq \frac{I_{max.да}}{\lambda_{пч}}, \quad (2.9)$$

где  $\lambda_{пч}$  - перегрузочная способность преобразователя частоты.

$$I_{н.пч} \geq \frac{117,5}{1,4} = 83,92 \text{ А}$$

В соответствии с заданными условиями выбирается преобразователь частоты Micromaster 430 6SE6430-2AD34-5EA0 со следующими техническими данными, указанными в таблице 2.1:

Таблица 2.1 - Техническая характеристика преобразователя частоты Micromaster 430 6SE6430-2AD34-5EA0

Параметр	Ед. изм.	Значение
Номинальная мощность, Sn	кВт	45
Номинальный ток, In	А	111
Максимальный ток, Imax	А	164,5
Номинальное напряжение питающей сети, Uс	В	380
Номинальная частота питающей сети, fс	Гц	50
Число фаз на входе и выходе, m	-	3
Диапазон изменения выходной частоты, fmin...fmax	Гц	1...50
КПД в номинальном режиме, η	-	0,97
Коэффициент мощности, cosφ	-	0,94

Преобразователь MICROMASTER 430 может использоваться для решения многочисленных задач, требующих применения приводов с изменяемыми скоростями вращения. Его гибкость обеспечивает широкий спектр применений.

Более всего он подходит для использования с приводами рольгангов, насосов и вентиляторов. Преобразователь MICROMASTER 430 отличается высокой производительностью и комфортабельным использованием.

В преобразователе увеличено количество цифровых и аналоговых входов/выходов, по сравнению с MICROMASTER 420. Так же к преобразователю поставляется (опционально) базовая панель оператора BOP-2 с функцией выбора режимов ручной/автоматический.

MICROMASTER 430 имеет модульную конструкцию. Пульт управления и коммуникационные модули могут быть заменены без применения какого-либо инструмента.

Для осуществления обмена реактивной энергией между двигателем и звеном постоянного тока на входе АИН имеется конденсатор  $C_0$ , а также обратные диоды  $VD$ , включенные параллельно силовым транзисторам. Через эти диоды протекает ток в момент возврата реактивной энергии от двигателя в емкость  $C_0$ .

Фильтр  $L0C0$  обеспечивает сглаживание пульсаций напряжения с выхода выпрямителя.

Питание преобразователя осуществляется от сети переменного тока напряжением 380В.

Силовая схема представлена на рисунке 2.1:

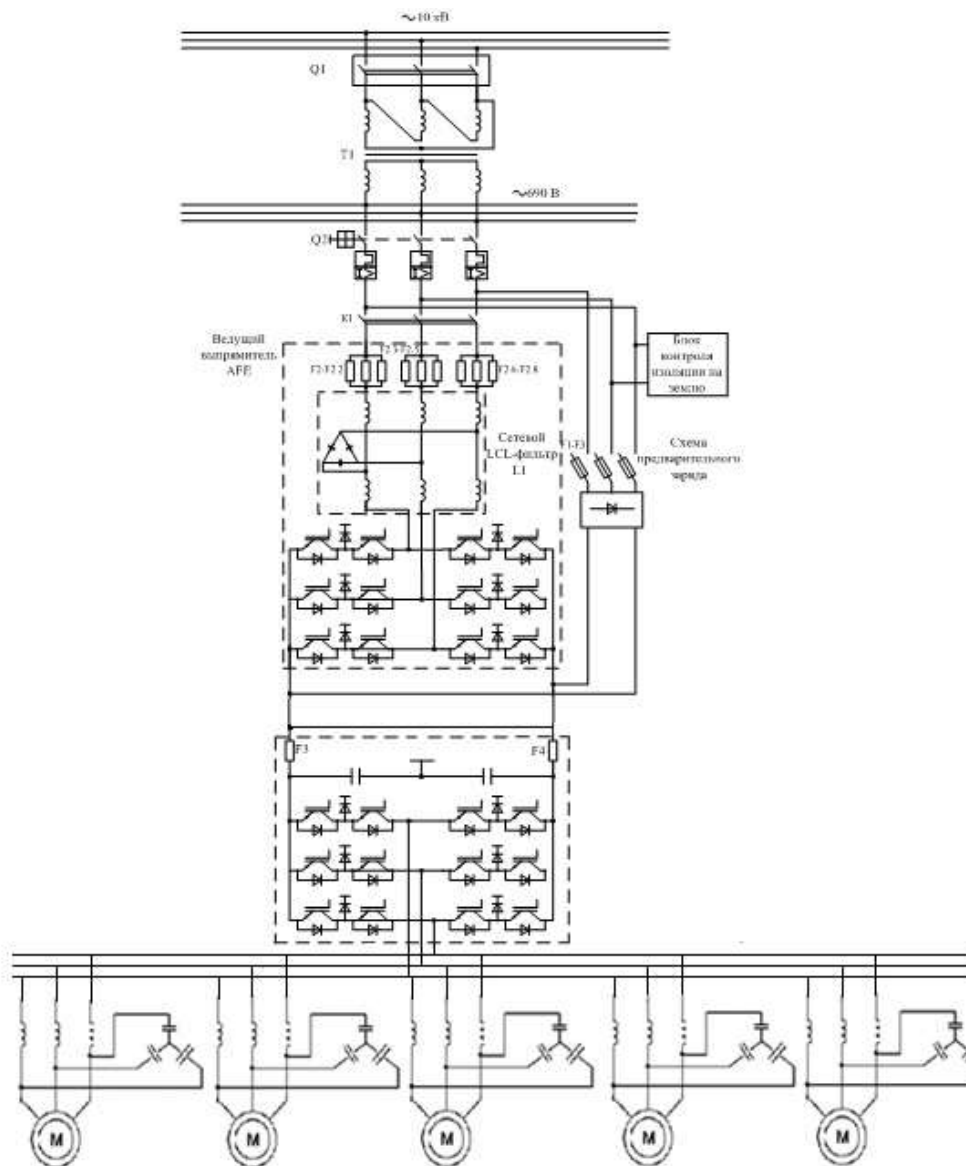


Рисунок 2.1 Силовая схема разработанного механизма

## 2.2 Выбор выпрямителя

Для выбора выпрямителя необходимо задаться следующими условиями:

1) мощность выпрямителя должна быть такой, чтобы обеспечить бесперебойную работу инверторов.

2) выбирается выпрямитель из серии шестипульсных выпрямителей, силовой мост которого собран на тиристорах, с блоком предварительной зарядки конденсаторов.

Требуемое напряжение в сети постоянного тока (2.10):

$$U_{и.н} = U_{dн} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{ф.н} \cdot \pi}{2} \quad (2.10)$$

$$U_{dн} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380 \cdot \pi}{2} = 168.8 \text{ В}$$

Средний ток, потребляемый инвертором (2.11):

$$I_{и.ср} = \frac{3}{\pi} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (2.11)$$

где  $I_1$  - модуль первой гармоники тока нагрузки, А

$$I_1 = I_{н.ф} \cdot \sqrt{2} \quad (2.12)$$

$$I_1 = 111 \cdot \sqrt{2} = 156,9 \text{ А}$$

$$I_{и.ср} = \frac{3}{\pi} \cdot 156,9 \cdot 0,83 = 124,35 \text{ А}$$

Средний ток через АИН (2.13):

$$I_{т.ср} = \frac{I_1}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + \cos \varphi_1), \quad (2.13)$$

$$I_{т.ср} = \frac{124,5}{2 \cdot \pi} \cdot (1 + 0,83) = 36,26 \text{ А}$$

Средний ток через обратный диод (2.14):

$$I_{D.ср} = \frac{I_1}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - \cos \varphi_1) \quad (2.14)$$

$$I_{D.ср} = \frac{124,5}{2 \cdot \pi} \cdot (1 - 0,83) = 3,37 \text{ А}$$

Активная мощность на выходе инвертора (2.15):

$$P_{и.н} = S_H \cdot \cos \varphi_H \quad (2.15)$$

$$P_{и.н} = 45 \cdot 0,83 = 37,35 \text{ кВт}$$

Активная мощность на входе инвертора (2.16):

$$P_{\text{и.вх}} = P_d = \frac{P_{\text{и.н}}}{\eta_{\text{н}}} \quad (2.16)$$

$$P_{\text{и.вх}} = P_d = \frac{37.35}{0.97} = 38,505 \text{ кВт}$$

Выпрямленный ток в цепи постоянного тока (2.17):

$$I_d = \frac{P_d}{U_{d.\text{н}}} \quad (2.17)$$

$$I_d = \frac{37350}{168,8} = 221,3 \text{ А}$$

Максимальное выпрямленное напряжения выпрямителя (при  $\alpha=0$ ) (2.18):

$$U_{d0} = \sqrt{2} \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot U_2 \quad (2.18)$$

$$U_{d0} = \sqrt{2} \cdot \frac{3}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{3} \cdot 400 = 463.3 \text{ В}$$

Максимальное обратное напряжение на вентиле (2.19):

$$U_{\text{об.маx}} = 1.05 \cdot U_{d0} \quad (2.19)$$

$$U_{\text{об.маx}} = 1.05 \cdot 463.4 = 486.5 \text{ В}$$

Номинальный (минимальный) угол регулирования выпрямителя (2.20):

$$\cos \alpha_{\text{min}} = \frac{U_{d.\text{н}}}{U_{d0}} \quad (2.20)$$

$$\cos \alpha_{\text{min}} = \frac{168,8}{486,57} = 0,35$$

Отсюда  $\alpha_{\text{min}}=2^\circ$



Исходя из рассчитанных данных, выбираем выпрямитель Siemens DC Converter D485/90 Mre-GeE6S22.

### **2.2.1 Выбор сетевого фильтра**

При работе преобразователей частоты с ШИМ IGBT-транзисторы, переключаясь с высокой скоростью, генерируют высокочастотные помехи, неблагоприятно влияющие на другие потребители электроэнергии в данной сети. Уровень радиопомех без использования специальных помехоподавляющих устройств может стать недопустимым. Поэтому необходимо применение таких специальных помехоподавляющих фильтров, включаемых между сетью и преобразователем. Такие фильтры пропускают ток низкой промышленной частоты. В то же время, высокочастотные токи помех они не пропускают. В качестве таких фильтров используют LC-фильтры с обычными, либо специальными одновитковыми соленоидами и многовитковыми дросселями. Сетевые фильтры уменьшают помехи в диапазоне 0,15-30 МГц.

Выбираем сетевой фильтр производства фирмы SIEMENS AG серии B84143-B1600-S24.

### **2.2.2 Выбор сетевого коммутационного дросселя**

Сетевые дроссели, включаемые, на входе преобразователей частоты, предназначены для уменьшения больших бросков тока, связанных с работой выпрямителей. Поэтому сетевые дроссели называют также токоограничивающими и коммутационными. Номинальные токи этих дросселей должны согласовываться с расчетными входными токами преобразователя частоты. Сетевые коммутационные дроссели снижают также выбросы тока, вызванные скачками напряжения в сети, например, при работе компенсирующих устройств, при замыкании на землю, или при

переключениях на подстанции. Эффективность коммутационного дросселя зависит от напряжения короткого замыкания входной сети. Выбираем сетевой коммутационный дроссель производства фирмы SIEMENS AG серии 4EU4551-4UA00-0A, рассчитанный на токи до 1000 А и напряжение короткого замыкания  $U_k = 2\%$ .

### **2.2.3 Выбор выходного дросселя**

Неоспоримые достоинства транзисторных IGBT-инверторов напряжения (АИН) с широтно-импульсным управлением (ШИМ) в регулируемом асинхронном электроприводе сочетаются, однако, с рядом проблем, одной из которых является проблема «длинного кабеля», соединяющего обмотки двигателя (АД) с выходом АИН. Выходной дроссель компенсирует ёмкостные токи в длинных кабелях, т.е. ёмкостные токи заряда/разряда кабелей, соединяющих преобразователи частоты и двигатели. Таким образом обеспечивается ограничение скорости нарастания ( $dU/dt$ ) фронтов импульсов выходного напряжения транзисторного (IGBT) преобразователя. Максимальная длина кабеля без выходного дросселя, подключаемого к стандартному преобразователю, зависит от мощности и номинального напряжения, с их увеличением длина кабеля изменяется от 50 м до 200 м для неэкранированного кабеля и от 35 м до 135 м для экранированного кабеля. Применение выходного дросселя позволяет увеличивать длину кабелей от 50 м до примерно 1000 м в зависимости от мощности, т.е. увеличивать расстояние между преобразователем и двигателем.

Выбираем выходной дроссель с железным сердечником производства фирмы SIE-MENS AG серии 6SE7038 - 0GS87-1FEO.

### **2.2.4 Выбор выходного фильтра**

Синусоидальный фильтр позволяет обеспечить практически синусоидальную форму выходного напряжения и тока. При использовании этого фильтра высшие гармоники в выходном напряжении по отношению к напряжению частоты 50 Гц составляют всего не более 5%. Уровень пиковых напряжений, подаваемых на двигатель, меньше, чем требует ГОСТ (DIN VDE 0530).

Выбираем выходной синусоидальный фильтр производства фирмы SIEMENS AG серии 6SE7023–4EC87–1FC0.

### **2.2.5 Защита электропривода, расчет уставок защитных устройств**

Одной из наиболее сложных задач проектирования силового канала является защита электропривода от недопустимых токов и напряжений в рабочих режимах, в режимах перегрузки и аварии. Причем, сложность заключается в оптимизации защиты по критериям их эффективности. На рисунке 2.2 представлена схема возможного протекания аварийных токов и соответствующим им аварийных режимов. Цифрами обозначены цепи протекания аварийных токов. Появление аварийных токов может быть вызвано:

- 1) Коротким замыканием цепей преобразователя и двигателя (1,7);
- 2) Выходом из строя силовых полупроводниковых приборов преобразователя (3,6);
- 3) Несанкционированным включением транзистора АИН (5);
- 4) Нарушение изоляции и замыкание на корпусе цепей преобразователя и двигателя при питании от сетей с заземленной нейтралью (2,4,8).

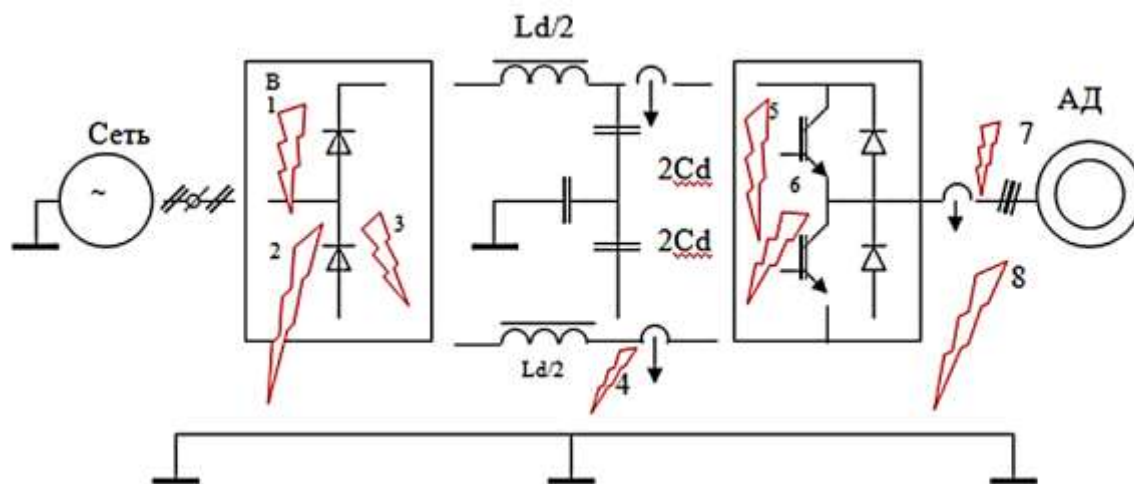


Рисунок 2.2 Схема возможного протекания аварийных токов

### 2.2.6 Защита, осуществляемая средствами преобразователя

Защиты, предусмотренные производителем и встроенные в преобразователь Siemens:

- электронная тепловая защита двигателя от перегрузки;
- температурный контроль радиатора;
- защита преобразователя от короткого замыкания на клеммах двигателя;
- защита от потери фазы отклонением преобразователя;
- постоянный контроль напряжения промежуточной цепи постоянного тока;
- защита от неисправности заземления на клеммах двигателя;
- если неисправна сеть питания, то преобразователь может осуществить контролируемый останов;
- защита от потери фазы отключением преобразователя при подаче нагрузки на двигатель.

При протекании аварийных токов в цепях транзисторов АИН, которые существенно уязвимы к токовым перегрузкам, защитить IGBT транзисторы аппаратными средствами защиты силовых цепей практически невозможно.

Ситуация усугубляется огромной энергией мощного конденсатора фильтра в звене постоянного напряжения. Здесь возможно лишь быстрое действующее (1-3 мкс) выключение транзисторов по цепям управления. Для этих целей в цепи силового канала электропривода включают датчики тока. Кроме того, отключение транзисторов можно осуществить специальными формирователями управляемых сигналов – интеллектуальными драйверами с функцией защиты.

Так как IGBT коммутируются с высокой скоростью, то напряжение коллектор-эмиттер на транзисторах быстро возрастает, особенно при запираии транзистора, и может достигнуть критического значения, способного вызвать пробой коллектора либо затвора транзистора (последнее возможно, если индуктивность цепей управления IGBT велика). Чтобы минимизировать превышение напряжения (перенапряжение) и предотвратить аварию IGBT, требуется установка снаббера (демпфирующей цепи) [10]. Каждая схема снаббера имеет свои достоинства и недостатки, например, при увеличении эффективности ограничения напряжения на IGBT заметно увеличивается число элементов входящих в состав схемы снаббера. Для преобразователей частоты малой и средней мощности используется схема снаббера представленная на рисунке 2.3.

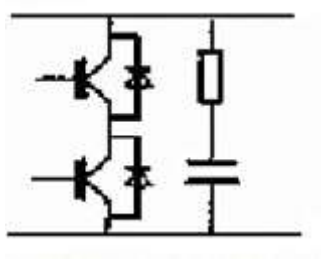


Рисунок 2.3 Типичная схема снаббера

Особенности данной схемы:

- 1) малое число элементов;
- 2) малые пульсации тока через конденсатор.

Для данной схемы снаббера необходимо выбрать конденсатор с хорошими высокочастотными характеристиками, малой собственной индуктивностью, высокими допустимыми импульсными токами и малым тангенсом угла потерь.

Сопротивление резистора зависит от емкости конденсатора  $C$  и частоты коммутации IGBT  $f_{sw}$ .

Мощность резистора в цепи снаббера (2.21):

$$p = 0,5 \cdot C \cdot \Delta U^2 \cdot f_{sw} = 0,5 \cdot 0,11 \cdot 10^{-3} \cdot 60^2 \cdot 12 \cdot 10^3 = 2,4, \text{ кВт} \quad (2.21)$$

где  $\Delta U$  – перенапряжение.

$f_{sw} = 12$  кГц – частота коммутации ключей.

Выбор сопротивления резистора производится из условия минимума колебаний тока коллектора при включении IGBT (1.33):

$$R \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_{sn}}{C}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{10 \cdot 10^{-9}}{0,11 \cdot 10^{-3}}} = 0,019 \quad \text{Ом} \quad (2.22)$$

где  $L_{sn}$  – индуктивность цепей снаббера, которая должна быть 10 нГн или менее;

$C$  – емкость снаббера.

Значение  $\Delta U$  зависит от многих факторов, оно не должно превышать 60 В. Для схем снабберов можно отметить следующее:

1) бросок напряжения  $\Delta U$  (рисунок 2.4) при запираии модуля определяется как параметрами схемы, так и характеристиками IGBT;

2)  $\Delta U$  зависит от индуктивности  $L_1$  проводов между конденсатором и снаббером (значение  $L_1 \leq 50$  нГн).

3)  $\Delta U$  существенно завысит от индуктивности  $L_2$  цепей снаббера (значение  $L_2 \leq 10$  нГн);

- 4)  $\Delta U$  незначительно зависит от сопротивления резистора  $R$  на входе затвора и от температуры;
- 5)  $\Delta U$  не определяется емкостью снаббера.

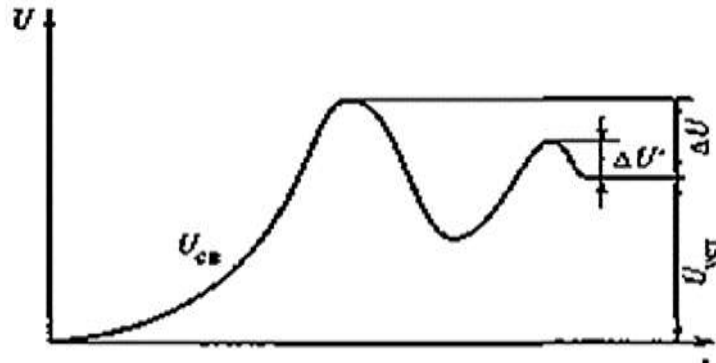


Рисунок 2.4 Напряжение на коллекторе IGBT при его заперении

Следовательно, для ограничения  $\Delta U$  важно ограничить индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  путем уменьшения длины проводов и их бифилярного монтажа.

Емкость конденсатора  $C$  (2.23):

$$C = L_1 \cdot \left( \frac{I_c}{\Delta U'} \right)^2 = 50 \cdot 10^{-9} \cdot \left( \frac{1170}{25} \right)^2, \quad (2.23)$$

где  $L_1$  – индуктивность проводов между конденсатором и IGBT-модулем;

$I_c$  – отключаемый ток;

$\Delta U'$  – напряжение второго броска (значение  $\Delta U' \leq 25$  В).

Принимаем:  $L_1 = 50$  нГн;  $\Delta U = 60$  В;  $\Delta U' = 25$  В;  $I_c = 1170$  А .

### 2.2.7 Защита на стороне питающей сети

Электроприводы Convertteam комплектуются стандартными средствами защиты, такими как автоматический выключатель, предохранители, контакторы.

Элементы силовой части электропривода должны быть надёжно защищены от недопустимых перенапряжений и перегрузок по току. Задачей устройств защиты от перенапряжений является уменьшение внутренних и внешних перенапряжений в такой степени, чтобы предотвратить появление опасных нагрузок на вентилях и обмотках. В вентильных преобразователях могут возникать аварийные режимы, сопровождающиеся недопустимыми по значению и длительности токами через вентили, например, внешние и внутренние короткие замыкания. Внутренние короткие замыкания возникают вследствие потери диодом запирающих свойств и закорачивании р-п структуры (пробой диода). Причинами пробоя диода могут быть либо высокая скорость нарастания тока, либо нарушение механической целостности р-п структуры при чрезмерном токе.

В таблице 2.2 приведены устройства защит, установленные на стороне питающей сети.

Таблица 2.2 Устройства защиты

Название устройства	Тип	Номинальные	
		Напр., В	Ток, А
Автоматический выключатель	Siemens 3VT4	690	1000
Сетевые предохранители	3NE1 388–8	690	800
Помехоподавляющий фильтр	6SE7033-2ES87-0FA1	-	-
Контактор	3TE 68	690	800
Коммутационный дроссель	4EU4551	690	800

### 2.2.8 Защита преобразователя автоматическими выключателями

Во входном модуле со стороны сети ставится главный выключатель, который в своем составе имеет автоматический выключатель и главный контактор.



Автоматические выключатели являются защитными аппаратами многократного действия и предназначены для защиты вентиляльных преобразователей от внешних коротких замыканий и перегрузок по току. Место включения автоматических выключателей в схемах вентиляльных преобразователей определяется теми наиболее вероятными аварийными режимами, от которых предусматривается защита. При этом должна учитываться специфика работы преобразователя, требования защиты вентиля и селективности отключения поврежденной цепи.

Выбирается автоматический выключатель производства фирмы SIEMENS серии 3VT4. Выбирается главный контактор производства фирмы SIEMENS серии 3TE 68.

### **2.2.9 Защита помехоподавляющим фильтром**

Что касается напряжения помех преобразователей, блоков выпрямления и блоков выпрямления/рекуперации, то сетевые фильтры EN55011, класс А1 понижают это напряжение до предельного уровня электрических систем.

Для данной системы выбирается фильтр фирмы SIEMENS серии 6SE7033-2ES87-0FA1.

### **2.2.10 Защита сетевыми предохранителями**

Сетевые предохранители обеспечивают защиту одним предохранителем как кабелей, так и полупроводниковых элементов. Это значительно уменьшает стоимость и время их установки. Они состоят из контактных ножей и плавкой вставки из серебряной фольги, помещенной в закрытый фарфоровый патрон. Плавкая вставка имеет узкие калиброванные перешейки, которые снабжены радиаторами из хорошо проводящего тепло керамического материала, посредством которых тепло отводится к корпусу предохранителя. Эти радиаторы служат также дугогасительными камерами с узкой щелью, что

значительно улучшает гашение дуги, возникающей в области перешейка. Плавкий предохранитель характеризуется действующими значениями напряжения и тока, и выбор его производится из следующих условий.

Номинальное напряжение применяемого предохранителя должно быть не меньше номинального напряжения преобразовательной установки:

$$U_{\text{пр.ном}} \geq U_d \geq 487 \text{ В}$$

В противном случае не будет обеспечено нормальное гашение дуги, что может привести к разрушению корпуса предохранителя и перебросу дуги на токоведущие части.

Время срабатывания предохранителя 10 - 15мс.

Номинальный ток плавкой вставки (2.24):

$$I_{\text{пл.ном}} = k_{\text{зап}} \cdot \frac{\lambda_{\text{пч}} \cdot I_{dн}}{\sqrt{3} \cdot n} = 1,25 \cdot \frac{1,5 \cdot 111}{\sqrt{3} \cdot 1} = 120,16 \text{ А}, \quad (2.24)$$

где  $k_{\text{зап}}$  - коэффициент запаса по току;

$I_{dн}$  - выпрямленный ток в цепи постоянного тока;

$\lambda_{\text{пч}}$  - перегрузочная способность преобразователя частоты.

Согласно предъявленным условиям из каталога выбираются предохранители фирмы SIEMENS типа 3NE3 338-8 с номинальным током плавкой вставки равным 150 А.

### **2.3 Выбор и разработка функциональной схемы САР электропривода**



Рассматриваемый узел способствует управлению моментом АД во время кратковременных отключений или возможных уменьшений напряжения питающей сети преобразователя частоты.

Сигнал задания потокосцепления ротора  $\psi_{23}$  формируется в блоке А5. Функциональная связь между реальной частотой  $f_1$  выходного напряжения преобразователя и потокосцеплением ротора АД определяет постоянство  $\psi_{23}$  на уровне задания номинального потокосцепления ротора  $\psi_{2ном}$  при  $f_1 \leq f_{1max} \cong f_{1.ном}$  и уменьшение  $\psi_{23}$  при  $f_1 > f_{1max}$ . Последний вариант обеспечивает работу АД в зоне регулирования скорости выше номинальной при постоянстве номинального напряжения питания статора. Сигнал  $f_{1max}$ , корректирующий допустимую максимальную частоту выходного напряжения преобразователя UZF, формируется расчетным путем в блоке А4, используя данные математической модели АД в зависимости от заданного максимально допустимого напряжения питания статора  $U_{1max}$ . Значение  $U_{1max}$  определяется напряжением  $U_{dc}$  на выходе силового фильтра в звене постоянного тока преобразователя частоты UZF с коррекцией по сигналу  $m_d$ , пропорционального максимально возможной глубине модуляции выходного напряжения ПЧ (UZF).

Сигнал  $\psi_{23}$  задания потокосцепления ротора с выхода блока А5 в результате перемножения на выходной сигнал блока А7 преобразуется в сигнал  $\psi_{23}^*$ , изменяющийся во времени с темпом, определяющим время возбуждения АД. Лишь по истечению этого времени, когда возбуждение АД достигнет установившегося значения, в системе управления преобразователем частоты появляется логический сигнал на разрешение управления преобразователем электропривода. Отметим здесь полное подобие условию подключения к питающему напряжению якорной цепи двигателя постоянного тока независимого возбуждения лишь при наличии его магнитного потока. Значение времени возбуждения АД может быть задано как внешним сигналом  $t_6$  блока А7, так и определено при автоматической идентификации параметров АД [8].

В структуре управления предусмотрена возможность адаптации потока ротора к нагрузке АД, способствующая снижению суммарных магнитных потерь в машине при уменьшении нагрузки. С этой целью сигнал  $I_{1yз}$  задания составляющей тока статора по оси  $y$  поступает на блок А8, где при заданном минимально допустимом значении потока ротора  $\psi_{2min}$  и заданном коэффициенте адаптации  $\kappa_a$  формируется сигнал, определяющий поток ротора в зависимости от нагрузки АД. При включенном контуре адаптации потока ротора блок А9 выделяет минимальное значение сигнала задания  $\psi_{2з}^*$ .

В соответствии с заданием потокосцепления ротора в блоке А6 по математической модели АД определяется сигнал задания составляющей тока статора  $I_{1x}$ . Каждая из составляющих  $I_{1y}$  и  $I_{1x}$  тока статора сравнивается на  $\Sigma_7$  и  $\Sigma_8$  со своими текущими значениями  $I_{1yist}$  и  $I_{1xist}$ , которые выделяются с помощью блока UVF векторного преобразования токов из сигналов  $I_{1\alpha}$  и  $I_{1\beta}$ , полученных с датчика тока. Указанный преобразователь представляет собой устройство векторного поворота, производящее преобразование по следующим формулам (2.26) и (2.27):

$$I_{1x} = I_{1\alpha} \cdot \cos \varphi_{0эл} + I_{1\beta} \cdot \sin \varphi_{0эл}; \quad (2.26)$$

$$I_{1y} = -I_{1\alpha} \cdot \sin \varphi_{0эл} + I_{1\beta} \cdot \cos \varphi_{0эл}. \quad (2.27)$$

Угол  $\varphi_{0эл}$  поворота осей координат  $x$  и  $y$ , вращающихся со скоростью электромагнитного поля АД, формируется в блоке А11 согласно частоте  $f_1$ . Принципиальная схема устройства векторного преобразователя представлена на рисунке 2.6.

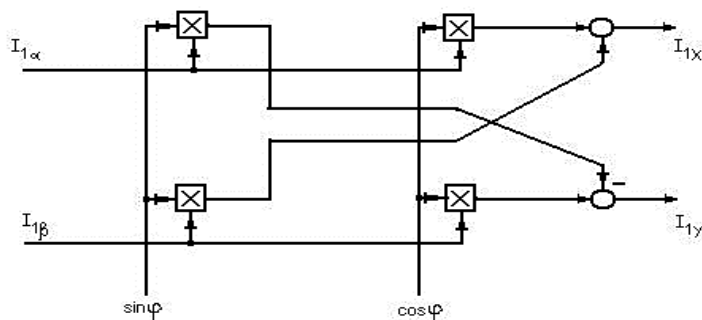


Рисунок 2.6 Принципиальная схема устройства векторного преобразования токов

Сигналы рассогласования задающих и реальных значений составляющих тока статора поступают на входы их соответствующих регуляторов  $PT_x$  и  $PT_y$ . Выходные сигналы регуляторов после суммирования на  $\Sigma_9$  и  $\Sigma_{10}$  с сигналами компенсации сформированными в блоке А12, и учета внутренней обратной связи по ЭДС двигателя, поступают на координатный преобразователь К/Р. В зависимости от его входных сигналов, пропорциональных заданию составляющих выходного напряжения преобразователя в осях  $x, y$  на выходе К/Р формируются сигналы  $u_{1z}$  и  $\varphi$ , определяющие соответственно амплитуду и фазу вектора напряжения в двухфазной системе координат  $\alpha, \beta$ , неподвижной относительно статора АД.

Регулятор напряжения РН, на входе которого сравниваются сигналы задания  $u_{1z}$  и реального значения напряжения  $u_{1.ist}$  на выходе ПЧ (UZF), обеспечивает стабилизацию его выходных напряжений. Сигналы задания выходного напряжения преобразователя  $u_1$  и  $\varphi$  в осях  $\alpha, \beta$  совместно с сигналом  $f_1$ , определяющим частоту выходного напряжения преобразователя частоты, трансформируются в преобразователе координат ПК в эквивалентные сигналы  $u_{1a}, u_{1b}, u_{1c}$  трехфазной системы координат, определяющие выходные напряжения ПЧ (UZF). Закон преобразования, по которому работает координатный преобразователь ПК имеет вид (2.28), (2.29), (2.30):

$$U_A = U_{s\alpha}, \quad (2.28)$$

$$U_B = -\frac{1}{2} \cdot U_{s\alpha} + \frac{3}{2} \cdot U_{s\beta}, \quad (2.29)$$

$$U_C = -\frac{1}{2} \cdot U_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_{s\beta}. \quad (2.30)$$

Формирование сигнала  $f_1$  задания частоты выходных напряжений ПЧ (UZF) обеспечивается суммированием на  $\Sigma_{11}$  и  $\Sigma_{12}$  сигнала  $\omega$  реального значения скорости АД, поступающего с тахогенератора ВВ, и сигналов  $f_{sI}$ ,  $f_{sЭ}$ , определяющих частоту скольжения АД соответственно в функции тока и ЭДС двигателя. Вычисление  $f_{sI}$  осуществляется в блоке ИМ математической модели двигателя по току, на вход которого совместно с текущими значениями  $I_{1y \text{ ist}}$  и  $I_{1x \text{ ist}}$  составляющих тока статора в осях  $x$ ,  $y$  подается сигнал  $R_2$ , пропорциональный сопротивлению ротора АД.

В блоке ЭФМ, с использованием математической модели АД, на вход которого кроме текущих значений  $I_{1y \text{ ist}}$  и  $I_{1x \text{ ist}}$  составляющих тока статора поступает сигнал  $R_1$ , пропорциональный результирующему сопротивлению цепи статора, формируются два выходных сигнала:  $\psi_2$  - определяющий потокосцепление ротора, и  $E_1$  - пропорциональный ЭДС двигателя.

В преобразователе частоты Convertteam LV7000 реализована логика управления, обеспечивающая отдельное подключение сигналов  $f_{sI}$  и  $f_{sЭ}$  на вход  $\Sigma_{11}$  и  $\Sigma_{12}$  в зависимости от заданной частоты выходного напряжения UZF. При малых частотах действует контур коррекции по току, обеспечивая компенсацию падения напряжения на сопротивлении статора; при больших частотах обеспечивается коррекция сигнала задания на частоту по ЭДС двигателя. Частота, при которой переключаются контура коррекции, приближенно определяется из уравнения (2.31):

$$f = 0,3 \cdot f_{\text{ном}} \quad (2.31)$$

Максимально допустимая частота выходного напряжения UZF ограничивается сигналом  $f_{огр}$  блока БО2.

Значения сигналов  $R_1$  и  $R_2$  формируются в блоке А10, представляющему собой тепловую модель АД, куда поступает совокупность сигналов - поправок  $p_{\Sigma}$ , включающих в себя информацию о:

- сопротивлении цепи статора и ротора, определенных при автоматической; идентификации параметров двигателя;
- степени влияния на эти сопротивления температуры двигателя и окружающей среды;
- типа охлаждения двигателя;
- наличия выходных фильтров преобразователя;
- сопротивлении кабеля и т.д.

Стабилизация момента связана с увеличением сигнала задания  $M^*_{\Sigma}$  электромагнитного момента АД. Последнее приводит к увеличению напряжения  $U_1$  и частоты  $f_1$  на выходе преобразователя частоты UZF по мере увеличения статической нагрузки  $M_{c1}$  и, соответственно, увеличению по сравнению с исходной скорости идеального холостого хода двигателя.

## **2.4 Расчет структурной схемы САР и выбор параметров регуляторов**

### **2.4.1 Расчет параметров выбранного двигателя**

В связи с тем, что в каталогах фирмы производителя не указываются все параметры обмотки двигателя, необходимые для расчета статических характеристик двигателя, а также расчета переходных процессов, то все необходимые для этого данные рассчитываются с некоторой погрешностью.

Определение номинального скольжения (2.32):

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s}, \quad (2.32)$$



где  $n_s$  - синхронная скорость вращения, об/мин;

$n_H$  - номинальная скорость вращения двигателя, об/мин.

$$s_n = \frac{1500 - 1475}{1500} = 0,0167$$

Расчет величины критического скольжения (2.33):

$$s_k = (m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1}) \cdot s_n, \quad (2.33)$$

где  $m_{max} = M_{max}/M_n = 2,5$  - отношение момента критического к номинальному.

$$s_k = (2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1}) \cdot 0,0167 = 0,073$$

Конструктивный коэффициент:

Первоначально задается значение коэффициента  $c_1$  в диапазоне  $c_1 = 1,02 \div 1,05$  для предварительного расчета параметров схемы замещения. После расчета индуктивностей, входящих в уравнение сравниваются полученные значения с первоначально выбранными и при необходимости расчет повторяется для другого значения  $c_1$ . Принимается  $c_1 = 1,02$ .

Приведенное активное сопротивление ротора (2.34):

$$R_r' = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_H + \Delta P_{мех})}{I_H^2 \cdot ((1 - s_H)/s_H)}, \quad (2.34)$$

где  $\Delta P_{мех} = 0,01 \cdot P_H$  - механические потери

$$R_r' = \frac{1}{3} \cdot \frac{(45000 + 4500)}{4,7^2 \cdot \left(\frac{1 - 0,0167}{0,0167}\right)} = 0,127 \text{ Ом}$$

Пренебрегая потерями в ферромагнитном сердечнике и добавочными потерями в машине, можно считать, что мощность, выделяемая в активном сопротивлении статорной обмотки, определяется выражением (2.35):

$$P_{эл1} \approx 3 \cdot U_{\phi} \cdot I_H \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta) - 3 \cdot I_H^2 \cdot c^2 \cdot R_r - \Delta P_{мех} = 3 \cdot I_H^2 \cdot R_s \quad (2.35)$$

Отсюда найдем величину активного сопротивления статора (2.36):

$$R_s = \frac{(U_H/\sqrt{3}) \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \eta)}{I_H} - c^2 \cdot R_r - \frac{\Delta P_{мех}}{3 \cdot I_H^2} \quad (2.36)$$

$$R_s = \frac{\left(\frac{440}{\sqrt{3}}\right) \cdot 0.86 \cdot (1 - 0.933)}{47} - 1.02^2 \cdot 0.104 - \frac{4500}{3 \cdot 47^2} = 0.12 \text{ Ом}$$

Приведенная индуктивность рассеяния статора и ротора (2.37):

$$L_{1s} = L_{1r} = \frac{U_H/\sqrt{3}}{4\pi f(1+c^2)k_I I_H} \quad (2.37)$$

$$L_{1s} = L_{1r} = \frac{440/\sqrt{3}}{4\pi \cdot 40 \cdot (1+1.02^2) \cdot 6.5 \cdot 47} = 8.108 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}$$

Индуктивность статора и приведенная индуктивность ротора (2.38):

$$L_s = L'_r = \frac{1}{2\pi \cdot f_H} \cdot \frac{U_H/\sqrt{3}}{I_H \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2 \cdot 2\pi f M_{max} \cdot S_H}{3 \cdot P_H \cdot S_{кр} \left(\frac{U_H}{\sqrt{3}}\right)}} \quad (2.38)$$

$$L_s = L'_r = \frac{1}{2\pi \cdot 50} \cdot \frac{\frac{440}{\sqrt{3}}}{47 \cdot \sqrt{1 - 0.86^2} - \frac{2 \cdot 2\pi \cdot 40 \cdot 469 \cdot 0.0167}{3 \cdot 45000 \cdot 0.073 \cdot \left(\frac{440}{\sqrt{3}}\right)}} = 0.034 \text{ Гн}$$

Индуктивность контура намагничивания (2.39):

$$L_m = L_s - L_{1s} \quad (2.39)$$

$$L_m = 0.034 - 8.108 \cdot 10^{-4} = 0.033 \text{ Гн}$$

Проверка правильности выбора коэффициента приведения (2.40):

$$c_1 = 1 + \frac{L_s}{L_m} \quad (2.40)$$

$$c_1 = 1 + \frac{0.034}{0.033} = 1.021$$

Так как значения коэффициента  $c_1$  практически равно заданному значению принятого коэффициента  $c_1 = 1,02$ , то считается, что рассчитанные параметры схемы замещения АД наиболее приближены к реальным значениям.

Выражение для номинального и критического моментов двигателя при частотном регулировании могут быть представлены в виде (2.41) и (2.42):

$$M = \frac{3 \cdot U_1^2 \cdot R_2'}{2\pi f_H s \left[ \left( R_1 + \frac{c_1 R_2'}{s} \right)^2 + (\alpha x_1 + c_1 \alpha x_2')^2 \right]} \quad (2.41)$$

$$M_{кр} = \frac{3 \cdot U_1^2}{2\pi f_H \left[ R_1 + \sqrt{R_1^2 + (\alpha x_1 + c_1 \alpha x_2')^2} \right]} \quad (2.42)$$

где  $c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_\mu} = \frac{U_1}{E_{10}}$  - модуль коэффициента, характеризующего рассеяние статора АД и учитывающего падение напряжения на сопротивлениях обмотки статора от намагничивающего тока  $I_\mu$  при переходе от исходной T-образной схемы замещения к расчетной Г-образной схеме замещения АД;

$U_1$  - действующее значения напряжения на обмотках статора;

$E_{10}$  - индуцированное результирующим потоком в обмотках статора действующее значение ЭДС идеального холостого хода;

$f_H$  - выходная частота инвертора;

$$x_1 = x_2' = 2\pi f_H \cdot L_s \quad (2.43)$$

$$x_\mu = 2\pi f_H \cdot L_m \quad (2.44)$$

$$x_1 = x_2' = 2\pi \cdot 40 \cdot 0.034 = 8.545 \text{ Ом}$$

$$x_\mu = 2\pi \cdot 40 \cdot 0.033 = 8.294 \text{ Ом}$$

Коэффициент роторной цепи определится по формуле (2.45):

$$K_r = \frac{L_m}{L_r} \quad (2.45)$$

$$K_r = \frac{0.033}{0.034} = 0.971$$

### 2.4.2 Составление структурной схемы

Принцип векторного управления асинхронным двигателем основан на преобразовании измеренных в неподвижной системе  $\alpha, \beta$  координат двигателя (напряжений, токов, потокосцеплений и т.п.) к вращающейся системе координат  $x, y$ . В результате такого преобразования выделяются составляющие соответствующих обобщенных векторов во вращающейся системе координат, которые будут иметь постоянные, в установившемся режиме, значения. Регулирование их позволяет осуществить раздельное управление скоростью и потокосцеплением асинхронного двигателя.

В структурной схеме асинхронного двигателя имеются перекрестные обратные связи, которые необходимо компенсировать системой управления. Использование в системе управления связей, компенсирующих основные нелинейности асинхронного двигателя, как элемента САУ, позволяет получить математическое описание динамических режимов АД с системой векторного управления, которое аналогично математическому описанию подобных режимов для двигателя постоянного тока при двухзонном регулировании скорости. Указанное позволяет применить для асинхронного электропривода разработанные для приводов постоянного тока принципы подчиненного регулирования.

В системе координат  $x, y$ , связанной с вектором потокосцепления ротора, электромагнитный момент АД определяется (2.46):

$$M = \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot k_r \cdot |\overline{\Psi}_r| \cdot \overline{I}_{sy}, \quad (2.46)$$

где  $p_n$  – число пар полюсов асинхронного двигателя;  
 $k_r$  – коэффициент электромагнитной связи ротора;  
 $|\overline{\Psi}_r|$  – вектор потокосцепления ротора, Вб;  
 $\overline{I}_{sy}$  – составляющая тока статора по оси у, А.

Таким образом, из выражения следует, что осуществив стабилизацию потокосцепления ротора,  $|\overline{\Psi}_2| = \text{const}$  управление электромагнитным моментом можно свести к управлению составляющей тока  $\overline{I}_{1y}$ , аналогично управлению двигателем постоянного тока с неизменным током возбуждения.

Вектор обобщенного потокосцепления ротора определяется:

$$\overline{\Psi}_2 = \overline{\Psi}_{2x} = \frac{L_m}{T_r p + 1} \cdot \overline{I}_{sy}, \quad (2.47)$$

где  $L_m$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора, Гн;  
 $T_r$  – постоянная времени контура ротора, с.

Из выражения следует, что стабилизацию или регулирование потокосцепления ротора можно осуществить посредством стабилизации или управления проекцией тока  $\overline{I}_{1x}$ .

Опираясь на систему дифференциальных уравнений, описывающих электромагнитные процессы в асинхронном двигателе, и на структурную схему асинхронного двигателя, как объекта регулирования, и руководствуясь принципами построения систем подчиненного регулирования, можно представить структурную схему системы векторного управления асинхронным двигателем, позволяющую осуществить управление модулем потокосцепления ротора и угловой скоростью ротора. Структурная схема системы автоматического регулирования с косвенной ориентацией по вектору потокосцепления ротора представлена на рисунке 2.7 [9].



Потокосцепление ротора непосредственно не зависит от составляющей  $U_{sx}$ . Канал регулирования потокосцепления содержит два апериодических звена с передаточными функциями:

$$W_1(p) = \frac{1/R_s}{T_s p + 1} \quad (2.48)$$

$$W'_1(p) = \frac{L_m}{T_r p + 1} \quad (2.49)$$

Поэтому система регулирования канала потокосцепления строится как двухконтурная система подчиненного регулирования с внутренним контуром управления по току статора  $\overline{I_{lx}}$  и с внешним - по модулю потокосцепления ротора.

Канал управления перемещением штанги содержит три контура регулирования: внутренний - по току статора  $\overline{I_{ly}}$ , средний - по угловой скорости ротора.

Следовательно, в структурной схеме системы управления образованы два независимых канала регулирования, в которых параметры регуляторов рассчитываются известными методами.

Электромагнитная постоянная времени статорной цепи определится по формуле (2.50):

$$T_s = \frac{L'_s}{R_s} \quad (2.50)$$

$$T_s = \frac{L'_s}{R_s} = \frac{L_s - k_r L_m}{R_s} = \frac{0.034 - 0.98 \cdot 0.033}{0.12} = 0.014 \text{ с}$$

Электромагнитная постоянная времени роторной цепи определится по формуле (2.51):

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (2.51)$$

$$T_r = \frac{0.034}{0.127} = 0.268 \text{ с}$$

Тогда передаточная функция  $W_1(p)$  (2.48) примет вид:

$$W_1(p) = \frac{1/0.12}{0.014p+1} = \frac{8.333}{0.014p+1}$$

Передаточная функция  $W'_1(p)$  (2.50) примет вид:

$$W'_1(p) = \frac{0.033}{0.268p+1}$$

Динамические свойства преобразователя частоты с блоками измерения и преобразования координат могут быть упрощенно представлены передаточной функцией инерционного звена (2.51):

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{K_{\text{пч}}}{T_{\mu}p+1}, \quad (2.51)$$

где  $K_{\text{пч}}$  – коэффициент усиления преобразователя частоты;

$T_{\mu}$  – постоянная времени преобразования частоты ( $T_{\mu} = 0.001 \text{ с}$ ).

Поскольку максимальное напряжение на выходе преобразователя частоты составляет 440 В, то коэффициент усиления преобразователя частоты определится по формуле (2.52):

$$K_{\text{пч}} = \frac{U}{U_y}, \quad (2.52)$$

где  $U$  – максимальное напряжение на выходе преобразователя частоты, В;

$U_y$  – максимальное напряжение управления, В.

$$K_{\text{пч}} = \frac{440}{10} = 44$$

Передаточная функция преобразователя частоты:

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{44}{0.001p+1}$$

В соответствии с методикой расчета систем подчиненного регулирования, каждый из контуров канала потокосцепления настраивается на модульный



оптимум с применением ПИ-регуляторов, компенсирующих соответствующие апериодические звенья.

Внутренний контур регулирования составляющей тока  $I_{sx}$  содержит ПИ-регулятор тока с передаточной функцией (2.53):

$$W_{PTx}(p) = \frac{T_{ix}p+1}{T_{ux}p}, \quad (2.53)$$

где  $T_{ix} = T_s$  – электромагнитная постоянная времени статорной цепи, с;  
 $T_{ux} = T_{uy}$  – постоянная времени контура регулирования составляющей тока  $I_{sx}$ , с.

Постоянная времени контура регулирования составляющей тока  $I_{sx}$  определится по формуле (2.54):

$$T_{ux} = \frac{2T_{\mu}K_{пч}K_{от}}{R_s}, \quad (2.54)$$

где  $T_{\mu}$  – постоянная времени преобразователя частоты, с;  
 $K_{пч}$  – коэффициент усиления преобразователя частоты;  
 $K_{от}$  – коэффициент обратной связи по току;  
 $R_s$  – активное сопротивление статора, Ом.

$$T_{ux} = \frac{2 \cdot 0.001 \cdot 44 \cdot 0.053}{0.12} = 0.039 \text{ с}$$

Коэффициент обратной связи по току определится по формуле (2.55):

$$K_{от} = \frac{U_{от}}{I_{max}} \quad (2.55)$$

$$K_{от} = \frac{10}{188} = 0.053 \text{ В/А}$$

Тогда передаточная функция внутреннего контура регулирования составляющей тока  $I_{sx}$  примет вид (2.54):

$$W_{PTx}(p) = \frac{T_{ix}p+1}{2T_{\mu}K_{пч}K_{от}\frac{1}{R_S}p} \quad (2.55)$$

$$W_{PTx}(p) = \frac{0.014p+1}{2 \cdot 0.001 \cdot 44 \cdot 0.053 \cdot \frac{1}{0.12}p} = \frac{0.014p+1}{0.039p}$$

Номинальное значение потокосцепления определится по формуле (2.66):

$$\Psi_{ном} = \frac{2M_{ном}}{3p_{п}K_r I_{SH}}, \quad (2.56)$$

где  $M_{ном}$  – номинальный момент двигателя, Нм;

$p_{п}$  – число пар полюсов двигателя;

$K_r$  – коэффициент роторной цепи;

$I_{SH} = I_{1H}$  – номинальный ток статора, А.

$$\Psi_{ном} = \frac{2 \cdot 291}{3 \cdot 2 \cdot 0.971 \cdot 47} = 2.125 \text{ Вб}$$

Коэффициент цепи обратной связи контура регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя определится по формуле (2.57):

$$K_{о\psi} = \frac{U_{о\psi}}{\Psi_{ном}}, \quad (2.57)$$

где  $U_{о\psi}$  – напряжение обратной связи по потокосцеплению, В;

$\Psi_{ном}$  – номинальное значение потокосцепления, Вб.

$$K_{о\psi} = \frac{10}{2.125} = 4.706 \text{ В/Вб}$$

Постоянная времени интегрирования контура регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя определится по формуле (2.58):

$$T_{и\psi} = \frac{4T_{\mu}L_m K_{о\psi}}{K_{от}}, \quad (2.58)$$

где  $T_{\mu}$  – постоянная времени преобразователя частоты, с;

$L_m$  – взаимная индуктивность, Гн;

$K_{o\psi}$  – коэффициент цепи обратной связи контура регулирования потокосцепления ротора асинхронного двигателя;

$K_{от}$  – коэффициент обратной связи по току.

$$T_{u\psi} = \frac{4 \cdot 0.001 \cdot 0.033 \cdot 4.706}{0.053} = 0.012 \text{ с.}$$

Внешний контур регулирования потокосцепления содержит ПИ-регулятор потока с передаточной функцией (2.59):

$$W_{P\psi}(p) = \frac{T_{\psi}p+1}{T_{u\psi}p}, \quad (2.59)$$

где  $T_{\psi} = T_r$  – электромагнитная постоянная времени роторной цепи, с;

$T_{u\psi}$  – постоянная времени интегрирования контура регулирования потокосцепления ротора, с.

$$W_{P\psi}(p) = \frac{0.268p+1}{0.012p}$$

Канал регулирования тока  $I_{sy}$  и момента содержит одно апериодическое звено, настроенное на модульный оптимум, имеющее вид (2.60):

$$W_2(p) = \frac{1/R_s}{T_s p+1} \quad (2.60)$$

$$W_2(p) = \frac{1/0.12}{0.014p+1}$$

Следовательно, внутренний контур регулирования тока  $I_{sy}$  имеет ПИ-регулятор тока с той же передаточной функцией, что и в контуре регулирования тока  $I_{sx}$ , имеющий вид (2.61):

$$W_{PTy}(p) = \frac{T_{ix}p+1}{T_{uy}p} \quad (2.61)$$

$$W_{PTy}(p) = \frac{0.014p+1}{0.039p}$$

Коэффициент обратной связи по скорости определится по формуле (2.62):

$$K_{oc} = \frac{U_{oc}}{\omega_{max}} \quad (2.62)$$

$$K_{oc} = \frac{10}{46} = 0.217$$

При составлении передаточной функции регулятора скорости необходимо учитывать то, что регулятор скорости должен обеспечивать компенсацию влияния узла производства при формировании электромагнитного момента АД. Для этой цели по аналогии с системами двухзонного регулирования скорости двигателей постоянного тока на выходе РС должен быть включен блок деления. В этом случае передаточная функция регулятора скорости будет иметь следующий вид (2.63):

$$K_{pc} = \frac{1}{4T_{\mu}} \cdot \frac{2L_r J_{\Sigma} K_{от} \Psi_{ном}}{3p_n L_m K_{oc}}, \quad (2.63)$$

где  $L_r$  – полная индуктивность обмотки ротора, Гн;  
 $J_{\Sigma}$  – суммарный момент инерции двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  
 $K_{от}$  – коэффициент обратной связи по току;  
 $\Psi_{ном}$  – номинальное значение потокосцепления, Вб;  
 $T_{\mu}$  – постоянная времени преобразователя частоты, с;  
 $p_n$  – число пар полюсов двигателя;  
 $L_m$  – взаимная индуктивность, Гн;  
 $K_{oc}$  – коэффициент обратной связи по скорости.

$$K_{pc} = \frac{1}{4 \cdot 0.001} \cdot \frac{2 \cdot 0.033 \cdot 0.5250 \cdot 0.053 \cdot 2.125}{3 \cdot 2 \cdot 0.034 \cdot 0.217} = 22.039$$

Для сведения к нулю ошибки регулирования скорости необходимо осуществить настройку контура регулирования скорости на симметричный оптимум, т.е. применить ПИ-регулятор скорости со следующей передаточной функцией (2.64):

$$W_{pc} = K_{pc} \frac{8T_{\mu}p+1}{8T_{\mu}p} \quad (2.64)$$

Для снижения перерегулирования по заданию в контуре тока необходимо на вход регулятора скорости установить фильтр с передаточной функцией (2.65):

$$W_{\Phi} = \frac{1}{8T_{\mu}p+1} \quad (2.65)$$

Кроме того, наличие фильтра позволит обеспечить ограничение скорости нарастания активной составляющей тока.

Качество системы регулирования может быть улучшено введением компенсирующих сигналов  $U_{кх}$  и  $U_{кy}$ , позволяющих скомпенсировать действие перекрестных обратных связей.

При наличии компенсирующих сигналов объект регулирования может быть описан следующими передаточными функциями (2.66), (2.67), (2.68), (2.69), (2.70):

$$\frac{|\Psi_r(p)|}{I_{sx}(p)} = \frac{k_r L_r}{T_r p + 1} = \frac{L_m}{T_r p + 1} \quad (2.66)$$

$$\frac{I_{sx}(p)}{U_{sx}(p)} = \frac{K_{пч}}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1/R_s}{T_s p + 1} \quad (2.67)$$

$$\frac{I_{sy}(p)}{U_{sy}(p)} = \frac{K_{пч}}{T_{\mu}p+1} \cdot \frac{1/R_s}{T_s p + 1} \quad (2.68)$$

$$M(p) = \frac{3}{2} p_H k_r |\overline{\Psi_r}| |\overline{I_{sy}}|(p) \quad (2.69)$$

$$\frac{\omega(p)}{M(p) - M_c(p)} = \frac{1}{J_{\Sigma} p} \quad (2.70)$$

В соответствии с уравнениями может быть получена упрощенная структурная схема объекта регулирования асинхронным двигателем, представленная на рисунке 2.8.

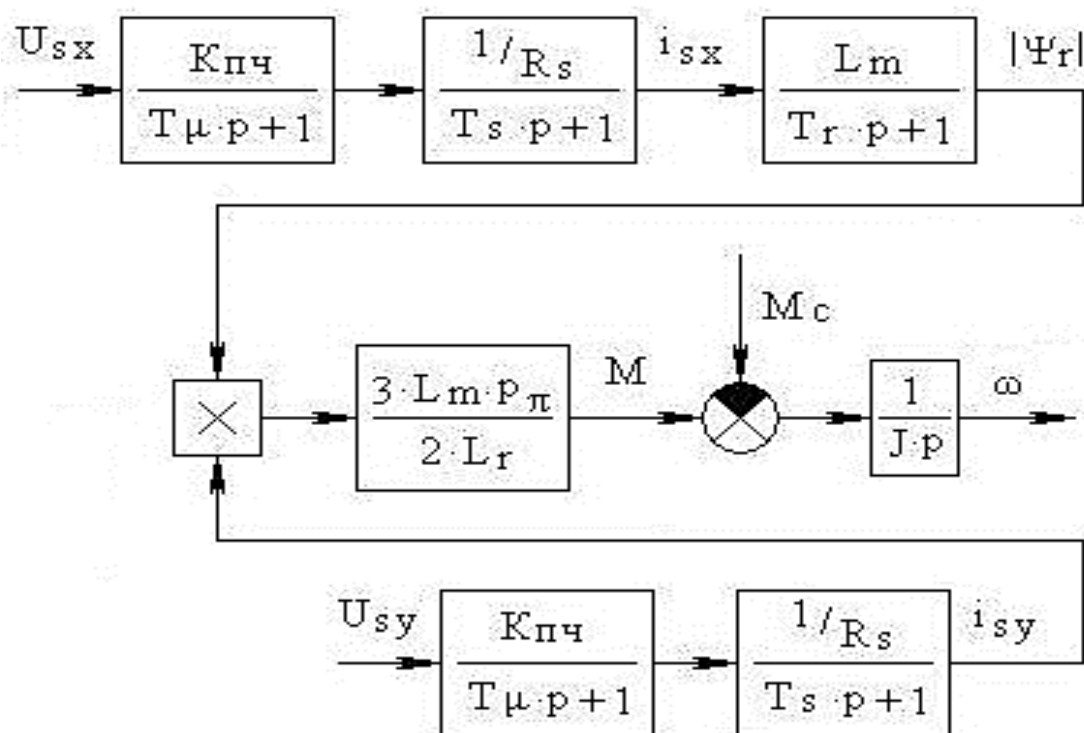


Рисунок 2.8 Упрощенная структурная схема объекта регулирования при векторном управлении

### 2.4.3 Расчет и анализ переходных процессов

Для расчета переходных процессов и оценки статических и динамических характеристик спроектированной системы управления электроприводом рольганга разрабатывается математическая модель САР на основании функциональной и структурной схемы системы автоматического регулирования и реализуется в качестве динамической модели в пакете для моделирования динамических систем Simulink (среда Matlab).

## 2.5 Управление оператором

Управление оператором реализовано с помощью переключателей и кнопок, установленных на пульте управления возле закалочной ванны. Пульт управления представляет собой металлических ящик, на передней двери которого находятся кнопки и переключатели. Управление с пульта предполагает наличие двух режимов работы: автоматический и ручной. Для включения автоматического цикла работы оператору нужно перевести переключатель SA1 в режим «Авто» и нажать кнопку SB1 «ПУСК», о начале цикла оповестит зеленая подсветка кнопки. Для остановки цикла используется кнопка SB2 «СТОП» с красной подсветкой.

Для перевода в ручной режим нужно перевести переключатель SA1 в режим «Ручной» и поочередно нажимать кнопки SB3 «Балки» (включение шагающих балок), SB4 «СТОЛ» (включение поворотного стола), SB5 «I Группа» (включение I Группы роликов), SB6 «II Группа» (включение II Группы роликов), SB7 «III Группа» (включение III Группы роликов), SB8 «IV Группа» (включение IV Группы роликов).

Для аварийного прерывания цикла установлена кнопка-грибок SB9 «АВАРИЯ».

Для монтирования пульта были выбраны следующие элементы:

- переключатель SA 1 - SDL16-EK2365;
- кнопка SB1 - SDL16-EW3361;
- кнопка SB2 - SDL16-EW3462;
- кнопки SB3-SB8 - SDL16-EA35;
- кнопка-грибок - SDL16-ES542.

На рисунке 2.9 показана схема расположения кнопок на пульте управления.

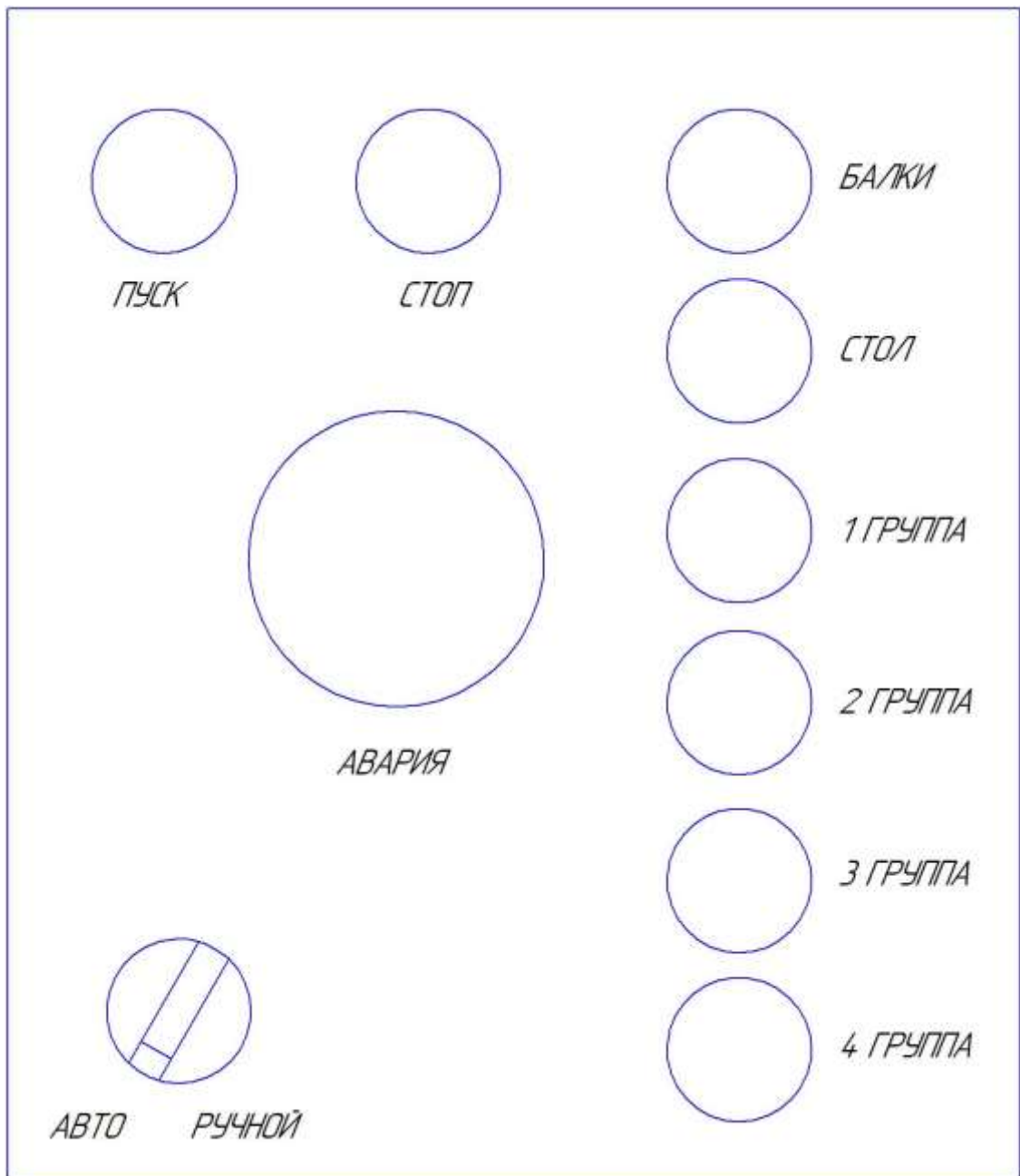


Рисунок 2.9 Схема расположения кнопок на пульте управления



## **Заключение**

В выпускной квалификационной работе была разработана мехатронная система транспортировки изделий закалочного комплекса термомеханического участка ООО «ЭТЕРНО».

На основе анализа технологического процесса закалочного комплекса были сформулированы требования к электроприводу. Предложено использование транспортного рольганга, поворотного стола и шагающих балок для исключения из технологического процесса работу человека на специальном погрузчике. В результате расчета требуемой мощности электродвигателей рольганга были выбраны асинхронные двигатели фирмы VEM типа KV0R 225 M4. С учетом номинальных данных двигателей и требований к электрооборудованию прокатного цеха были выбраны преобразователи частоты MICROMASTER 430 фирмы Siemens с векторным управлением.

В качестве защиты от токов короткого замыкания, перенапряжений на входе и выходе ПЧ были выбраны современные быстродействующие аппараты защиты: автоматические выключатели, обеспечивающие максимально токовую и тепловую защиты, предохранители для защиты от коротких замыканий и LCL – фильтры.

В соответствии с требованиями разработана функциональная схема системы регулирования электропривода, включающая в себя контур регулирования скорости. На основе разработанной функциональной схемы была рассчитана структурная схема системы регулирования. Проведен расчет переходных процессов по электронной модели выполненный в программе Matlab. В результате моделирования был сделан вывод о том, что рассчитанная система полностью удовлетворяет требованиям, предъявленным к электроприводу.

## Библиографический список

- 1 LOI-POLAND, Техническая спецификация и общие технические характеристики / LOI-POLAND. – Польша: Изд-во Польша, 2015. – 66 с.
- 2 Колачев, Б.А. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Учебник для ВУЗов / Б.А. Колачев, В.А. Ливанов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «МИСИС», 2001. – 416 с.
- 3 Целиков, А.И. Механизмы прокатных станов. / И.А. Целиков, Ф.В. Назаров – 3-е изд. – Ленинград: Изд-во Metallurgizdat, 1946. – 272 с.
- 4 Терехов В.М., Осипов В.И. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений: Издательский центр «Академия», 2005. – 304 с.
- 5 ГОСТ 15.011-96 Патентные исследования. Содержание и порядок проведения. – М: Изд-во стандартов, 1996. – 23 с.
- 6 Усольцев, А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: учебное пособие по дисциплинам электромеханического цикла. Учебник для ВУЗов / А.А. Усольцев – СПб, 2002. – 623 с.
- 7 Захаржевский, О.А. Уточнение модели асинхронной машины. // Научные труды SWorld. / О.А. Захаржевский – М, 2014. – 38 с.
- 8 Казанцев, В.П. Теория автоматического управления. Линейные системы управления: учебное пособие / В.П. Казанцев. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007.
- 9 Герман-Галкин, С.Г. Проектирование мехатронных систем на ПК. / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: Изд-во КОРОНА-Век, 2008. – 363 с.
- 10 Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями / А.А. Булгаков. – М: Изд-во Энергоиздат, 1982. – 216 с.
- 11 Вольдек, А.И. Электрические машины / А.И. Вольдек. – М: Изд-во Энергия, 1978. – 832 с.