

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт Механико-технологический факультет
Кафедра «Мехатроника и автоматизация»
Направление «Мехатроника и робототехника»

РАБОТА ПРОВЕРЕНА
Служба безопасности ЧТПЗ

2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
В.Р. Гасияров

2018 г.

Разработка мехатронной системы установки по торцовке труб в составе
трубоэлектросварочного агрегата ПАО "ЧТПЗ"

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ БАКАЛАВРА
ЮУрГУ – 15.03.06.2018.313.ПЗ (ВКР)

Консультант
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2018 г.

Руководитель работы
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2018 г.

Нормоконтролер
Преподаватель
Е.А. Маклакова

2018 г.

Автор работы
студент группы П-456
Елена Александровна Кондрина

2018 г.

Нормоконтролер
Ст. преподаватель
С.С. Воронин

2018 г.

АННОТАЦИЯ

Кондрина Е.А. Разработка
мехатронной системы установки по
торцовке труб в составе
трубоэлектросварочного агрегата
ПАО "ЧТПЗ".– Челябинск: ЮУрГУ,
П–456, 2018, 72 с., 17 ил., 9 табл.,
библиогр. список – 19 наим

В выпускной квалификационной работе рассматривается мехатронной системы установки по торцовке труб в составе трубоэлектросварочного агрегата ПАО "ЧТПЗ".

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка привода подачи шпиндельной бабки с резцами, для обработки и снятия фаски с обоих концов трубы, который бы отвечал требованиям, предъявляемым к функциональным характеристикам технологических модулей и машин.

Задачей выпускной квалификационной работы является расчет основных силовых агрегатов привода, а так же убедиться в рациональности их использовании. Проанализировать работу станка для снятия фаски.

В ходе проектирования нужно разработать функциональную и структурную схему работы механизма, а так же смоделировать ее математическую модель, произвести экономические расчеты рассматриваемого механизма и сделать заключение об эффективности его применения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ	6
1.1 Характеристика цеха Высота 239	6
1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма.....	8
1.3 Требования к приводу и системе автоматизации	9
1.4 Выбор системы привода	9
1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы привода	10
1.6 Выбор основного силового оборудования	28
1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств.....	33
2 РАЗРАБОТКА САУ	36
2.1. Разработка архитектуры системы автоматизации	36
2.2. Выбор контроллера и датчиков технологических координат	37
2.3 Разработка функциональной схемы автоматизированной системы регулирования электропривода	43
2.4 Разработка контура регулирования технологических координат.....	45
2.5 Моделирование типовых режимов работы	51
3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ.....	54
3.1 Расчет производственной программы цеха и фактического годового фонда рабочего времени	54
3.2 Расчет сметы капитальных затрат	55
3.2 Расчет затрат на содержание и эксплуатацию оборудования	58
3.4 Расчет затрат на оплату труда со страховыми отчислениями.....	60
3.5 Затраты на основные материалы	65
3.6 Расчет показателей прибыли предприятия.....	66
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	70
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	71

ВВЕДЕНИЕ

При эксплуатации труб в разных областях промышленности огромное значение имеет качество сварных швов, от этого зависит надежность системы и безопасность работников. Чтобы получить идеальный провар и надежное соединение сварочных швов, сократить время выполнения сварочных работ, предотвратить случаи травматизма сотрудников об острые углы изделия с торца трубы снимается фаска.

Таким образом, важной частью производства труб на ЧТПЗ в цехе «Высота 239» является установка по торцовке труб в составе трубоэлектросварочного агрегата ПАО "ЧТПЗ.

Цель работы – разработка мехатронной системы торцефасочной установки.

Задачи работы:

1. Описание технологического процесса
2. Описание и обоснование требований к приводу подачи и системе автоматизации;
3. Построение тахограммы и нагрузочной диаграммы привода;
3. Выбор силового оборудования;
4. Разработка САУ
5. Проведение технико-экономических расчетов

1 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА И ВЫБОР ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.1 Характеристика цеха Высота 239

Высота 239 – новый цех для производства труб большого диаметра с современным оборудованием и технологиями, принципиально новыми акцентами в культуре труда, соответствующий всем международным стандартам качества. Он начал работать в июле 2010 года, а в 2011 достиг проектной мощности, и теперь может производить 900 000 труб большого диаметра в год. Благодаря цеху годовой объем производства этого вида труб увеличивается до 1,35 млн тонн. На высоте изготавливают одношовные сварные трубы диаметрами от 530 до 1420 мм с толщиной стенок от 8 до 45,8 мм и длиной 12 и 18 метров, классом прочности до X100, с наружным и внутренним покрытиями.

Одним из достоинств цеха, как и всего ЧТПЗ, является применение уникальных, экологически безопасных технологий, что способствует сохранению природы и окружающей среды. В 2004 году ЧТПЗ одним из первых в металлургии сертифицирован по международному экологическому стандарту ISO 14001 и ежегодно подтверждает этот статус.

Трубы, производящиеся в цеху, отличаются высоким качеством. Задача, поставленная перед цехом – удовлетворить любые, в том числе перспективные, требования рынка трубопроводного транспорта. Челябинские трубы могут использоваться при прокладке трубопроводов через местность с вечной мерзлотой, в сейсмоопасных зонах, по дну морей.

В проект «Высота 239» включены следующие объекты: трубоэлектросварочный цех; насосная станция пожаротушения; установка утилизации концентрата СОЖ; участок утилизации обезвоженного концентрата СОЖ; внешние и внутривозрадные сети водоснабжения и канализации; станция технических газов; компрессорная станция ТЭСО и УЗК; трасса

природного газа к ТЭСЦ №3; главная понизительная подстанция №2; здание дежурного поста №4; железнодорожное хозяйство; автодороги и подъезды; эстакады (галереи) энергетических коммуникаций; система электроснабжения.

Оборудование установлено внутри здания, где климатические условия соответствуют следующим характеристикам: диапазон оптимальных температур внутри помещения выдержан в пределах от +15 до +35 °С, а максимальная относительная влажность воздуха – 80 %.

Производство труб начинается с выборки листа (штрипса) со склада с последующим выборочным контролем. Далее штрипс подается на технологическую линию взвешивания. Происходит контроль и подготовка штрипса для формовки, которая включает в себя УЗ-контроль, контроль геометрии листа, зачистка, осмотр листа, приварка технологических планок, обработка кромок штрипса и подгибка трубной заготовки. На стадии осмотра и маркировка листа возможен последующий его ремонт в том случае, если лист не соответствует требованиям. В том случае, если лист не соответствует указанным требованиям, его ремонтируют, либо удаляют из потока. Технологический процесс продолжается формовкой трубной заготовки, сборкой и сваркой технологического шва. Заготовка маркируется и проходит контроль технологического шва с последующей сваркой внутренних швов. После очистки внутренней полости труб и контроля внутреннего шва следует сварка наружных швов. Технологические планки выполнили свою функцию при сварке швов и далее отрезаются от трубы. Изделие проходит ультразвуковой контроль 1 и контроль концов труб и ОТК. При нахождении изъянов проводится дополнительно рентгеновский контроль и при необходимости ремонт.

Для последующего экспандирования трубу очищают от шлаков изнутри, чтобы не повредить трубу и оборудование. Далее происходит снятие усиления внутреннего и наружного швов. Труба обрабатывается с торцов и проходит гидравлические испытания. Снова проводят ультразвуковой контроль 2 на наличие микротрещин. Следующим этапом является рентгеновский контроль 3.

При нахождении дефекта труба отправляется на ремонт или на плазменную резку. Завершением процесса производства является снятие фасок на концах труб, магнитно – порошковый контроль и окончательная приемка.

1.2 Характеристика и кинематическая схема проектируемого механизма

При поднятии трубы над осью станка, станки M1/M2 будут задействованы световыми барьерами, перемещаются на быстрой и ползучей скоростях на рабочую позицию, после чего тележки будут зафиксированы на рельсах. Теперь зажимы обеих машин зажимают трубу, а шпиндельные бабки с вращающимися планшайбами направляются на рабочую позицию, т.е. внутренние копирующие ролики вводятся в трубу и начинается процесс снятия фаски. Эта обработка заканчивается процессом обработки торца.

По окончании обработки шпиндельные бабки возвращаются на быстрой скорости на позицию ожидания, зажимы станков – разжимаются, зажимы тележек – разжимаются и тележки также движутся на быстрой скорости на позицию ожидания, в то время как обработанная труба лежит на подъемных механизмах станка. Кинематическая схема механизма представлена на рисунке 1.1.

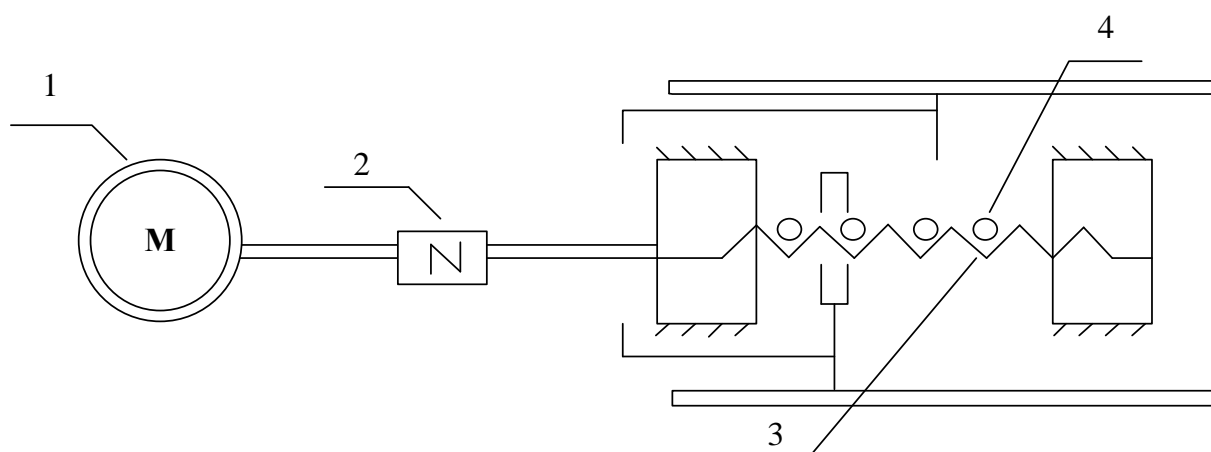


Рисунок 1.1 – Кинематическая схема механизма.

Движение подачи шпиндельной бабки на быстрой скорости обеспечивает шариковый ходовой винт (3) с предварительно зажатой двойной гайкой (4), зубчатой конической передачей (2) и трехфазным плавно регулируемым серводвигателем (1). Программирование частоты вращения главного ходового винта и подача ведутся на пульте управления, путем ввода соответствующих данных.

1.3 Требования к приводу и системе автоматизации

На основе анализа технологических операций привода подачи станка для снятия фаски можно сформулировать следующие требования к приводу мехатронной системы и системе его автоматизации:

- номинальная скорость подачи: 0,071 м/с;
- точность позиционирования ± 1 мм;
- диапазон регулирования скоростей 1:747 ($\omega_{min} = 0,42 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$, $\omega_{max} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$);
- обеспечение ускорения не более 0,1 м/с².
- статическая ошибка по скорости должна быть сведена к 0;
- необходимо обеспечить возможность больших, средних и малых перемещений шпиндельной бабки;
- необходимо обеспечить возможность работы с ПЛК с удаленно расположенным оборудованием.
- визуализация данных о текущем положении шпиндельной бабки, а также о скорости подачи.

1.4 Выбор системы привода

Особенностью приводов подач металлорежущих станков, повышающей качество, точность и производительность обработки, является независимость частоты вращения от вращающего момента и момента сопротивления.

Регулирование скорости подачи осуществляется при постоянном максимально допустимом моменте. Поэтому в основу выбора электродвигателя положена не мощность, а момент сил сопротивления в механизме подачи. Величину этого момента определяют по составляющим сил резания с учетом момента трения.

Для приведения в действие планшайбы механизма целесообразно использовать синхронный серводвигатель, преобразование оборотов которого, достигается путем использования двухступенчатого редуктора. Синхронный двигатель позволяет регулировать инерцию нагрузки при больших моментах, регулировать с высоким качеством частоту вращения, что обеспечивает высокую точность обработки, высокую перегрузочную способность и практически полное отсутствие пульсации вращающего момента.

1.5 Расчет и построение нагрузочной диаграммы и тахограммы привода

Расчетная схема механизма показана на рисунке 1.2.

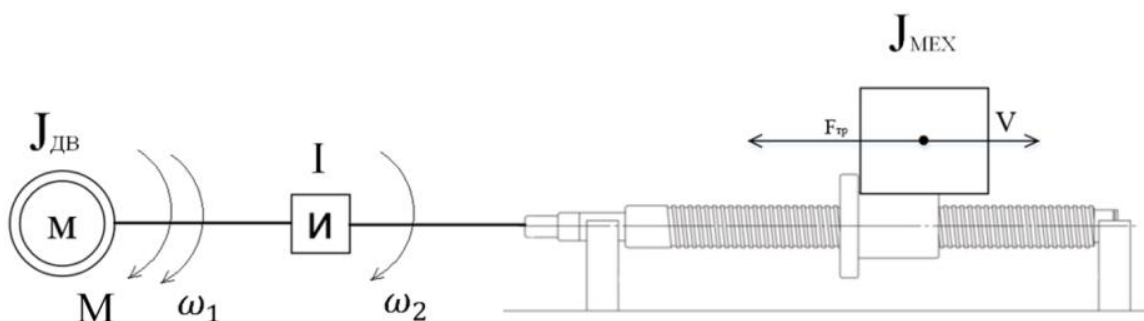


Рисунок 1.2 – Расчетная схема механизма

Суппорт, состоящий из шпиндельной бабки и стальных колёс, едущих по стальным рельсам, прикреплен к ШВП, в результате чего совершает поступательное движение. На него действуют сила тяжести, сила реакции опоры, силы трения, а так же сила резания во время обработки трубы.

Сила трения

Сопротивление от трения в ходовых колесах тележки складывается из трения качения ходовых колес по рельсам, трения в опорах, трения реборд колес о головки рельсов. При качении колес силы сопротивления вызывают моменты сопротивления движению, равные:

Трение качения колеса по рельсу:

$$M_{\text{кач}} = G \frac{f \cdot d_{\text{ц}}}{2}, \quad (1.1)$$

где $d_{\text{ц}}$ – диаметр цапфы вала (внутренний диаметр подшипника);

f – коэффициент трения качения;

G – собственный вес тележки и шпиндельной бабки.

Трение скольжения в опорах колеса:

$$M_{\text{ск}} = G \mu_{\text{ск}}, \quad (1.2)$$

где $\mu_{\text{ск}}$ – коэффициент трения скольжения;

G – собственный вес тележки и шпиндельной бабки.

Коэффициент трения качения стальных ходовых колес диаметром 100 мм по рельсам $f = 0,03$.

Коэффициент трения скольжения в опорах ходовых колес (с шариковыми подшипниками качения) $\mu_{\text{ск}} = 0,015$.

Моменты сопротивления движению можно выразить в виде сил трения:

$$F_{\text{кач}} = G \frac{f \cdot d_{\text{ц}}}{D_{\text{к}}}, \quad (1.3)$$

$$F_{\text{ск}} = G \frac{\mu_{\text{ск}}}{D_{\text{к}}}, \quad (1.4)$$

где $F_{\text{кач}}$ и $F_{\text{ск}}$ – соответственно силы сопротивления от трения качения и трения в опорах, отнесенные к поверхности качения ходовых колес, Н;

$D_{\text{к}}$ – диаметр поверхности катания ходового колеса, мм.

Трение реборд зависит от многих переменных факторов, не поддающихся достаточно точному математическому описанию. Поэтому принято пользоваться условными методами расчета, когда указанные сопротивления учитывают общим опытным коэффициентом трения реборд k_p , который вводится в формулы для момента или силы сопротивления движению.

Рекомендуется принять $k_p = 2,5$ (учтены сопротивления от трения токосъемником по троллеям).

Тогда момент сопротивления в ходовых колесах равен:

$$M_{\text{тр}} = (M_{\text{кач}} + M_{\text{ск}})k_p, \quad (1.5)$$

Сила сопротивления в ходовых колесах равна:

$$F_{\text{тр}} = (F_{\text{кач}} + F_{\text{ск}})k_p, \quad (1.6)$$

Найдем момент трения, приложенный к валу со стороны ШВП:

$$\begin{aligned} M_{\text{тр}} &= m \cdot g \cdot k_p \cdot \left(\frac{f \cdot d_{\text{ц}}}{2} + \mu_{\text{ск}} \right) = 403,92 \cdot 9,81 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{0,03 \cdot 0,01}{2} + 0,015 \right) = \\ &= 90,03456 \text{ Н} \cdot \text{м}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

Сила резания

Резание металлов – сложный процесс взаимодействия режущего инструмента и заготовки, сопровождающийся определенными физическими явлениями.

В начальный момент процесса резания движущийся резец под действием силы, действующей на него со стороны резцедержателя, вдавливается в металл, в срезаемом слое возникают упругие деформации (исчезающая после прекращения действий на тело внешних сил). При дальнейшем движении резца упругие деформации, накапливаясь по абсолютной величине, переходят в пластические (необратимые деформации). В прирезцовом срезаемом слое материала заготовки возникает сложное упругонапряженное состояние. Под действием нормальных и касательных напряжений срезаемый слой пластически деформируется. Рост пластической деформации приводит к сдвиговым деформациям, т.е. к смещению частей кристаллов относительно друг друга. Это происходит, когда возникающие напряжения превосходят предел прочности обрабатываемого материала.

Итогом сдвиговых деформаций становится скалывание элементарного объема металла и образованием элемента стружки. Далее процесс повторяется и образуется следующий элемент стружки и т.д.

При обработке резанием металл оказывает сопротивление режущему инструменту. Это сопротивление преодолевается силой резания, приложенной к передней поверхности инструмента. Сила резания направлена перпендикулярна передней поверхности резца. Сила резания затрачивается на отрыв элемента стружки от основной массы металла и его деформацию, а также на преодоление трения стружки о переднюю поверхность резца и задней поверхности резца о поверхность резания.

В результате сопротивления металла возникают силы упругого деформирования P_{y1} и P_{y2} , а так же силы пластического деформирования $P_{п1}$ и $P_{п2}$, действующие на режущий инструмент (рис.1.3). Наличие нормальных сил обуславливает возникновение сил трения T_1 и T_2 .

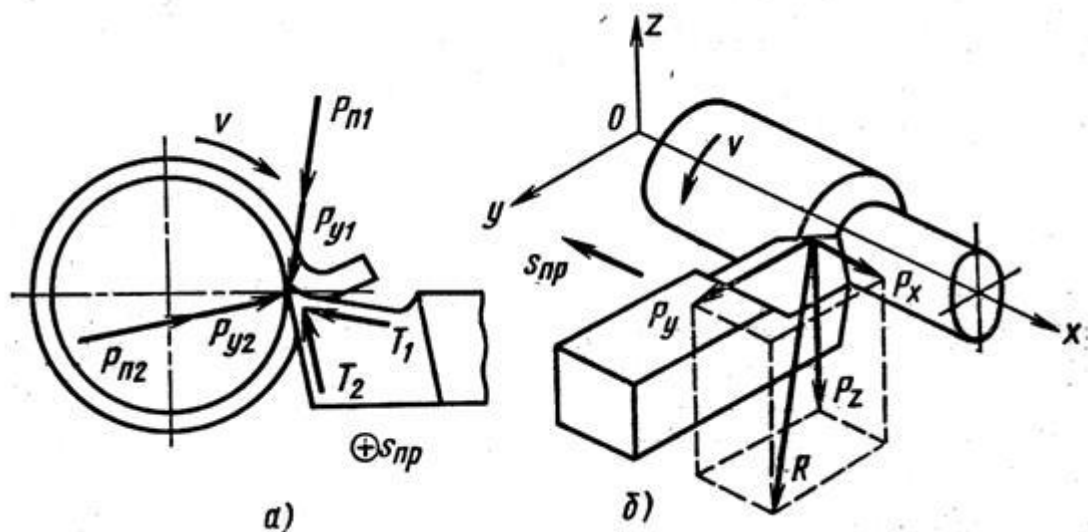


Рисунок 1.3 – Схема сил, действующих на резец (а) и разложение силы резания на составляющие (б)

Векторы реактивных сил (P_{y1} , P_{y2} , P_{n1} и P_{n2}) направлены перпендикулярно к передней и главной задней поверхностям инструмента. Силы трения (T_1 и T_2) направлены по передней и главной задней поверхностям инструмента. Всю указанную систему сил приводят к равнодействующей силе резания:

$$\overline{R} = \overline{P_{y1}} + \overline{P_{y2}} + \overline{P_{n1}} + \overline{P_{n2}} + \overline{T_1} + \overline{T_2} \quad (1.8)$$

Для расчетов используют не равнодействующую силу резания R , а ее составляющие, действующие по трем взаимно перпендикулярным направлениям – P_x, P_y, P_z . Ось X – линия центров станка; ось Y – горизонтальная линия, перпендикулярная линии центров станка; ось Z – линия, перпендикулярная плоскости XOY .

Сила P_z – вертикальная составляющая силы резания или просто сила резания. Действует в плоскости резания в направлении главного движения. По силе P_z определяют крутящий момент на шпинделе станка, эффективную мощность

резания, деформацию изгиба заготовки в плоскости XOZ , изгибающий момент, действующий на стержень резца, а также ведут динамический расчет механизмов коробки скоростей станка.

Сила P_y – радиальная составляющая силы резания. Действует перпендикулярно оси обрабатываемой заготовки в плоскости XOY . По силе P_y определяют величину упругого отжатия резца от заготовки, ведут расчет технологической системы на жесткость. Сила P_y стремится оттолкнуть резец от заготовки и деформировать ее. Учитывается при расчете прочности станины и суппорта, способствует появлению вибраций.

Сила P_x – осевая составляющая силы резания. Действует вдоль оси заготовки параллельно направлению продольной подачи. По силе P_x рассчитывают механизм подачи станка, а также изгибающий момент, действующий на стержень резца.

Каждая из составляющих силы резания определяется по эмпирическим формулам вида:

$$P = C_p t^x S^y V^n K_p, \quad (1.9)$$

где C_p – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства материала обрабатываемой заготовки,

t – глубина резания, мм;

S – подача, мм/об;

V – скорость резания (тангенсальная) ;

x, y, n – показатели степеней.

K_p – поправочный коэффициент, учитывающий фактические условия резания.

Величины коэффициентов и показателей степеней выбираются из справочников для конкретных условий обработки. Обрабатываемым материалом будем считать конструкционную сталь. Вид обработки – наружное продольное точение. Для осевой составляющей берутся следующие коэффициенты:

$$C_p = 339 ,$$

$$x = 1 ,$$

$$y = 0,5 ,$$

$$n = -0,4 .$$

Скорость резания находится по формуле:

$$V = \frac{C_v \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} , \quad (1.10)$$

где C_v – эмпирический коэффициент,

T – стойкость резца,

t – глубина резания,

S – продольная подача,

m, x, y – эмпирические коэффициенты,

K_v – поправочный коэффициент, учитывающий фактические условия резания (состояние поверхности заготовки, качество материала инструмента, обрабатываемый материал и материал инструмента).

Значения коэффициентов и показателей степеней выбираются из справочников для конкретных условий обработки. Обработываемым материала будем считать конструкционную углеродистую сталь, $\sigma_b = 750 \text{ МПа}$.

Из таблицы справочника для машиностроителей находим следующие коэффициенты:

$$C_v = 350,$$

$$T = 60 \text{ мин},$$

$$t = 10 \text{ мм},$$

$$S = 0,05 \text{ мм / об},$$

$$x = 0,15,$$

$$y = 0,20,$$

$$m = 0,20,$$

$$K_v = 1,4.$$

Найдем скорость резания :

$$V_p = \frac{350 \cdot 1,4}{60^{0,2} \cdot 10^{0,15} \cdot 0,05^{0,2}} = 278,466 \text{ м / мин} \quad (1.11)$$

Найдем осевую составляющую силы резания:

$$P_x = 339 \cdot 10^1 \cdot 0,05^{0,5} \cdot 278,466^{-0,4} \cdot 1,0695 = 85,3 \text{ Н.} \quad (1.12)$$

Приведенный момент

Приведенные момент сопротивления исполнительного органа механизма можно найти по формуле 1.13. Потери на трение в механизме неизвестны, и для их учёта используется КПД механизма.

$$M_{\text{мех пр}} = \frac{M_{\text{мех}} \omega_{\text{мех}}}{\eta_{\text{мех}}} = \frac{M_{\text{мех}}}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{швп}} i}, \quad (1.13)$$

где $M_{\text{мех}}$ – момент, создаваемый исполнительным органом механизма,

$\eta_{\text{дв}}$ – КПД двигателя,

$\eta_{\text{р}}$ – КПД передачи,

$\eta_{\text{швп}}$ – КПД ШВП,

i – передаточное число.

Приведенный момент сил резания находится по следующей формуле:

$$M_{\text{р}} = \frac{P_x \cdot l}{2\pi \cdot \eta \cdot i}, \quad (1.14)$$

где P_x – осевая составляющая силы резания,

l – длина шага ШВП,

$\eta_{\text{мех}}$ – КПД механизма.

Найдем момент сил трения, приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{трпр}} = \frac{M_{\text{тр}}}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{швп}} i} = \frac{90,03456}{0,88 \cdot 0,98 \cdot 0,9 \cdot 4} = 29 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1.15)$$

Найдем момент осевой силы резания, приведенный к валу двигателя:

$$M_{\text{рпр}} = \frac{P_{\text{х}} \cdot l}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{р}} \eta_{\text{швп}} i} = \frac{85,3 \cdot 0,01}{0,88 \cdot 0,98 \cdot 0,9 \cdot 4} = 0,2745 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1.16)$$

Найдем приведенный момент сил, действующих на двигатель в процессе подачи шпиндельной бабки на рабочую позицию:

$$M_{\text{пр1}} = M_{\text{трпр}} = 29 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (1.17)$$

Найдем приведенный момент сил, действующих на двигатель при обработке трубы:

$$M_{\text{пр2}} = M_{\text{трпр}} + M_{\text{рпр}} = 29,02745 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (1.18)$$

Момент инерции

Зависимость угловой скорости вала 2 ω_2 от скорости подачи $V_{\text{п}}$:

$$\omega_2 = \frac{V_{\text{п}} \cdot 2\pi}{l}, \quad (1.19)$$

где l – длина шага ШВП.

Условие сохранения запаса кинетической энергии:

$$\frac{J_{\text{мех пр}} \cdot \omega_1^2}{2} = \frac{J_{\text{мех}} \cdot \omega_2^2}{2}, \quad (1.20)$$

Найдем приведенный момент инерции исполнительного органа механизма:

$$J_{\text{мех пр}} = \frac{m}{i} \cdot \frac{1}{2\pi} = \frac{403,92 \cdot 0,01}{4 \cdot 2\pi} = 0,1608 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1.21)$$

Запишем полный момент инерции, приведенный к валу двигателя:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех пр}} = 0,0168 + 0,1608 = 0,1776 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (1.22)$$

Скорость привода

Для построения тахограммы нужно знать скорость привода при перемещении суппорта на рабочую позицию и скорость привода при обработке трубы. Первая скорость задана требованиями к электроприводу, а вторую можно найти, зная тангенциальную скорость резанья (1.11) и величину подачи на один оборот.

Скорость подачи при обработке трубы равна:

$$V_{\text{п}} = \frac{V_{\text{р}} S}{2\pi R} = \frac{4,64 \cdot 0,005}{2\pi \cdot 0,7} = 0,005277 \text{ м/с}, \quad (1.23)$$

где R – радиус обрабатываемой труб;

$V_{\text{р}}$ – скорость резания при обработке (1.13);

S –подача за один оборот шпиндельной бабки.

Угловая скорость вала 2 при обработке трубы:

$$\omega_2 = \frac{0,005277 \cdot 2\pi}{0,01} = 3,314 \text{ рад/с.} \quad (1.24)$$

Расчет и построение тахограммы и нагрузочной диаграммы работы привода

«Быстрая» скорость подачи инструмента на рабочую позицию V_6 , а так же максимальное ускорение a заданы требованиями:

$$V_6 = 0,125 \text{ м/сек}, \quad (1.25)$$

$$a = 0,4 \text{ м/сек}^2, \quad (1.26)$$

Скорость вращения вала «быстрой» скорости трубы:

$$\omega_6 = 78,5 \text{ рад/сек.}, \quad (1.27)$$

Допустимое значение углового ускорения:

$$\varepsilon = \frac{a \cdot 2\pi}{1} = \frac{0,4 \cdot 2\pi}{0,01} = 251,27 \text{ рад/сек}^2, \quad (1.28)$$

Динамический момент привода:

$$M_{\text{дин}} = J_{\text{пр}} \varepsilon = 0,1776 \cdot 251,27 = 44,626 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.29)$$

При построении тахограммы предполагается, что на каждом этапе переходного процесса ускорение электропривода равно максимальному

допустимому значению(1.26). Исходя из этого, определим длительность каждого этапа переходного процесса.

Время разгона до быстрой скорости подачи :

$$t_1 = \frac{\omega_6}{\varepsilon} = \frac{78,5}{251,27} = 0,177 \text{сек} \quad (1.30)$$

Время торможения до скорости резания :

$$t_2 = \frac{\omega_6 - \omega_p}{\varepsilon} = \frac{44,588 - 0,105}{251,27} = 0,177 \text{сек} \quad (1.31)$$

Время торможения от скорости резания до 0:

$$t_3 = \frac{\omega_p - 0}{\varepsilon} = \frac{0,105 - 0}{251,27} = 0,00042 \text{сек} \quad (1.32)$$

Время разгона до скорости возврата:

$$t_4 = \frac{0 - (-\omega_6)}{\varepsilon} = \frac{0 - (-44,588)}{251,27} = 0,177 \text{сек} \quad (1.33)$$

Время торможения до 0:

$$t_5 = \frac{\omega_6}{\varepsilon} = \frac{78,5}{251,27} = 0,177 \text{сек} \quad (1.34)$$

Найдем угловые перемещения при движении суппорта с ускорением.

Угловое перемещение вала двигателя, осуществленное за время разгона до скорости подачи:

$$\varphi_1 = \frac{\varepsilon t_1^2}{2} = 3,448 \text{ рад} \quad (1.35)$$

Угловое перемещение вала двигателя, осуществленное за время торможения до скорости резания:

$$\varphi_2 = \frac{\omega_6 t_2 - \varepsilon t_2^2}{2} = 0,00988 \text{ рад} \quad (1.36)$$

Угловое перемещение вала двигателя, осуществленное за время торможения от скорости резания до 0:

$$\varphi_3 = \frac{\varepsilon t_3^2}{2} = 2,216 \cdot 10^{-5} \text{ рад} \quad (1.37)$$

Угловое перемещение вала двигателя, осуществленное за время разгона до скорости возврата:

$$\varphi_4 = \frac{\varepsilon t_4^2}{2} = 3,936 \text{ рад} \quad (1.38)$$

Угловое перемещение вала двигателя, осуществленное за время торможения:

$$\varphi_5 = \frac{\varepsilon t_5^2}{2} = 3,936 \text{ рад} \quad (1.40)$$

Найдем перемещение суппорта, соответствующие угловым перемещениям вала двигателя.

Перемещение суппорта, соответствующее угловому перемещению вала ϕ_1 :

$$S_1 = \frac{\phi_1}{2\pi} l = \frac{61,448 \cdot 0,01}{2\pi} = 0,9785 \text{ м} \quad (1.41)$$

Перемещение суппорта, соответствующее угловому перемещению вала ϕ_2 :

$$S_2 = \frac{\phi_2}{2\pi} l = \frac{0,15 \cdot 0,01}{2\pi} = 0,000239 \text{ м} \quad (1.42)$$

Перемещение суппорта, соответствующее угловому перемещению вала ϕ_3 :

$$S_3 = \frac{\phi_3}{2\pi} l = \frac{3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 0,01}{2\pi} = 5,4 \cdot 10^{-7} \text{ м} \quad (1.43)$$

Перемещение суппорта, соответствующее угловому перемещению вала ϕ_4 :

$$S_4 = \frac{\phi_4}{2\pi} l = 0,9785 \text{ м} \quad (1.44)$$

Перемещение суппорта, соответствующее угловому перемещению вала ϕ_5 :

$$S_5 = \frac{\phi_5}{2\pi} l = 0,9785 \text{ м} \quad (1.45)$$

Полное линейное перемещение суппорта $S=4,150 \text{ м}$

Перемещение суппорта, соответствующее равномерному движению на скорости резания v_p равно $S_p=0,005$ м.

Перемещение суппорта, соответствующее равномерному движению на скорости подачи инструмента на рабочую позицию равно:

$$S_6 = S - S_1 - S_2 - S_3 - S_p \quad (1.46)$$

$$S_6 = 4,150 - 0,9785 - 0,000239 - 5,4 \cdot 10^{-7} - 0,005 = 3,1663 \text{ м} \quad (1.47)$$

Перемещение суппорта, соответствующее равномерному движению на скорости возврата v_B (скорость возврата равна скорости подачи рабочего инструмента на рабочую позицию) равно:

$$S_6 = S - S_4 - S_5 = 4,150 - 0,9785 - 0,9785 = 2,193 \text{ м} \quad (1.48)$$

Зная значения линейных перемещений, которые совершил суппорт, двигаясь с постоянными скоростями, значения которых тоже найдены ранее, найдем время равномерного перемещения суппорта.

Время перемещения суппорта на быстрой скорости:

$$t_6 = \frac{s_6}{v_6} = \frac{3,1663}{0,071} = 44,596 \text{ с} \quad (1.49)$$

Время перемещения суппорта на скорости возврата:

$$t_B = \frac{s_B}{v_B} = \frac{2,193}{0,071} = 30,8876 \text{ с} \quad (1.50)$$

Время перемещения суппорта на скорости резания:

$$t_p = \frac{s_p}{v_p} = \frac{0,005}{1,67 \cdot 10^{-4}} = 29.94 \text{с} \quad (1.51)$$

Основываясь на посчитанных значениях, построим тахограмму и нагрузочную диаграмму (рисунок 1.5).

Сначала суппорт разгоняется до скорости подачи инструмента на рабочую позицию (t_1). Затем суппорт перемещается на этой скорости в течение времени t_6 .

Приближаясь к рабочей позиции суппорт замедляется, пока скорость подачи не станет равна v_{np} (t_2). Начинается обработка трубы.

Труба обрабатывается за время ($t_p + t_3$). В течение промежутка времени t_p скорость привода остается постоянной и равной v_{np} . За время t_3 привод замедляется до 0. Обработка трубы закончена и привод начинает возвратное движение.

За время t_4 привод разгоняется до скорости возврата v_v . Она равна скорости подачи инструмента на рабочую позицию v_6 , но противоположна по направлению.

В течение времени t_v привод движется с постоянной скоростью v_v . Затем происходит торможение привода до 0 за время t_5 .

При подаче привода на рабочую позицию и возвратном движении приведенный к валу двигателя момент равен приведенному моменту сил трения. Момент сил трения – реактивный, т.е. при изменении направления вращения вала двигателя, изменяется и знак прикладываемого статического момента.

При обработке трубы приведенный к валу двигателя момент равен сумме приведенного момента сил трения и приведенного момента осевой силы резания.

Динамические моменты действуют на двигатель только во время ускорения и торможения привода. Во время ускорения при значении скорости больше 0, динамический момент положительный. Во время замедления при значении скорости больше 0 динамический момент отрицательный. Во время ускорения при значении скорости меньше 0 динамический момент отрицательный. Во время замедления при значении скорости меньше 0 динамический момент положительный.

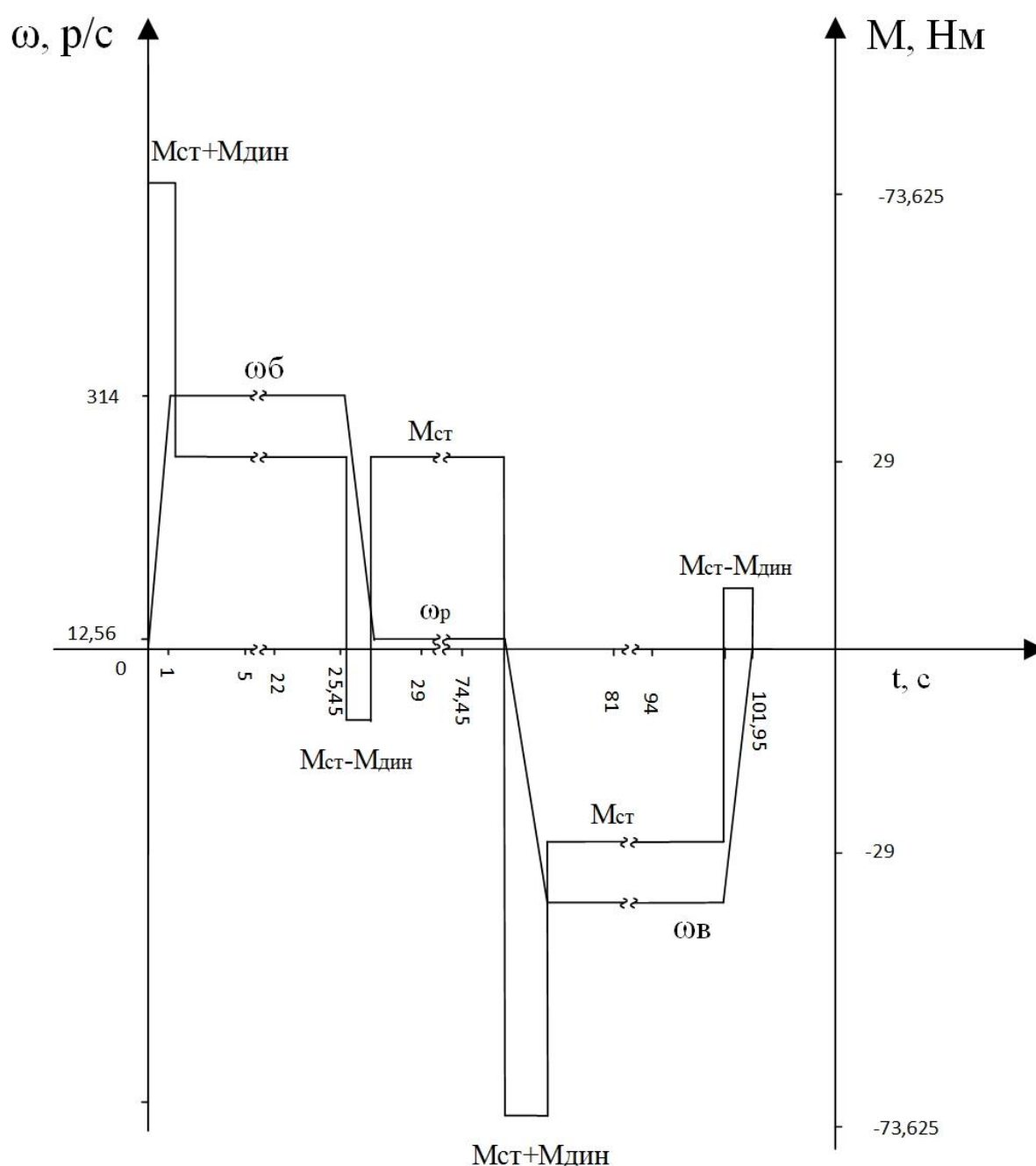


Рис 1.2 –Тахограмма и нагрузочная диаграмма механизма

1.6 Выбор основного силового оборудования

Выбор двигателя

Проверим синхронный электродвигатель с постоянными магнитами фирмы siemens серии 1FT6105-8AF7, мощность которого равна 9,7 кВт, номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}=3000$ об/мин, номинальный ток $I_{\text{ном}}=22,5$ А, номинальный момент $P_{\text{ном}} = 31 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Проверка по мощности

Для проверки двигателя выполним предварительный расчет требуемой мощности.

Номинальная мощность двигателя должна превышать или быть равной мощности, требуемой от двигателя при максимальном статическом моменте нагрузки, который определен требованиями технологии процесса:

$$P_{\text{н}} \geq P_{\text{тр}} = (1,2 \div 1,4) \frac{M_{\text{с}}}{\lambda} \cdot \omega_{\text{н}}, \quad (1.52)$$

где $1,2 \div 1,4$ - коэффициент запаса;

$M_{\text{с}}$ – максимальный статический момент, приведенный к валу двигателя,

λ – перегрузочная способность двигателя по моменту,

$\omega_{\text{н}}$ – номинальная угловая скорость, рад/с.

$$P_{\text{тр}} = 1,2 \cdot \frac{57,445}{2,5} \cdot \frac{3000 \cdot 2\pi}{60} = 8,658, \quad (1.53)$$

$$9,7 \text{ кВт} \geq 8,658. \quad (1.54)$$

Проверка выбранного двигателя по условию нагрева

Для проверки по условию нагрева двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, синхронных и асинхронных двигателей, при условии что магнитный поток при работе двигателя – номинальный, наиболее распространенным методом является метод эквивалентного момента.

Этот метод удобен тем, что при вычислениях эквивалентного момента используются данные нагрузочной диаграммы.

Значение эквивалентного момента находится по формуле:

$$M_H \geq M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n M_{\text{фи}}^2 t_i}, \quad (1.55)$$

где $M_{\text{экв}}$ – эквивалентный момент,

$t_{\text{ц}}$ – время цикла,

$M_{\text{фи}}$ – момент, приложенный к валу двигателя,

t_i – длительность приложения к валу момента $M_{\text{фи}}$.

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{(M_c - M_{\text{дин}})^2 \cdot (t_2 + t_3 + t_5) + M_c^2 \cdot (t_6 + t_b + t_p) + (M_c + M_{\text{дин}})^2 \cdot (t_1 + t_4)}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_p + t_b}} = \quad (1.56)$$
$$= 29,851 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Из расчетов видно, что эквивалентный момент меньше номинального.

Проверка выбранного двигателя по перегрузке

Для проверки выбранного двигателя по перегрузке максимальный момент берется равным наибольшему моменту на нагрузочной диаграмме.

Максимальный момент сравнивается с наибольшим допустимым значением момента двигателя(1.21).

Условие прохождения двигателя проверки по перегрузке:

$$M_{\max} \leq M_{\text{доп}}, \quad (1.57)$$

где M_{\max} — максимальный момент,

$M_{\text{доп}}$ — допустимый момент двигателя(77,5Н).

Рассчитаем максимальный момент:

$$M_{\max} = M_c + M_{\text{дин}} = 77,325 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (1.58)$$

Из расчетов видно, что двигатель проходит проверку по перегрузке.

Обязательным условием для промышленных электроприводов считается запас по мощности, составляющий 20%. Проверка двигателя на перегрев и перегрузку доказывают, что для данного двигателя это условие выполняется.

Выбор преобразователя частоты

Основное назначение преобразователя частоты – это регулирование скорости трехфазного асинхронного или синхронного электродвигателя, при этом энергопотребление существенно снижается.

Помимо этого преобразователь частоты может регулировать момент двигателя.

Силовая часть частотно-регулируемого электропривода переменного тока состоит из двух основных элементов (рисунок 1.3): синхронного электродвигателя и преобразователя частоты, включенного между двигателем и сетью. Преобразователь частоты не только обеспечивает эффективное

регулирование частоты вращения двигателя изменением частоты напряжения на его входе, но и необходимые значения тока и напряжения.

Любой преобразователь частоты всегда имеет блок выпрямления и шину постоянного тока, но у некоторых этот блок внутренний. У данного ПЧ блок питания внешний.

В нашем случае ПЧ подключен к нескольким двигателям, а каждый узел станка для снятия фаски имеет индивидуальный инвертор. На рисунке 1.6 упрощенная силовая схема преобразователя.

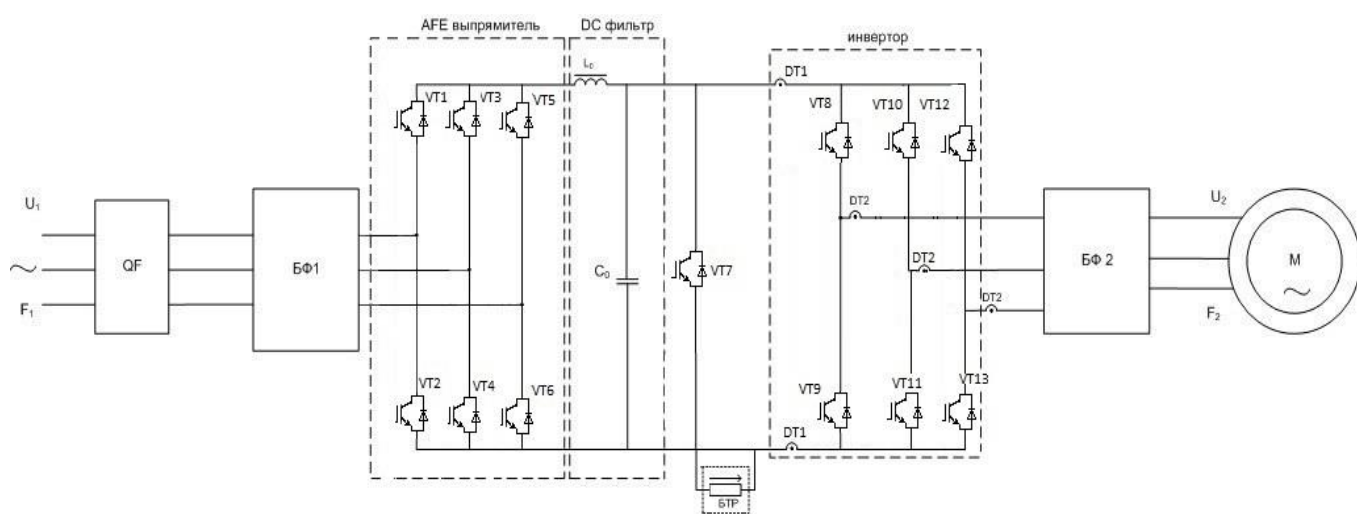


Рисунок 1.3 – Схема двухзвенного преобразователя частоты на основе автономного инвертора напряжения, работающего на двигатель переменного тока

Исходя из принципа, в котором коэффициент перегрузочной способности преобразователя частоты $\lambda_{пч}$ должен быть меньше коэффициента перегрузочной способности двигателя λ_d , выберем преобразователь частоты по формуле (1.59):

$$I_{пч} = \frac{\lambda_d}{\lambda_{пч}} \cdot I_d, \quad (1.59)$$

где $I_{пч}$ – номинальный ток преобразователя, А;

I_d – номинальный ток двигателя (22,5 А);

λ_d – перегрузочная способность двигателя (2,5);

$\lambda_{пч}$ – перегрузочная способность преобразователя частоты.

Исходя из паспортных данных двигателя и режима работы привода, отметим наиболее подходящий преобразователь частоты фирмы Siemens sinamics 6SE7023-4T C51-Z, характеристики которого приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры преобразователя частоты Siemens

Наименование параметра	Обозначение	Величина
Максимальная мощность двигателя	кВт	15
Номинальный выходной ток	А	34
Ток перегрузки	А	54,4
Номинальный ток звена постоянного тока	А	40,5
Потребляемый ток	А	64,9
Потери при 5 кГц	кВт	0,59
Примерный вес	кг	21

Преобразователь частоты может эксплуатироваться от сети постоянного тока с напряжением в диапазоне параметров, указанных на табличке с техническими данными. При помощи инвертора из постоянного напряжения промежуточного звена методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ) производится система трехфазного тока с переменной выходной частотой от 0 Гц и максимально до 600 Гц.

Питание внутренним напряжением 24 VDC обеспечивается встроенным блоком питания. Устройство управляется внутренней электронной схемой регулирования, функции обеспечиваются программным обеспечением устройства.

1.7 Защиты привода, расчет уставок защитных устройств

Даже для правильно спроектированных и эксплуатируемых электроприводов при их работе всегда остается вероятность появления режимов, аварийных или ненормальных для двигателя и другого электрооборудования.

Для того чтобы защитить электродвигатель от повреждений при нарушении нормальных условий работы, а также своевременно отключить неисправный двигатель от сети, предотвратив или ограничив тем самым развитие аварии, предусматриваются средства защиты.

В зависимости от характера возможных повреждений и ненормальных режимов работы различают несколько основных наиболее распространенных видов электрической защиты синхронных двигателей.

Защита от коротких замыканий отключает двигатель при появлении в его силовой (главной) цепи или в цепи управления токов короткого замыкания.

Защита от перегрузки предохраняет двигатель от недопустимого перегрева, в частности и при сравнительно небольших по величине, но продолжительных тепловых перегрузках. Защита от перегрузки должна применяться только для электродвигателей тех рабочих механизмов, у которых возможны ненормальные увеличения нагрузки при нарушениях рабочего процесса.

К двигателю на трубофасочной установке следует применить защитные действия в случае возникновения неполадок в работе. По общим стандартам и правилам пользования электроустановок при отклонении показателей нормы на 5% срабатывает защита и оборудование отключается. Функцию аварийного выключения выполняет автоматический выключатель, в нашем случае целесообразно установить именно его.

Автоматические выключатели являются защитными аппаратами многократного действия и предназначены так же для защиты преобразователей от внешних коротких замыканий, опрокидывания инвертора и перегрузок по току.

Выключатели устанавливаются на стороне переменного и выпрямленного тока.

Автоматический выключатель (АВ) выбирают по номинальному току выключателя $I_{н\text{выкл}}$ и номинальному току расцепителя $I_{н\text{расц}}$.

Рассчитаем номинальный ток расцепителя по формуле:

$$I_{н\text{расц}} = \frac{I_{дл}}{K_T}, \quad (1.60)$$

где $I_{дл} = I_{н\text{дв}}$ – длительный ток в линии, А;

$I_{н\text{дв}}$ – номинальный ток двигателя, А;

K_T – тепловой коэффициент, учитывающий условия установки АВ;

$$I_{н\text{расц}} = \frac{22,5}{0,85} = 26,4 \text{ А}. \quad (1.61)$$

Из каталога автоматических выключателей выберем наиболее подходящий автомат Siemens 3wl 1106 с характеристикой $I_{н\text{выкл}} = 630 \text{ А}$. Тогда должно выполняться условие:

$$10 \cdot I_{н\text{расц}} \geq K \cdot I_{кр}, \quad (1.62)$$

где $K = 1,25$ – коэффициент, учитывающий неточность определения максимального кратковременного тока в линии;

$I_{кр}$ – максимальный кратковременный ток, А.

Проверка:

$$10 \cdot I_{н\text{расц}} = 6300 \text{ А}, \quad (1.63)$$

$$I_{\text{кр}} = K \cdot I_{\text{н}} = 1035 \text{ A} , \quad (1.64)$$

$$6300 \geq 1239,8 . \quad (1.65)$$

Неравенство 1.62 выполняется, значит, автоматический выключатель выбран правильно.

2 РАЗРАБОТКА САУ

2.1. Разработка архитектуры системы автоматизации

Согласно пунктам 1.1 и 1.2 настоящей работы, где подробно проиллюстрирован технологический процесс, выполним разработку архитектуры архитектуры автоматизации мехатронной системы привода подачи торцефасочной установки цеха «Высота 239» ПАО «ЧТПЗ». Представим архитектуру системы автоматизации в общем виде на рисунке 3.

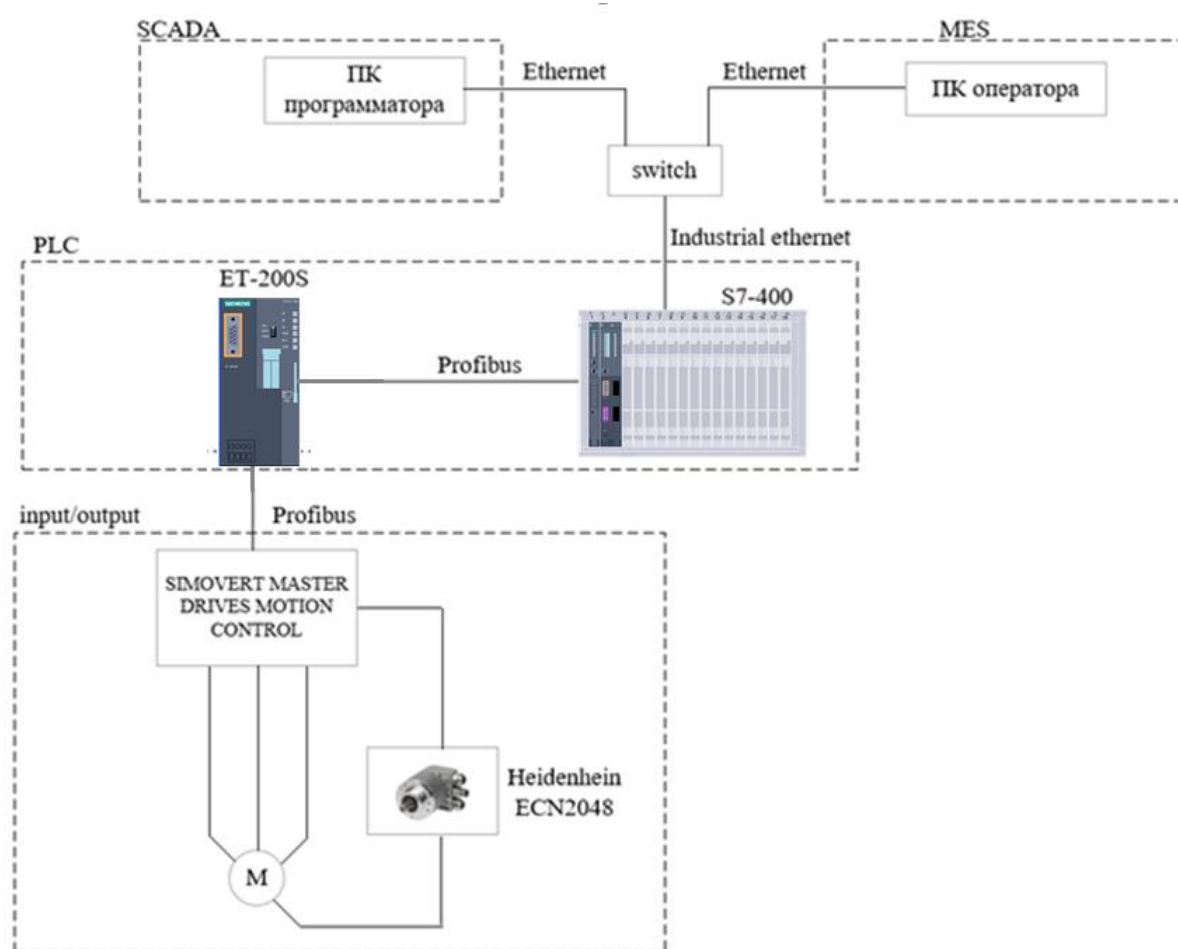


Рисунок 2.1 – Архитектура системы автоматизации.

2.2. Выбор контроллера и датчиков технологических координат

Продукты SIMATIC спроектированы для промышленного применения и соответствуют требованиям к излучению помех (EN 61000-6-4: 2001) и помехоустойчивости (EN 61000-6-2: 2001).

Siemens SIMATIC S7-400 – это модульный программируемый контроллер, предназначенный для построения систем автоматизации средней и высокой степени сложности. Названия и назначение каждого модуля представлены в таблице 1. Модульная конструкция, работа с естественным охлаждением, применение структур локального и распределенного ввода-вывода, широкие коммуникационные возможности, множество функций, поддерживаемых на уровне операционной системы, удобство эксплуатации и обслуживания обеспечивают возможность получения рентабельных решений для построения систем автоматического управления в различных областях промышленного производства.

Модули S7-400 удовлетворяют, среди прочего, требованиям законодательства Европейского внутреннего рынка об электромагнитной совместимости – способность электрического оборудования работать удовлетворительно в электромагнитной среде, не оказывая вредного воздействия на эту среду.

Времена выполнения команд около 0,1 мкс позволяет использовать контроллер для решения широкого спектра задач автоматизации. Поддержка математики с плавающей запятой позволяет поддерживать сложные комплексные алгоритмы цифровой обработки информации. Для настройки параметров всех модулей используются простые инструментальные средства с единым интерфейсом пользователя. Это существенно снижает затраты на обучение персонала. Человеко-машинный интерфейс (HMI): Функции обслуживания человеко-машинного интерфейса встроены в операционную систему контроллера S7-400. Эти функции позволяют существенно упростить программирование: система или устройство человеко-машинного интерфейса SIMATIC HMI

запрашивает необходимые данные у контроллера SIMATIC S7-400, контроллер передает запрашиваемые данные с заданной периодичностью. Все операции по обмену данными выполняются автоматически под управлением операционной системы контроллера. Все задачи выполняются с использованием одинаковых символьных имен и общей базы данных.

Таблица 1 – Назначение модулей котроллеров серии SIMATIC S7-400

Название	Назначение
CPU	Модуль центрального процессора. В зависимости от степени сложности решаемых задач в программируемом контроллере могут использоваться более 20 типов центральных процессоров
PS	Блоки обеспечивающие подключение S7-400 к источникам питания =24/ 48/ 60/ 120/ 230 В или ~120/ 230 В.
SM	Сигнальные модули, предназначенные для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов .
CP	Коммуникационные процессоры, организующие последовательную передачу данных через PtP интерфейс, построение систем распределенного ввода-вывода на основе PROFIBUS DP и PROFINET IO, обмена данными через промышленные сети PROFIBUS, PROFINET и Industrial Ethernet, а также через Internet.

Продолжение таблицы 1

Название	Назначение
FM	Функциональные модули для решения типовых задач управления, к которым можно отнести скоростной счет, позиционирование, автоматическое регулирование и т.д.
IM	Интерфейсные модули для построения систем локального и распределенного ввода-вывода.

Остановимся на модуле центрального процессора CPU 417-4, так как это наиболее мощный центральный процессор программируемого контроллера SIMATIC S7-400.

Таблица 2 – Технические характеристики модуля центрального процессора CPU 417-4 контроллера SIMATIC S7-400

Параметр	Значение
Рабочая память	30 МБ
Загружаемая память	256 КБ – 64 МБ
Время выполнения двоичных операций	0.018 мкс
Количество флагов/таймеров/счетчиков	65536/2048/2048
Количество каналов ввода-вывода, дискретных/аналоговых, не более	65536/4096

Продолжение таблицы 2

Параметр	Значение
Рабочая память	30 МБ
Загружаемая память	256 КБ – 64 МБ
Время выполнения двоичных операций	0.018 мкс
Количество флагов/таймеров/счетчиков	65536/2048/2048
Количество каналов ввода-вывода, дискретных/аналоговых, не более	65536/4096
Встроенные интерфейсы	MPI/DP + PROFIBUS DP
Количество активных коммуникационных соединений, не более	32
Габариты, мм	50 x 290 x 219

Выберем блок питания PS 405; 4А

Выходной ток 4 А; выходное напряжение 24 В постоянного тока; регулируемое, устойчивое при коротком замыкании и холостом ходе; подключение к однофазной системе переменного тока (номинальное входное напряжение 120/230 В переменного тока, 50/60 Гц); надежная гальваническая развязка в соответствии с EN 60 950; может быть использован как источник питания нагрузки. Опишем его технические характеристики в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики блока питания контроллера PS 405; 4 А

Параметр	Значение
Номинальное входное напряжение, В	230 переменного тока

Продолжение таблицы 3

Параметр	Значение
Параметр	Значение
Номинальная частота сети, Гц	От 50 до 60
Допустимый диапазон частоты сети, Гц	От 47 до 63
Номинальный входной ток, А	0.55
Пусковой ток при 25 °С, А	8.25
Номинальное значение выходного напряжения, В	24 постоянного тока
Допустимый диапазон выходного напряжения	(24 ± 5) %, устойчиво без нагрузки
Максимальное время нарастания, с	2.5
Номинальное значение выходного тока, А	4 А
Защита от короткого замыкания	электронная, без фиксации (1,1...1,3)I _{НОМ}
Остаточные пульсации, мВ	макс. 150 (пиковое значение)
Электрические параметры	
КПД	0.89
Потребляемая мощность, Вт	270
Мощность потерь, Вт	тип. 30
Размеры и вес	
Габариты, мм	25x 290 x 217
Вес, кг	0.8

Рассмотрим модульную станцию систем распределенного ввода-вывода ET 200S (IM 151-7 CPU)

В сочетании с обычными интерфейсными модулями станция ET 200S выполняет:

функции стандартного ведомого DP устройства в сети PROFIBUS DP;

функции прибора ввода-вывода в сети PROFINET IO. Ведущее устройство PROFIBUS DP/ контроллер ввода-вывода PROFINET IO способен опрашивать входы станции и управлять состояниями ее выходов.

Операции конфигурирования, программирования и обслуживания входов и выходов систем локального и распределенного ввода-вывода программируемых контроллеров абсолютно идентичны.

Сетевой обмен данными обслуживается интерфейсным модулем ведущего сетевого устройства и модулем IM 151 станции ET 200S.

В зависимости от типов используемых интерфейсных модулей передача данных может осуществляться по электрическим или оптическим каналам связи сети PROFIBUS DP или PROFINET IO.

Рассмотрим абсолютный энкодер Heidenhain ECN2048. Его технические характеристики представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Технические характеристики абсолютного энкодера ECN2048

Параметр	Значение
Абсолютные координаты положения	EnDat 2.2
Разрешение, имп/об.	8192 (13 бит)
Код	двоичный
Электрич. допустимые обороты погрешности для пост. Координаты положения	≤ 12000 об/мин
Время вычисления	≤ 5 мкс

Продолжение таблицы 4

Параметр	Значение
Время вычисления	≤ 5 мкс
Точность системы	$\pm 20^\circ$
Напряжение питания	от 3,6 до 14 В
Потребление тока (без нагрузки)	≥ 160 мА
Механич. допустимая частота вращения n	≤ 6000 об/мин $\geq 12\,000$ об/мин.
Начальный пусковой момент при 20 °С	полый тупиковый вал: $\leq 0,01$ Нм сквозной полый вал: $\geq 0,025$ Нм
Начальный пусковой момент ниже 20 °С	≥ 1 Нм
Доп. смещение вала вдоль оси	1 мм
Макс. рабочая температура	UP = 5 В: 100 °С UP = от 10 до 30 В: 85 °С
Мин. рабочая температура	Фланец или кабель закреплены: –40 °С Кабель не закреплен: –10 °С
Степень защиты ECN 2048	корпус: IP 67; на входе вала: IP 64
Масса	0.3 кг

2.3 Разработка функциональной схемы автоматизированной системы регулирования электропривода

Привод подачи торцефасочной установки для снятия фаски должен обеспечивать регулирование скорости подачи шпинделя, а так же регулирование положения шпинделя. Одной из задач регулирования является необходимость

обеспечить широкий диапазон скоростей. Для выполнения этой задачи регулирования целесообразно использовать преобразователь частоты, работающий в режиме векторного управления.

Формирование требуемых статических и динамических свойств синхронного электропривода возможно лишь в замкнутой системе регулирования его координат. На рисунке 2.2 представлена функциональная схема системы автоматического регулирования (САР) электропривода подачи установки для снятия фаски. Для регулирования положения привода используют трехконтурную систему регулирования.

На этой схеме кроме синхронного электродвигателя (СД) и преобразователя частоты (ПЧ) содержится регулятор скорости, регулятор положения и датчики (в нашем случае – датчики скорости ДС и положения ДП, сигнал на которые поступает с абсолютного энкодера (АЭ)). Задающим сигналом является сигнал положения $U_{зп}$, который может изменяться в диапазоне $\pm 10\text{В}$. Выходные сигналы регуляторов, зависящие от управляющих воздействий, сигналов обратных связей и принятых алгоритмов регулирования, являются сигналами управления частотой, выходным напряжением и током ПЧ.

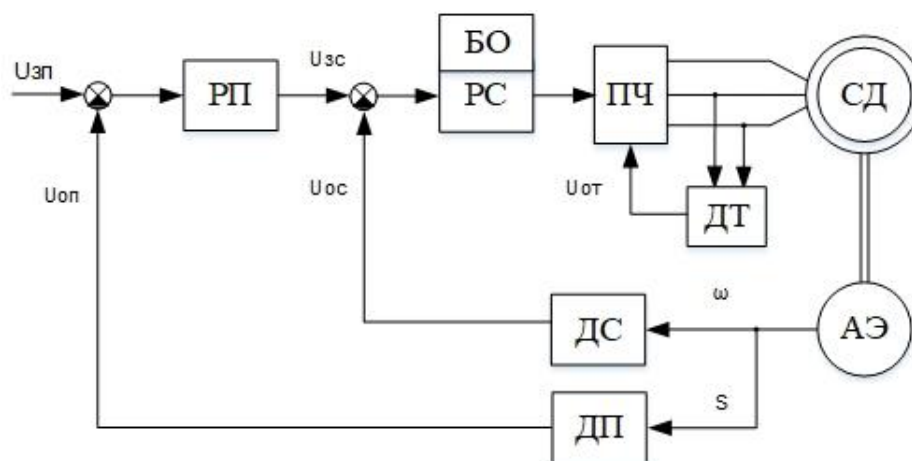


Рисунок 2.2 – Функциональная схема системы автоматического регулирования электропривода подачи шпиндельной бабки

2.4 Разработка контура регулирования технологических координат

Упрощенная структурная схема системы автоматического регулирования (САР) момента, скорости и положения представлена на рисунке 2.3. Она содержит оптимизированный контур момента, контур скорости и контур положения. Объектом управления является синхронный двигатель.

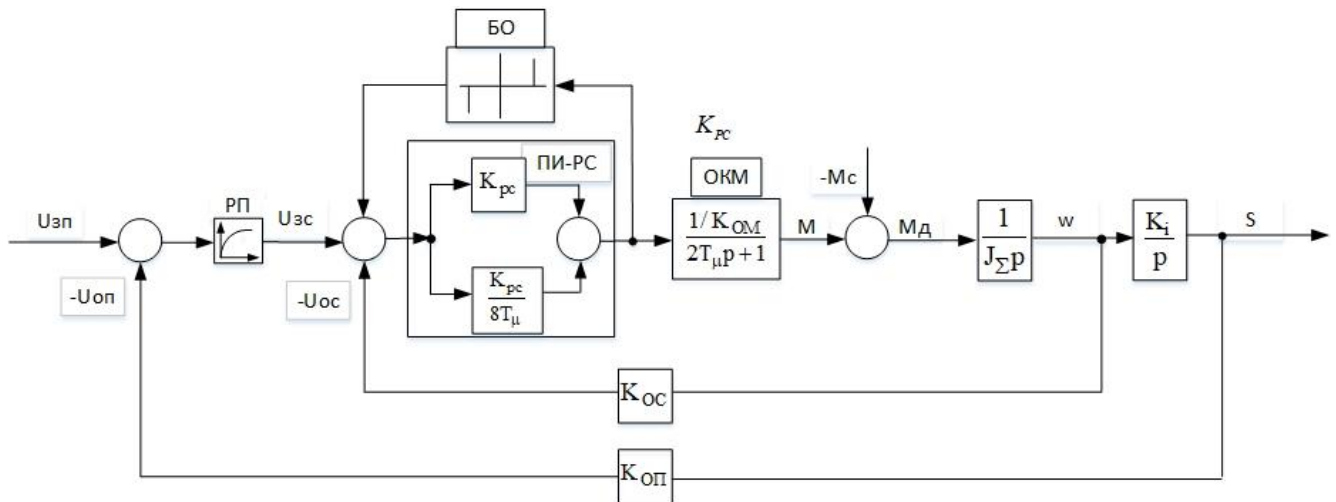


Рисунок 2.3 - Упрощенная структурная схема регулирования положения, перемещением СД с аппроксимированным внутренним ОКМ

Оптимизированный контур регулирования момента (ОКМ), включает в себя:

- преобразователь частоты с постоянной времени T_{μ} ,
- статорную цепь с электромагнитной постоянной времени $T_{эс}$,
- регулятор момента, который настраивается на модульный оптимум.

Преобразователь частоты – самый быстродействующий элемент системы, включающей в себя преобразователь частоты и двигатель. Значение постоянной времени принимается равным $T_{\mu} = 0,001с.$

В теории автоматического управления, ввиду малости постоянной времени T_{μ} , допускается проводить аппроксимацию внутреннего оптимизированного контура.

На рисунке 2.3 ОКМ представляет собой колебательное звено с постоянной времени T_μ с временными характеристиками, соответствующими настройке на модульный оптимум.

Коэффициент обратной связи по моменту рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ом}} = \frac{U_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}, \quad (2.1)$$

где U_{max} – максимальное напряжение управления,
 $M_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя.

$$K_{\text{ом}} = \frac{10}{31} = 0,32258, \quad (2.2)$$

При разработке контура регулирования скорости, принято во внимание требование свести к 0 статическую ошибку. Выбирая между П-регулятором и ПИ-регулятором, мы предпочли ПИ-регулятор. Таким образом, контур скорости настроен на симметричный оптимум.

Передаточная функция регулятора скорости:

$$W_{PC}(p) = \frac{T_{PC}p + 1}{T_{ИРС}p} = K_{PC} + \frac{K_{PC}}{8T_\mu p}. \quad (2.3)$$

Регулятор скорости представлен на рисунке 2.4.

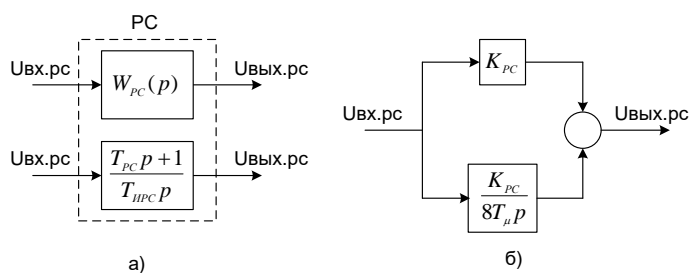


Рисунок 2.4 - Структура регулятора скорости

Регулятор скорости может быть представлен либо в виде дробно-рациональной функции, либо в виде 2 параллельно соединенных звеньев: пропорционального звена, коэффициент которого равен K_{pc} , и интегрального звена, с передаточной функцией равной $\frac{K_{pc}}{8T_{\mu}p}$.

Найдем параметры контура регулирования скорости, объектом регулирования которого является аппроксимированный контур момента.

Контур регулирования скорости содержит пропорционально-интегральный регулятор скорости и обратную связь по скорости.

Коэффициент обратной связи по скорости равен:

$$K_{oc} = \frac{U_{zc}}{\Omega_{ном}} = \frac{10}{314} = 0,031847, \quad (2.4)$$

Коэффициент передачи регулятора определяется выражением:

$$K_{pc} = \frac{K_{ом} J_{\Sigma}}{4T_{\mu} K_{oc}} = \frac{0,32258 \cdot 0,1776}{4 \cdot 0,001 \cdot 0,031847} = 499,729. \quad (2.5)$$

На рисунке 2.5 представлена упрощенная структурная схема контура регулирования скорости.

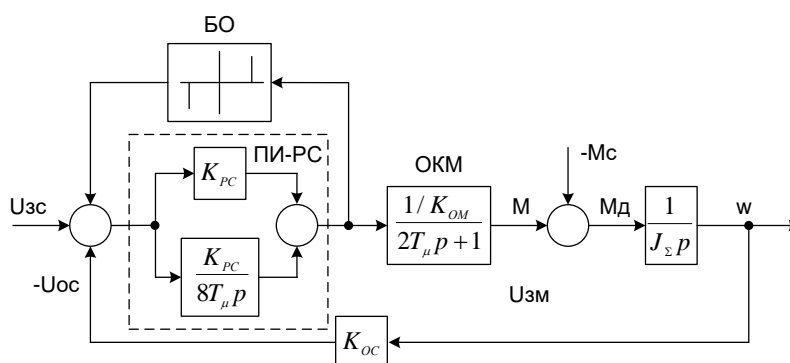


Рисунок 2.6 – Контур регулирования скорости

Блок ограничения скорости БО ограничивает значение тока фазных обмоток двигателя и электромагнитного момента. Для пропорционально-интегрального регулятора он реализуется с помощью блока saturation на выходе регулятора и заменой интегратора в интегральном звене на блок integrator limited (рис.2.7).

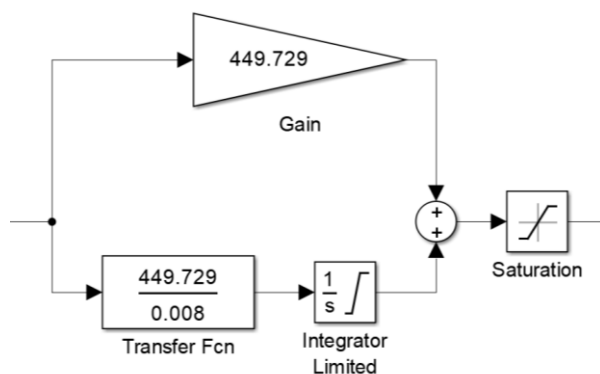


Рисунок 2.7 – Реализация ПИ-регулятора с блоком ограничения

Контур регулирования положения является внешним. Если считать контур регулирования скорости оптимизированным, то согласно принципам подчинённого регулирования, структурная схема контура регулирования положения может быть представлена в следующем виде:

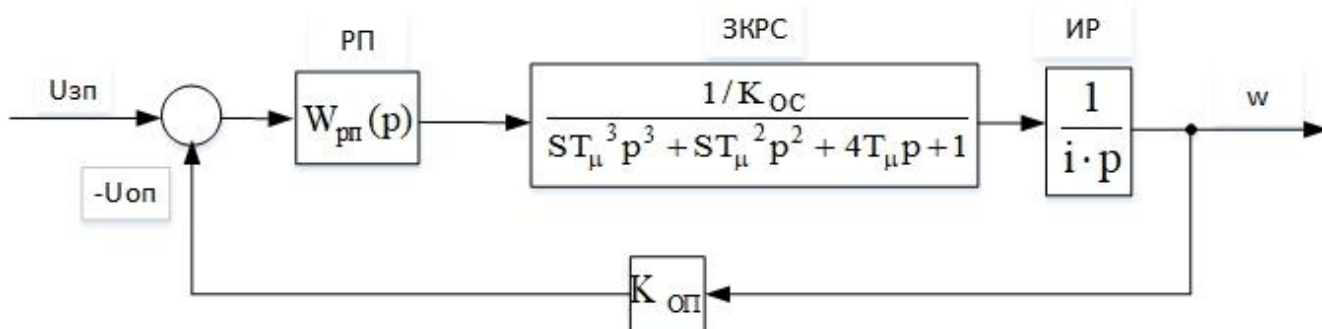


Рисунок 2.7 – Структурная схема контура регулирования положения

Аналогично контуру регулирования скорости, исходя из того, что передаточная функция объекта регулирования третьего контура W_{03} – интегрирующее звено, РП должен быть пропорциональным, однако

регулирование положения имеет свои особенности. В системе предусматриваются ограничения выходов регуляторов положения и скорости, и, в зависимости от величины заданного перемещения, могут проявляться существенные нелинейности. Различают режимы больших, средних и малых перемещений, их реализация наглядно показана на рисунке 2.8.

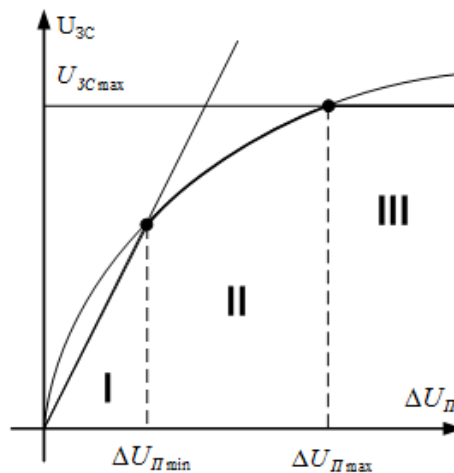


Рисунок 2.8 – Зависимость формируемого сигнала задания регулятора положения от напряжения, приходящего на вход.

Под цифрой I на рисунке 2.8 – область малых перемещений. Малые перемещения характеризуются тем, что ни одна из регулируемых координат не достигает установившегося значения. Сигнал задания U_{zc} пропорционален напряжению $\Delta U_{п}$, приходящему на вход регулятора и вычисляется по формуле:

$$U_{zc} = K_{рпм} \cdot \Delta U_{п}, \quad (2.7)$$

где $K_{рпм}$ – коэффициент регулятора положения для малых перемещений.

$$K_{рпм} = \frac{K_{oc}}{16 \cdot T_{\mu} \cdot k_{оп} \cdot k_{и}} = 1,8 \cdot 10^3 \quad (2.8)$$

где $K_{oc}, K_{оп}$ – коэффициенты обратной связи.

Границу малых перемещений можно найти по формуле:

$$\Delta U_{пм} = 2 \cdot e_{Tmax} \cdot K_{оп} K_{и} (16T_{\mu})^2 = 1,423 \cdot 10^{-4} \text{ В}, \quad (2.9)$$

где e_{Tmax} – максимальное угловое ускорение.

Под цифрой II на рисунке 2.8 – область средних перемещений. Средние перемещения характеризуются тем, что установившегося значения достигает ток (момент), при этом скорость образует треугольную тахограмму.

Сигнал задания $U_{зс}$ пропорционален квадратному корню напряжения $\Delta U_{п}$, приходящему на вход регулятора и вычисляется по формуле:

$$U_{зс} = K_{рпс} \cdot \sqrt{\Delta U_{п}} \quad (2.9)$$

где $K_{рпс}$ – коэффициент регулятора положения для средних перемещений.

$$K_{рпс} = K_{oc} \sqrt{\frac{2 \cdot e_{Tmax}}{K_{оп} K_{и}}} = 21,469, \quad (2.10)$$

Границу средних перемещений можно найти по формуле:

$$\Delta U_{пср} = \frac{\omega^2 K_{оп} K_{и}}{2e_{Tmax}} = 0,217 \text{ В} \quad (2.11)$$

Если ЭП отрабатывает сигнал задания с выходом на установившуюся допустимую скорость при максимально допустимом динамическом токе якоря, то

в системе участвуют две нелинейности – ограничения выхода РП и РС. Такой режим соответствует режиму больших перемещений.

В режиме больших перемещений ограничивается ток якоря и заданная установившаяся скорость, следовательно, в этом режиме двигатель будет разгоняться и тормозиться при постоянном заданном ускорении ϵ , а его скорость не превысит максимально допустимое значение ω_m .

Сигнал задания U_{zc} при больших напряжениях постоянен и равен 10.

$$U_{zc6} = 10V \quad (2.12)$$

На рисунке 2.9 представлена реализация регулятора положения.

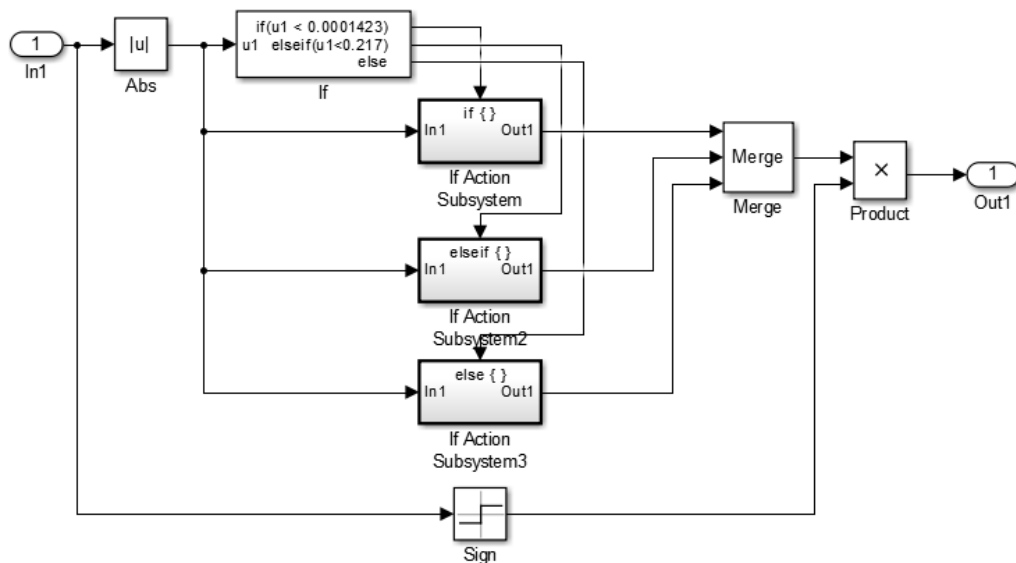


Рисунок 2.9 – Реализация трехпозиционного регулятора положения в программном обеспечении Matlab Simulink

2.5 Моделирование типовых режимов работы

На рисунке 2.10 изображена реализация структурной схемы САР привода подачи в программном обеспечении Matlab Simulink.

На Scope выведены выходные сигналы момента, скорости и положения.

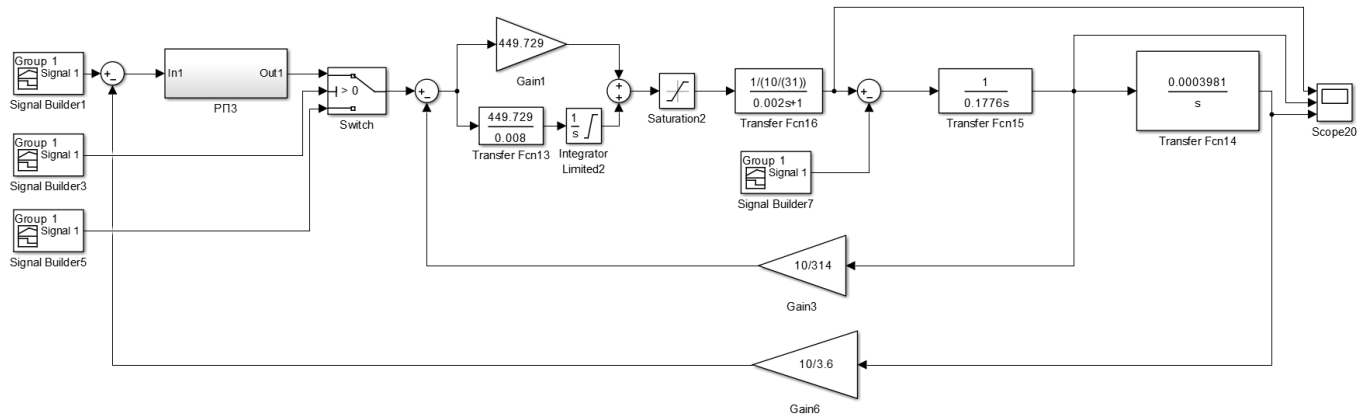


Рисунок 2.8 – Математическая модель САР привода подачи

Элемент Switch на рисунке 28 позволяет системе работать как системе регулирования скорости в заданный промежуток времени. Он сравнивает напряжение задания U_3 , подаваемое на него с элемента Signal Builder3, с 0, и если напряжение U_3 меньше 0, то Switch переключается в положение 2.

С элемента Signal Builder5 сигнал задания идет на регулятор скорости.

Это дает возможность при обработке трубы обеспечить постоянную скорость подачи $V_{\text{през}}$.

Промежуток времени, при котором сигнал задания меньше 0, соответствует промежутку времени на тахограмма, в течение которого идет обработка трубы.

На рисунке 2.9 представлен сигнал задания на Signal Builder 3.

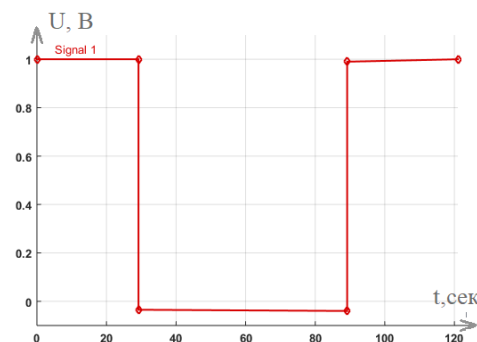


Рисунок 2.9 – сигнал задания на Signal Builder 3

Исходя из анализа переходных процессов, представленном на рисунке 2.9 получено что, перерегулирование по моменту не превышает 4,3 %, а статическая просадка скорости, при приложении номинального момента статического сопротивления, составляет 0 %.

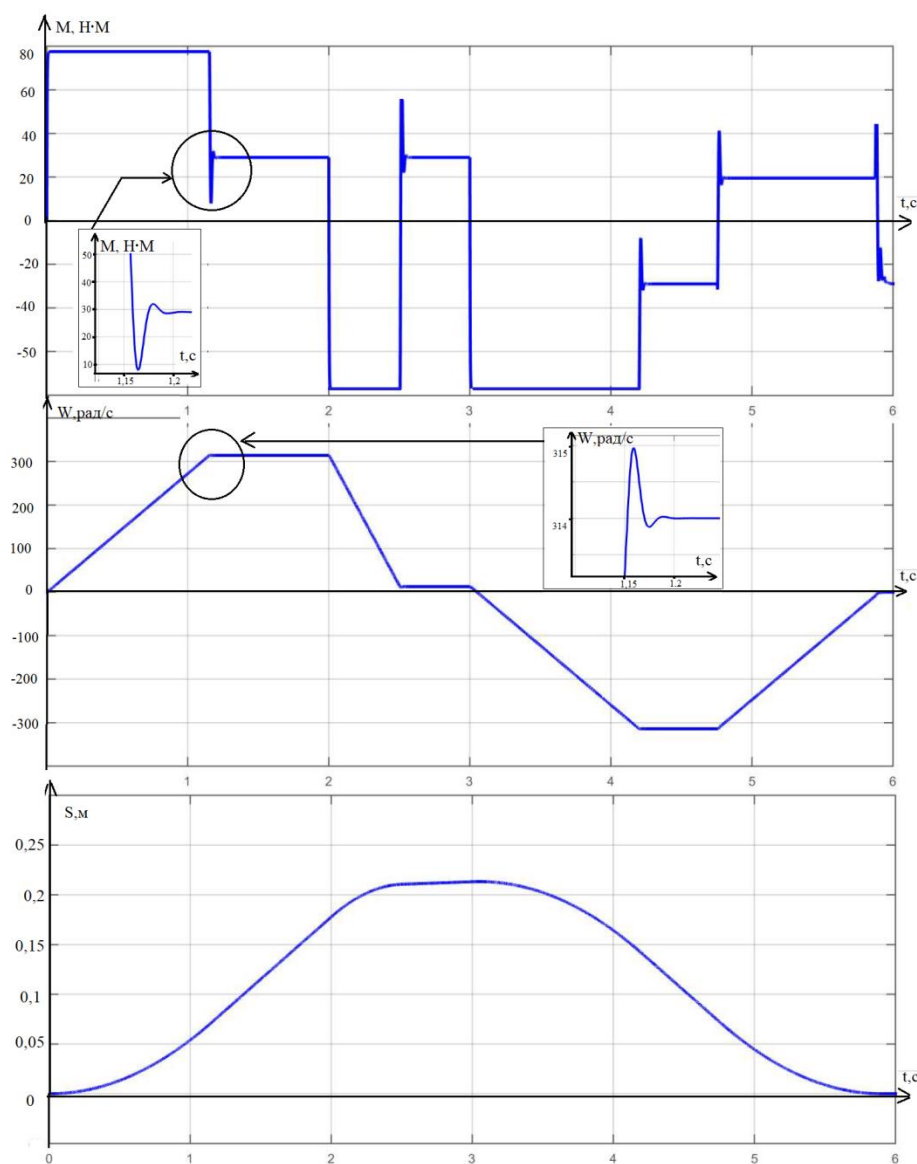


Рисунок 2.10 – Переходные процессы

Реализация САР заключается в программировании готовых функциональных блоков, которые находятся в памяти модуля управления ПЧ. Основное преимущество данной системы заключается в её высокой точности и удобстве наладки.

3 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

3.1 Расчет производственной программы цеха и фактического годового фонда рабочего времени

Производственная программа или годовой объем производства продукции определяется производительностью агрегата в единицу рабочего времени и фондом рабочего времени.

$$W_{\Gamma} = P \cdot T_{\Phi}, \quad (3.1)$$

где W_{Γ} - производственная мощность (годовой выпуск продукции), т/год;

P - производительность агрегата, т/ч;

T_{Φ} - годовой фактического фонд рабочего времени оборудования, ч.

Из формулы видно, что для расчета производственной программы цеха необходимо знать фактическое время работы агрегатов за год и производительность их в единицу времени (до и после реконструкции).

Расчет производственной программы цеха начинается с составления баланса времени работы агрегата. При этом рассчитывают календарное, номинальное и фактическое время работы. Календарным временем считается все время нахождения агрегата в эксплуатации, независимо от времени его ремонтов и простоев.

Так как установка для снятия фаски находится в работе круглый год ($T_{\text{вых}}=0$ – выходные дни, ч; $T_{\text{прз}}=0$ – праздничные дни, ч.), то в пересчёте на часы календарное время $T_{\text{кал}}$ составит 8760 ч.

Номинальное время работы определяется исключением времени простоев на ремонтах из календарного времени работы.

Годовой фонд рабочего времени:

$$T_{\phi} = T_{\text{кал}} - T_{\text{кр}} - T_{\text{тр}} - T_{\text{пр}} = 8760 - 388 - 25 - 9 = 8338 \text{ ч}, \quad (3.2)$$

где $T_{\text{кал}} = 24 \cdot 365 = 8760 \text{ ч}$ – календарное время работы,

$T_{\text{кр}} = 388 \text{ ч}$ – время, затраченное на капитальные ремонты, ч,

$T_{\text{тр}} = 25 \text{ ч}$ – время, затраченное на текущие ремонты, ч,

$T_{\text{пр}} = 9 \text{ ч}$ – время, затраченное на текущие простои, ч.

Производительность трубофасочной установки $P = 22,238$ трубы в час.

Производственная программа или годовой объем выпущенной продукции определяется производительностью агрегата в единицу времени и фондом рабочего времени

$$W_{\Gamma} = P \cdot T_{\phi} = 20 \cdot 8338 \cdot 8,61 = 1435803,6 \text{ т/год}, \quad (3.3)$$

3.2 Расчет сметы капитальных затрат

Расчет сметы капитальных затрат представлен в таблице 5

Таблица 5 - Стоимость приобретенного оборудования

Наименование оборудования	Количество единиц	Цена за единицу руб.	Общая стоимость руб.
Двигатель 1ft6 siemens	1	1 236 952	1 236 952
Simovort masterdrive 6se7037 ПЧ	1	1 306 224	2 543 176
Двигатель 1ph7 286 siemens	1	850 880	3 394 056
Автоматический выключатель 3wl	3	120	3 394 416

Продолжение таблицы 5

Наименование оборудования	Количество единиц	Цена за единицу руб.	Общая стоимость руб.
Редуктор	1	4 847 000	8 241 416
Итого учтенное оборудование	-	-	8 241 416
Прочее неучтенное оборудование	10%	-	824 141,6
Итого стоимость оборудования	-	-	9 065 557,6

Капитальные затраты на внедрение и использование новой техники включают капитальные вложения и затраты временного характера (приобретение, доставка, монтаж, наладка и освоение новой техники). Капитальные затраты определяются сметной стоимостью всех видов работ а стадиях создания новой техники.

Так как мы проектируем систему для цеха, то капитальные затраты рассчитываются:

$$K = O + M + T_p + Z_c + Z_{\text{ч}} + Z_k, \quad (3.4)$$

где O – затраты на приобретение оборудования (руб);

M – затраты на монтаж, руб.;

T_p – транспортные расходы, руб.;

Z_c – заготовительно-складские расходы, руб.;

$Z_{\text{ч}}$ – резерв средств на запасное оборудование и запасные части, руб.;

Z_k – затраты на комплектацию оборудования, руб.

Расчёт стоимости приобретённого оборудования приведем в таблице 6.

Прочее неучтённое оборудование: кабеля, электропроводка и прочее, берётся в размере 10% от стоимости учтённого оборудования.

Таким образом: $O = 9\,065\,557,6$ руб. (стоимость приобретенного оборудования).

Затраты на монтаж оборудования определяются в размере 10–15 % от стоимости оборудования.

$$M = 906\,555,76 \text{ руб.} \quad (3.5)$$

Транспортные расходы берутся в размере 6–10 % от стоимости оборудования.

$$T_p = 543\,933,46 \text{ руб.} \quad (3.6)$$

Резерв средств на запасное оборудование и запасные части берутся в размере 3–5 % от стоимости приобретенного оборудования.

$$Z_q = 271\,966,7 \text{ руб.} \quad (3.7)$$

Заготовительно-складские расходы берутся в размере 1,2% от стоимости оборудования и запасных частей, включая транспортные расходы.

На приобретенное оборудование:

$$Z_c = 118\,577,49312 \text{ руб.} \quad (3.8)$$

Затраты на комплектацию оборудования берутся в размере 1% от стоимости оборудования и запасных частей.

На приобретенное оборудование:

$$Z_k = 93\,375,243 \text{ руб.} \quad (3.9)$$

Таким образом, капитальные затраты:

$$K = 9065557,6 + 906555,76 + 543933,46 + 271966,7 + 118577,49312 + 93375,243 = 10999966,25612 \text{ руб.} \quad (3.10)$$

3.2 Расчет затрат на содержание и эксплуатацию оборудования

В проекте разрабатывается новая система в новом цехе, затраты определяются только для проектируемой системы.

Эксплуатационные расходы состоят из следующих видов затрат:

- а) затраты на электроэнергию (\mathcal{E}_i);
- б) амортизационных отчислений (A_i);
- в) затрат на ремонты и обслуживание электрооборудования ($C_{\text{три}}$).

Таким образом, затраты на эксплуатацию системы электропривода (C_i) можно рассчитать по формуле:

$$C_i = \mathcal{E}_i + A_i + C_{\text{три}}, \quad (3.11)$$

Стоимость затрат электроэнергии (\mathcal{E}_i) для электропривода рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_i = P_i \cdot \mu \cdot T_{\text{ф}} \cdot \Pi_{\text{э}} = 9,7 \cdot 0,91 \cdot 8338 \cdot 3,19 = 234782,488 \text{ руб.}, \quad (3.12)$$

где $P_i = 9,7 \text{ кВт}$ – мощность на входе установки (согласно паспортным данным);

$\mu = 0,91$ – КПД установки;

$\Pi_{\text{э}} = 3,19 \text{ руб.}$ – себестоимость 1 кВт·ч энергии.

Расчет годовой суммы амортизационных отчислений производится на основе капитальных затрат на оборудование и нормы амортизации для него.

Норму амортизации по оборудованию можно рассчитать по следующей формуле:

$$H_{ai} = \frac{100}{T_a}, \quad (3.13)$$

где H_{ai} – норма амортизации оборудования, %;

T_a – нормативный срок службы оборудования (10 лет).

$$H_{ai} = \frac{100}{10} = 10 \quad (3.14)$$

Сумма амортизации определится как:

$$A = \frac{K \cdot H_{ai}}{100}, \quad (3.15)$$

где A – величина амортизационных отчислений;

K – капитальные затраты на оборудование.

$$A = \frac{10\,999\,966,25612 \cdot 10}{100} = 1\,099\,996,625612 \text{ руб} \quad (3.16)$$

Расчет затрат на текущий ремонт и обслуживание электрооборудования:

$$\text{Стр} = 0,2 \cdot A, \quad (3.17)$$

где A – годовая сумма амортизаций оборудования.

Получим:

$$C_{\text{три}} = 1\,099\,996,625612 \cdot 0.2 = 219\,999,325 \text{ руб} \quad (3.18)$$

Таким образом, затраты на эксплуатацию системы электропривода:

$$C_i = 234782,488 + 1099996,625612 + 219999,325 = 1554788,4387 \text{ руб} \quad (3.19)$$

3.4 Расчет затрат на оплату труда со страховыми отчислениями

Торцефасочная установка работает в автоматическом режиме, но тем не менее необходимо присутствие человека для контроля процесса производства. Поскольку присутствие данного производственного рабочего необходимо и оправданно вне зависимости от степени использования торцефасочной установки, заработная плата начисляется за весь год, а не только за непосредственное время работы устройства для снятия фаски. Таким образом, рабочий день рассматриваемых производственных рабочих равен 8 часам и имеет 3 смены (установка круглосуточная), 5-дневная рабочая неделя. Тогда за год количество часов определено значением 8760 (8 часов по 3 смены на 365 дней).

Система оплаты труда - сдельно-премиальная. Уровень производственной премии составляет 30 %.

Численность дежурного персонала:

- Слесарь-ремонтник по механическому оборудованию (6 разряд) – 1 человек
- Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования (6 разряд) – 1 человек

Заработная плата персонала, осуществляющего ремонт и обслуживание установки:

– Слесарь-ремонтник по механическому оборудованию (6 разряд) – 215,28 рублей/час

– Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования (6 разряд) – 215,28 рублей/час

Месячный фонд рабочего времени для графика работы электромонтёра и слесаря 6 разряда, обслуживающий данный механизм, можно рассчитать по формуле:

$$t_{\text{мес}} = \frac{365 \cdot C_{\text{сут}} \cdot t_{\text{см}}}{12 \cdot \delta} = 243,3 \text{ч/месяц} , \quad (3.20)$$

где $t_{\text{мес}}$ – месячный фонд рабочего времени в расчете на одного работника,

$C_{\text{сут}}$ – количество смен в сутках согласно графику работы;

$t_{\text{см}}$ – продолжительность одной смены, час;

δ – количество бригад, обслуживающих данный участок.

Величина фонда рабочего времени, который необходимо рассчитать по формуле для графика работы электромонтёра и слесаря 6 разряда, обслуживающий данный механизм:

Таблица 6 - Расчет фонда оплаты труда по работникам цеха

Наименование профессии	Кол-во работников	Часовая ставка, руб	Ср.месячные часы, ч/мес	Сумма ЗП, руб/мес.
Слесарь-ремонтник по мех. оборудованию	3	215,28	243,3	52377,6
Электромонтер по ремонту и обслуживанию электрооборудования	3	215,28	243,3	52377,6
Итого без страховых отчислений, руб				145651,2

Переработка в праздничные дни (при использовании графика работы электромонтера и слесаря) может быть определена:

$$t_{\text{пр}} = \frac{n_{\text{пр}} \cdot C_{\text{сут}} \cdot t_{\text{см}}}{12 \cdot \delta} = \frac{20 \cdot 3 \cdot 8}{12 \cdot 3} = 13,3 \text{ чел/час} \quad (3.21)$$

Продолжительность переработки по графику, которая определяется по нижеприведенным формулам и с учетом того, что в 2018 году годовая норма рабочего времени составляла 2004 часа.

Годовая норма рабочего времени:

$$\Delta t_{\text{мес}} = t_{\text{мес}} - \frac{t_{\text{норм}}}{12} = 243,3 - \frac{2004}{12} = 76,3 \text{ чел/час} \quad (3.22)$$

Тогда величина переработки по графику определится как:

$$t_{\text{гр}} = \Delta t_{\text{мес}} - t_{\text{пр}} = 76,3 - 13,3 = 63 \text{ чел/час} \quad (3.23)$$

Продолжительность работы в ночное время:

$$t_{\text{ночн}} = \frac{t_{\text{мес}}}{3} = \frac{243,3}{3} = 81,1 \text{ чел/час} \quad (3.24)$$

Продолжительность работы в вечернее время:

$$t_{\text{веч}} = \frac{t_{\text{мес}}}{3} = \frac{243,3}{3} = 81,1 \text{ чел/час} \quad (3.25)$$

Сумма оплаты труда по тарифу, которая определяется по формуле:

$$ЗП_{\text{тар}} = t_{\text{час}} \cdot t_{\text{мес}} = 215,28 \cdot 243,3 = 52\,377,624 \text{ руб /месяц,} \quad (3.26)$$

Сумма сдельного приработка, рассчитываемая по формуле:

$$\Delta ЗП_{\text{сд}} = ЗП_{\text{тар}} \cdot \frac{N_{\text{вр}}^{\text{пл}} - 100}{100} = 52377,624 \cdot \frac{102 - 100}{100} = 1047,55 \text{ руб/месяц,} \quad (3.27)$$

где $\Delta ЗП_{\text{сд}}$ – приработок сдельщика за месяц;

$N_{\text{вр}}^{\text{пл}}$ – планируемое выполнение норм выработки, %.

Сумма производственной премии, расчет которой ведется по формуле:

$$\begin{aligned} ЗП_{\text{прем}} &= (ЗП_{\text{тар}} + \Delta ЗП_{\text{сд}}) \cdot \frac{\Delta P_{\text{общ}}}{100} = (52377,624 + 1047,55) \cdot \frac{30}{100} \\ &= 16027,55 \text{ руб/месяц,} \end{aligned} \quad (3.28)$$

где $ЗП_{\text{прем}}$ – размер месячной производственной премии на одного работника;

$\Delta P_{\text{общ}}$ – общий размер премии за выполнение условий премирования и перевыполнение установленных показателей.

Сумма доплат за работу в праздничные дни:

$$\Delta ЗП_{\text{пр}} = t_{\text{час}} \cdot \frac{N_{\text{вр}}^{\text{пл}}}{100} \cdot t_{\text{пр}} = 215,28 \cdot \frac{102}{100} \cdot 13,3 = 2920,488 \text{ руб/месяц,} \quad (3.29)$$

где $\Delta ЗП_{\text{пр}}$ – доплата за работу в праздничные дни на одного рабочего.

Сумма доплат за переработку по графику. При этом ориентировочно принимается, что оплата переработки по графику осуществляется в размере 37,5% тарифной ставки сдельщика:

$$\Delta ЗП_{гр} = \frac{K_{гр}}{100} \cdot t_{час} \cdot t_{гр} = \frac{37,5}{100} \cdot 215,28 \cdot 63 = 5085,99 \text{руб/месяц}, \quad (3.30)$$

где $\Delta ЗП_{гр}$ – сумма доплат за переработку по графику в расчет на одного работника;

$K_{гр}$ – коэффициент, учитывающий размер доплат за переработку по графику.

Сумма доплат за работу в ночное время, с учетом того, что установленный на предприятии размер таких доплат составляет 40 % от сдельного заработка:

$$\Delta ЗП_{ночн} = \frac{K_{ночн}}{100} \cdot t_{час} \cdot t_{ночн} = \frac{40}{100} \cdot 215,28 \cdot 81,1 = 6983,6832 \text{руб/месяц}, \quad (3.31)$$

где $\Delta ЗП_{ночн}$ – сумма доплат за работу в ночное время на одного работника;

$K_{ночн}$ – коэффициент, учитывающий размер доплат за работу в ночное время, %.

Сумма доплат за работу в вечернее время, с учетом того, что установленный на предприятии размер таких доплат составляет, например, 20 % от сдельного заработка:

$$\Delta ЗП_{веч} = \left(\frac{K_{веч}}{100} \right) \cdot t_{час} \cdot t_{веч} = \left(\frac{20}{100} \right) \cdot 215,28 \cdot 81,1 = 3491,8416 \text{руб/мес} \quad (3.32)$$

где $\Delta ЗП_{веч}$ – сумма доплат за работу в вечернее время на одного человека;

$K_{веч}$ – коэффициент, учитывающий размер доплат за работу в вечернее время, %.

Сумма доплат по районному коэффициенту, которая определяется по формуле:

$$\Delta ЗП_p = 0,15 \cdot \left(ЗП_{тар} + \Delta ЗП_{сд} + \Delta ЗП_{сд} + ЗП_{прем} + \Delta ЗП_{пр} + \Delta ЗП_{гр} + \right. \\ \left. \Delta ЗП_{ночн} + \Delta ЗП_{веч} \right) = 0,15 \cdot (52377,624 + 1047,55 + 16027,55 + 2920,488 + , \quad (3.33) \\ + 5085,99 + 6983,6832 + 3491,8416) = 13190,2 \text{ руб./мес.}$$

Для расчета суммы основной заработной платы используется следующее выражение:

$$\Delta ЗП_{осн} = ЗП_{тар} + \Delta ЗП_{сд} + \Delta ЗП_{сд} + ЗП_{прем} + \Delta ЗП_{пр} + \Delta ЗП_{гр} + \\ + \Delta ЗП_{ночн} + \Delta ЗП_{веч} + \Delta ЗП_p = 52377,624 + 1047,55 + 16027,55 + \quad (3.34) \\ + 2920,488 + 5085,99 + 6983,6832 + 3491,8416 + 13190,2 = \\ = 101124,9268 \text{ руб./мес.}$$

Сумма основной заработной платы рассчитана $\Delta ЗП_{осн}$ рассчитана для одного работника на месяц.

Для 6 работников сумма основной заработной платы за год равна:

$$ЗП = 7\,280\,994,7296 \text{ руб/год} \quad (3.35)$$

Сумма страховых отчислений от заработной платы персонала рассчитывается по следующей формуле:

$$С_{стр.взн} = ЗП \cdot 30\% = 7\,280\,994,7296 \cdot 0,3 = 2184298,42 \text{ руб} \quad (3.36)$$

3.5 Затраты на основные материалы

Затраты на основные материалы рассчитываются по формуле:

$$З_{ом} = Q_m \cdot Ц_m \cdot K_m - q_0 \cdot Ц_0, \quad (3.37)$$

где Z_{OM} – затраты на основные материалы соответствующего вида (за вычетом отходов), руб;

Q_m – количество данных материалов, израсходованных за период проектирования в кг;

q_0 – количество возвратных (использованных) отходов, полученных в процессе разработки, кг;

K_m – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (принимается в размере 1,05);

Π_0 – действующая оптовая цена возвратных отходов, руб/кг;

Π_m – действующая оптовая цена основных материалов в руб/кг.

Расчет затрат на основные материалы выглядит следующим образом:

$$Z_{OM} = 68 \cdot 940 \cdot 1,05 - 29 \cdot 370 = 56390 \text{ тыс/руб.}, \quad (3.38)$$

3.6 Расчет показателей прибыли предприятия

Выручка от реализации продукции определяется по следующей формуле:

$$\sum U_i \cdot P_i = 42682,2267 \cdot 143000 = 87284373,4 \text{ руб/год}, \quad (3.39)$$

где U_i – годовой объем i – го вида продукции;

P_i – цена единицы i – го вида продукции (принимается на 30 % больше производственной себестоимости)

Выручка от реализации без налога на добавленную стоимость (НДС):

$$B' = B - \frac{B \cdot \text{НДС}}{100} = 87284373,4 - \frac{87284373,4 \cdot 18}{100} = 69827534 \text{ руб.}, \quad (3.40)$$

где НДС=18% – ставка налога.

Прибыль от реализации продукции:

$$\text{ПР} = \text{В}' - \text{С} \cdot \text{W}_{\Gamma}, \quad (3.41)$$

где $\text{С}=110000$ руб. – себестоимость продукции,

W_{Γ} – годовой выпуск продукции.

Для нахождения прибыли от реализации нужно провести расчет себестоимости продукции:

Таблица 7 – Себестоимость

Статьи калькуляции	Цена
Сырье и материалы за вычетом обратных отходов	56390000
Покупные изделия, полуфабрикаты и услуги сторонних организаций.	-
Основная и дополнительная зарплата производственных рабочих.	7280994,7296
Отчисления в страховые фонды	218429,8
Расходы на содержание и эксплуатацию оборудования.	1554778,4387

$$\text{С}_{\Gamma} = 7280994,7296 + 218429,8 + 1554778,4387 = 65444202,9683 \text{руб.}, \quad (3.42)$$

$$\text{ПР} = \text{В}' - \text{С} \cdot \text{W}_{\Gamma} = 4783331,6317 \text{руб} \quad (3.43)$$

Прибыль балансовая:

$$\text{П}_{\text{б}} = \text{ПР} = 4783331,6317 \text{руб} \quad (3.44)$$

Налогооблагаемая прибыль:

$$\text{П}_{\text{но}} = \text{П}_{\text{б}} = 4783331,6317 \text{руб} \quad (3.45)$$

Чистая прибыль:

$$\Pi_{\text{ч}} = \Pi_{\text{но}} - \text{Н} = 4465831,8869 \text{руб} \quad (3.46)$$

Расчет рентабельности:

$$R = \frac{C - C_{\text{перв}}}{C_{\text{перв}}} \cdot 100\% = 15\% \quad (3.47)$$

Срок окупаемости оборудования рассчитывается по формуле:

$$T = \frac{K}{\Pi_{\text{ч}}} = 2,46 \text{ лет} \quad (3.48)$$

Таблица 8 - Сводная таблица технико-экономических расчетов

Наименование показателя	Единицы измерения	Значение показателя
Капитальные вложения	Млн.рублей	10 999 966,25
Затраты на эл.энергию	Рублей	234782,488
Эксплуатационные затраты	Рублей	1554776,0767
Амортизационные отчисления	Млн.Рублей	1099996,6625
Себестоимость ед. продукции	Рублей/тонну	126736,4
Балансовая прибыль	Млн.рублей	4465831,8869
Чистая прибыль	Млн.рублей	4465831,8869

Продолжение таблицы 8.

Наименование показателя	Единицы измерения	Значение показателя
Рентабельность	%	15
Срок окупаемости	год	2,46

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе рассмотрен вопрос разработки мехатронной системы привода подачи шпиндельной бабки торцефасочного станка.

По итогам расчета тахограммы и нагрузочной диаграммы был выбран асинхронный двигатель, который прошел проверку на нагрев и перегрузку. Результаты проверки двигателя на перегрев и перегрузку, показали, что данный двигатель обеспечивает необходимый запас по мощности, который составляет 20 %, что считается обязательным для промышленных приводов. По необходимым критериям выбран частотный преобразователь и устройство защиты привода. Разработана кинематическая схема. Рассчитанный двигатель и система привода способна выполнять различные задачи торцовки и снятия фаски. Мехатронная система разработана таким образом, чтобы выполнять разные задачи без возникновения ситуаций, в которых бы привод работал на пределе возможности.

В дипломном проекте была построена структурная схема работы механизма, с аппроксимированным контуром момента, контуром скорости и положения. Представленная структурная схема была реализована в среде динамического моделирования Simulink MATLAB. Полученные в ходе исследований данные были систематизированы и использованы для разработки критериев, позволяющих создать систему автоматического регулирования, которая имеет высокую точность и легкость в наладке.

В проекте были рассмотрены экономические вопросы проектируемой системы, рассчитаны показатели эффективности проекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Лукин, А.Н. Преобразователь частоты для асинхронных электроприводов: Учебное пособие / А.Н. Лукин, В.И. Косматов. – 2-е изд. – Магнитогорск, 2005. – 68 с.
- 2 Косматов, В.И. Электропривод: Учебное пособие. /В.И. Косматов. – Магнитогорск, 2012. – 45 с.
- 3 Парфеньева, И.Е. Технология конструкционных материалов: Учебное пособие / И.Е. Парфеньева. – Москва, 2009. – 101 с.
- 4 Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.М. Дальского – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2003. – Т. 2.– 346 с.
- 5 Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.
- 6 Мурашкин, С.Л. Технология машиностроения / С.Л. Мурашкин. – Иркутск, 2003 г. – 145 с.
- 7 Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. / М.Г. Чиликин, В.И. Сандлер. – 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Энергия, 1979. – 616 с.
- 8 Бруштейн, Б. Е. Токарное дело. Учебник для проф. Техн. училищ. / Б. Е. Бруштейн, В. И. Дементьев. –6-е изд. – М.: Высшая школа, 1967. – 448 с.
- 9 Мурзин, А.М. Оптимальное проектирование автоматических установок: учебное пособие / А.М. Мурзин. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 103 с.
- Электротехнический справочник: в 4 т. Т. 2 / В. Г. Герасимов. – М: Издательство МЭИ, 2001. –200 с.
- 10 SIEMENS, Система автоматизации SIMATIC S7-300. Данные модулей: каталог / SIEMENS, 2006. – 261 с.
- 11 Кочетков, В.П. Основы теории управления / В.П. Кочетков. – Ростов н/Д.: Феникс, 2012. – 81с.

12 Кобытин, А.М. Автоматизация типовых технологических процессов и установок / А.М Кобытин – М.: Изд-во Энергоатомиздат, 1988. – 324 с.

13 Гасияров, В.Р. Мехатронный технологический комплекс толстолистого стана 5000 горячей прокатки / В.Р. Гасияров, А.А. Радионов // Электротехнические системы и комплексы. – 2013. – № 21. – С. 13–20.

14 Быстров, О. Ф. Экономика предприятия (фирмы) / О. Ф. Быстров, Г. И.

15 Кучина, Е.В. Экономика организации: учебное пособие / Е.В. Кучина. – Челябинск, 2017. – 52 с.

16 Вольдек, А.И. Электрические машины. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. / А.И. Вольдек – Л.: "Энергия", 1974. – 840 с.

17 Павловская, О.О. Теория автоматического управления. – Ч.1. Линейные системы: учебное пособие / Павловская, О.О., Плотникова, Н.В. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 76 с.

18 Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводом. – Л.:Энергоиздат,1982. – 392 с.

19 Convertisseurs indirects a onduleur de tension 65E et 68C du tipe SIMOVERT P pour entraînements triphases. Catalogue.SIMENS.1997.