

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**
Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»
Кафедра «Автоматизированный электропривод»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, к.т.н.,
доцент

_____/А.Н. Шишков/
“ ____ ” _____ 201 г.

Автоматизация рольгангов листопрямильного станка Faccin R8 3000.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОМУ КВАЛИФИКАЦИОННОМУ ПРОЕКТУ

ЮУрГУ-13.03.02.2018.579.01 ВКП

Руководитель проекта:
доцент, д.т.н.

_____/Григорьев М.А./
“ ____ ” _____ 201 г.

Автор проекта
студент группы ЗИЭФ-577с

_____/Шифанов А. В./
“ ____ ” _____ 201 г.

Нормоконтролер
Доцент, к.т.н.

_____/Бычков А.Е./
“ ____ ” _____ 201 г.

Челябинск 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Шифанов А. В. Электропривод и система автоматизации рольгангов станка Faccin R8 3000. – Челябинск: ЮУрГУ, ЗФ, 2017, 80 с., 21 ил., 11 табл. Библиографический список — 9 наименований, листов чертежей ф. А3 –

В ходе дипломного проектирования был разработан электропривод и спроектирована система автоматизации подводящих и отводящих рольгангов для листопрямильного станка Faccin R8 3000.

Выбрано электрооборудование системы управления электроприводом, включающее в себя асинхронный двигатель переменного тока АИР 112 МВ6; преобразователь частоты: Schneider Electric Altivar 71 40N4, силовое и вспомогательное оборудование.

					<i>13.03.02.2018.584.01 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>Шифанов А. В.</i>				<i>Электропривод и система автоматизации рольгангов станка Faccin.</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	<i>Григорьев М. А.</i>						4	
<i>Реценз.</i>								
<i>Н. Контр.</i>	<i>Бычков А. Е.</i>					<i>ЮУрГУ кафедра АЭП</i>		
<i>Утверд.</i>	<i>Шишков А. Н.</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА РОЛЬГАНГА.....	9
1.1 .Описание работы механизма рольганга в технологическом процессе.....	9
1.2 Технические характеристики механизма рольганга в соответствии с требованиями технического задания.....	11
2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	13
2.1 Расчет скоростей, моментов статических сопротивлений и предварительный расчет мощности электродвигателя	13
2.2 Предварительный выбор электродвигателя, определение передаточного числа и выбор редуктора.....	21
2.2.1 Выбор типа и мощности двигателя	21
2.2.2 Выбор редуктора.....	22
2.3 Приведение статических моментов к валу двигателя.....	23
2.4 Приведение моментов инерции и коэффициентов жесткости к валу двигателя.....	24
2.5 Предварительный расчет моментов.....	25
2.6 Предварительная проверка двигателя по производительности и нагреву.....	27
2.7 Расчет статических характеристик электродвигателя.....	30
3 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	36
3.1 Выбор преобразователя частоты.....	36
3.2 Выбор тормозного модуля и резистора.....	43
3.3 Расчет статических характеристик электропривода.....	46

									Лист
									5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

3.3.1 Расчет параметров схем пуска и торможения.....	46
3.3.2 Построение статических характеристик электропривода.....	47
3.4 Расчет переходных процессов электропривода.....	50
3.4.1 Расчет переходных процессов.....	50
3.4.2 Расчет интегральных показателей.....	52
3.5 Энергетические показатели электропривода	54
3.6 Проверка электропривода на заданную производительность, по нагреву и перегрузочной способности двигателя.....	55
4 АВТОМАТИЗАЦИЯ МЕХАНИЗМА.....	58
4.1 Описание технологического процесса.....	59
4.1.1 Структурная схема и принцип работы.....	59
4.1.2 Требования системы автоматизации.....	60
4.1.3 Алгоритм работы системы автоматизации. Общие сведения.....	61
4.1.4 Описание программы.....	63
4.2 Разработка функциональной схемы автоматизации.....	65
4.3 Выбор элементной базы автоматизации и преобразователей технологической информации.....	68
4.3.1 Выбор электродвигателей.....	68
4.3.2 Выбор преобразователей частоты.....	68
4.3.3 Выбор датчиков.....	68
4.3.4 Выбор программируемого контроллера.....	70
4.4 Разработка программного обеспечения системы автоматизации.....	73
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	78
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	80

					13.03.02.2018.584.01 ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

На всех этапах своего развития человеческое общество искало наилучший способ получения энергии, необходимой для выполнения работы в производственных процессах. Этот способ оказывал решающее влияние на развитие производственных сил. С развитием технологий появлялось множество разнообразных систем электроприводов для внедрения в производство и другие сферы жизни общества.

Электрический привод представляет собой электромеханическое устройство, предназначенное для приведения в движение рабочего органа машины и управления ее технологическим процессом. Он состоит из трех частей: электрического двигателя, осуществляющего электромеханическое преобразование энергии, механической части, передающей механическую энергию рабочему органу машины, и системы управления, обеспечивающей оптимальное по тем или иным критериям управление технологическим процессом. Характеристики двигателя и возможности системы управления определяют производительность механизма, точность выполнения технологических операций, динамические нагрузки механического оборудования и ряд других факторов.

Главной задачей выпускной квалификационной работы является создание системы управления электроприводов рольгангов. Введение системы автоматизации приводит к увеличению скорости подачи листа к станку толстолистового проката и возможность выполнения транспортировки силами одного человека (оператора), как следствие, уменьшение времени на подготовку стали к дальнейшим технологическим процессам.

До недавнего времени стальные листы подавались к станку с помощью силы рабочих, которые катили лист по роликам. Поэтому было решено оснастить ролики рольганга электроприводом с асинхронными электродвигателями.

					13.03.02.2018.584.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

В данном дипломном проекте на основании заданных технологических требований производится модернизация электропривода рольганга.

Расчет электропривода производится следующим образом:

- по техническому заданию определяются статические моменты сопротивлений, строятся нагрузочные диаграммы и предварительно выбирается двигатель, исходя из полученной расчетной мощности;
- для данного двигателя выбираются редуктор и преобразователь, сетевой дроссель, тормозной резистор;
- статические моменты и моменты инерции рабочего органа приводятся к валу двигателя;
- производится предварительная проверка выбранного двигателя по производительности и нагреву;
- рассчитываются статические характеристики электропривода;
- рассчитываются переходные процессы электропривода;
- рассчитываются энергетические показатели привода;
- производится окончательная проверка электропривода по нагреву, заданную производительность и по перегрузочной способности;
- производится автоматизация электроприводов рольгангов.

									Лист
									8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

1 НАЗНАЧЕНИЕ И ОПИСАНИЕ МЕХАНИЗМА РОЛЬГАНГА

1.1 Описание работы механизма рольганга в технологическом процессе

Рольганг служит для подачи листов в гидравлический прокатный станок и удаления их после обработки.

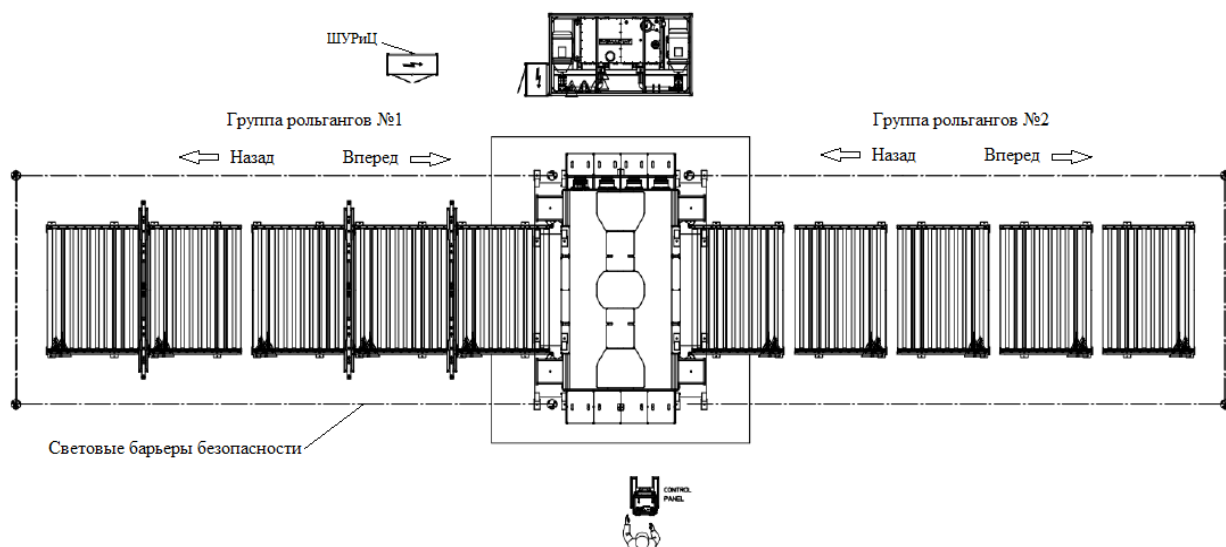


Рисунок 1 – Расположение оборудования листопрямительного станка

Один рольганг установлен перед станком и является подводящим, для подачи листа в станок, второй рольганг располагается на выходе из станка и является отводящим.

Стальной лист подаётся на подводящий рольганг с помощью мостового крана, после этого оператор выбирает скорость перемещения листа и подаёт его в станок, у станка имеются свои транспортировочные ролики, которые могут работать синхронно с подводящим и отводящим рольгангом.

Кинематическая схема рольганга изображена на рисунке 2.

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

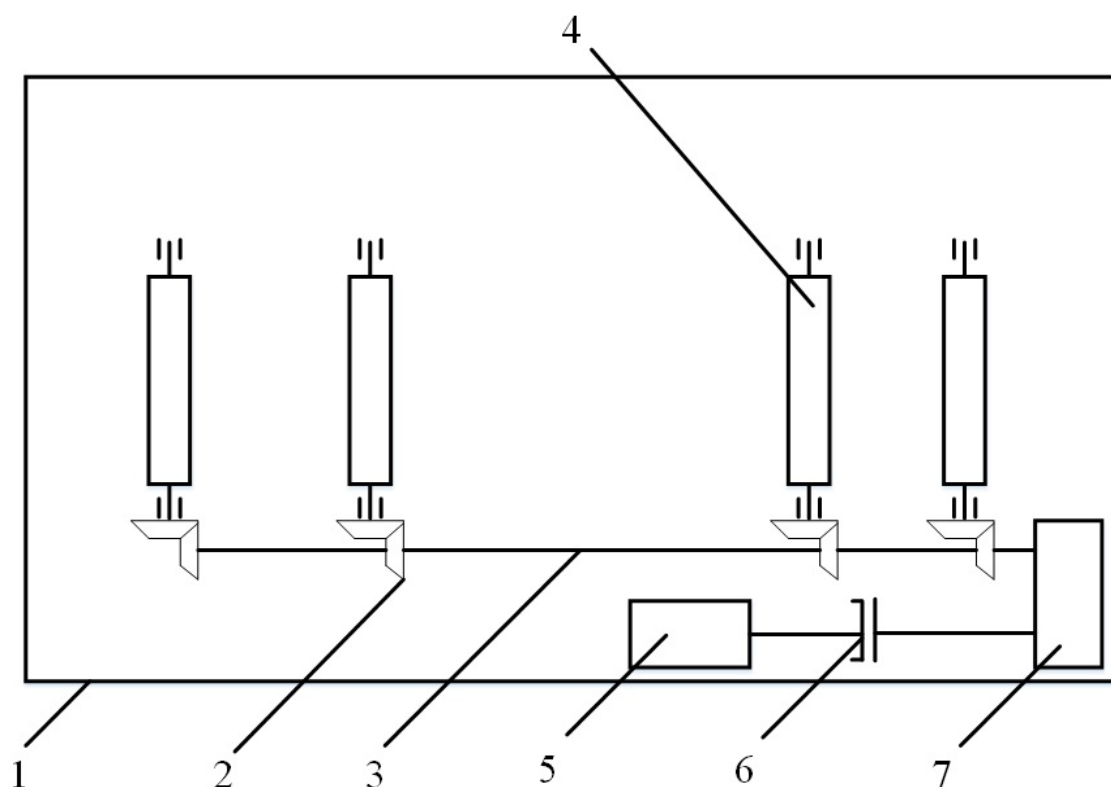


Рисунок 2 – Кинематическая схема рольганга

Рольганг установлен на тележке 1. Каждый из роликов 4 рольганга при помощи вала и конических шестерен 2 соединен с продольным валом 3. Продольный вал 2, в свою очередь, через редуктор 7 и тормозной шкив бсоединен с электродвигателем 5, который приводит всю установку в движение.

Металлический лист длиной L подается с другого участка при помощи мостового крана. Подводящий рольганг запускается, перемещает лист на длину L и останавливается. Далее происходит прокат листа валками листоправильного станка.

После этого запускается отводящий рольганг, перемещая лист на длину L после чего лист убирается с рольганга мостовым краном. Затем цикл повторяется.

Для того, чтобы избежать аварийных ситуаций подводящий рольганг работает на пониженной скорости V_n , а прокат и транспортирование листа на следующий участок – при скорости V_p .

При расчете мощности двигателя рольганга необходимо учитывать возможность буксования роликов по заготовке, которое может возникнуть при кратковременной остановке заготовки, вследствие удара по боковым линейкам рольганга и по другим причинам.

1.2 Технические характеристики механизма рольганга в соответствии с требованиями технического задания

Для заданного производственного механизма – рольганга – спроектировать электропривод, удовлетворяющий всем технологическим требованиям, а также требованиям, обеспечивающим его надежную и экономичную работу в течение срока эксплуатации оборудования. При этом нам известны:

- 1) кинематическая схема рабочего органа с указанием вращающихся и поступательно движущихся динамических масс и моментов сопротивления движению (рисунок 1);
- 2) скорости движения рабочего органа при различной нагрузке с допускаемыми отклонениями от заданного значения (таблица 1);
- 3) допускаемые значения ускорения рабочего органа по условиям механической прочности или условиям технологического процесса;
- 4) время работы механизма и число циклов в час (таблица 1);
- 5) линейное перемещение (или угол поворота вала) РО (таблица 1);

										Лист
										11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

Таблица 1 – Технические данные рольганга

	Наименование	Обозначение	Численное значение
1	Масса ролика	m_p , кг	450
2	Диаметр ролика	D , м	0,25
3	Момент инерции ролика	J_p , кг·м ²	10
4	Число роликов	N	4
5	Масса заготовки	$m_з$, кг	3000
6	Длина заготовки	L , м	15
7	Скорость рабочего хода	V_p , м/с	1,2
8	Время работы	t_p , с	38
9	Число циклов	z , 1/ч	80

Принятые обозначения:

$a_{доп} = 1 \text{ м/с}^2$ – допустимое ускорение;

$d_{шр} = 0,125 \text{ м}$ – диаметр шейки ролика;

$f = 5 \text{ мм}$ – коэффициент трения качения;

$\mu = 0,015$ – коэффициент трения скольжения;

$J_{ш} = 0,4 \text{ кг·м}^2$ – момент инерции тормозного шкива;

$V_n = 0,7$ – низкая скорость;

$C_k = 50 \text{ МН·м/рад}$ – крутильная жесткость;

$J_B = 3 \text{ кг·м}^2$ – момент инерции продольного вала;

Тип регулирования – ПЧ-АД.

										Лист
										12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

2 ВЫБОР И РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Выбор двигателя по мощности проводится, как правило, по критерию нагрева с последующей проверкой по перегрузочной способности. Для использования этого критерия необходимо знать нагрузки двигателя, которые зависят и от его параметров. В связи с этим сначала произведем предварительный выбор двигателя, рассчитаем для него нагрузки при заданных условиях работы, а затем проверим предварительно выбранный двигатель по критериям нагрева, перегрузочной способности и условиям пуска.

Предварительный расчет мощности двигателя производится приближенно, поскольку на данном этапе проектирования неизвестна полная нагрузка. На основе исходных данных могут быть достаточно близко рассчитаны лишь статические нагрузки. Динамические же нагрузки, которые в значительной степени зависят от параметров двигателя, пока еще не известны.

Воспользуемся наиболее простым методом предварительного расчета мощности двигателя, который основан на учете лишь статических нагрузок. При этом для эквивалентирования нагрузки нескольких участков нагрузочного графика используется метод среднеквадратичного момента. Такой расчет не дает нам точного результата - получается лишь ориентировочное значение мощности двигателя, подлежащее в дальнейшем проверке.

									Лист
									13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

2.1 Расчет скоростей, моментов статических сопротивлений и предварительный расчет мощности электродвигателя

На базе исходных данных рабочей машины необходимо рассчитать и построить зависимости скорости рабочей машины от времени. Участки различаются значениями скоростей, статических нагрузок и моментов инерции.

На основе заданных путей перемещения L , установившейся скорости V_y и среднего допустимого ускорения $a_{\text{дон}}$ определим время пуска t_n до установившейся скорости с допустимым ускорением, и время торможения t_m от установившейся скорости до остановки:

$$t_n = t_m = \frac{v_y}{a_{\text{дон}}}. \quad (1)$$

Теперь рассчитаем путь, проходимый за время пуска (торможения) рабочей машиной:

$$L_n = L_m = \frac{v_y^2}{2 \cdot a_{\text{дон}}}. \quad (2)$$

И, наконец, находим время установившегося режима движения со скоростью V_y :

$$t_y = \frac{L - (L_n + L_m)}{v_y}. \quad (3)$$

Отсюда для перемещения всей заготовки согласно формулам (1), (2) и (3) получаем:

$$t_{n1} = t_{m1} = \frac{v_n}{a_{\text{дон}}} = \frac{0,7}{1} = 0,7 \text{ с};$$
$$L_{n1} = L_{m1} = \frac{v_n^2}{2 \cdot a_{\text{дон}}} = \frac{0,7^2}{2 \cdot 1} = 0,245 \text{ м};$$
$$t_{y1} = \frac{L - (L_{n1} + L_{m1})}{v_n} = \frac{15 - (0,245 + 0,245)}{0,7} = 20,72 \text{ с}.$$

Для проката листа и перемещения его на другой участок (со скоростью $V_p=1,2$ м/с):

						13.03.02.2018.584.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			14

$$t_{n2} = t_{m2} = \frac{v_p}{a_{дон}} = \frac{1,2}{1} = 1,2 \text{ с};$$

$$L_{n2} = L_{m2} = \frac{v_p^2}{2 \cdot a_{дон}} = \frac{1,2^2}{2 \cdot 1} = 0,72 \text{ м};$$

$$t_{y2} = \frac{L - (L_{n2} + L_{m2})}{v_p} = \frac{15 - (0,72 + 0,72)}{1,2} = 11,3 \text{ с}.$$

Теперь на каждом из участков работы определим статические моменты сопротивления движению по формуле:

$$M_{рост} = M_{mn} + M_{mk}, \quad (4)$$

где $M_{mn} = \frac{m_1 \cdot d_{шп} \cdot \mu \cdot g}{2}$ – момент сил трения в подшипниках;

$M_{mk} = m_2 \cdot g \cdot f$ – момент силы трения качения;

здесь m_1 – масса деталей и узлов, опирающихся на подшипники;

m_2 – масса деталей, опирающихся на узел качения;

$d_{шп}$ – диаметр шейки вала;

μ – коэффициент трения скольжения в подшипниках;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

f – коэффициент трения качения.

Рассчитаем $M_{рост}$ для режима подачи листа в станок:

$$M_{рост1} = \frac{(m_p \cdot N + m_3) \cdot d_{шп} \cdot \mu \cdot g}{2} + \left(\frac{m_3}{N} + m_p\right) \cdot g \cdot f = \frac{(450 \cdot 4 + 3000) \cdot 0,125 \cdot 0,015 \cdot 9,8}{2} + \left(\frac{3000}{4} + 450\right) \cdot 9,8 \cdot 0,005 = 44,1 + 58,8 = 102,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

При прокате листа будет действовать $M_{рост2}$, он будет равен $M_{рост1}$.

$$M_{рост2} = M_{рост1} = 102,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Для проверки двигателя по перегрузочной способности необходимо определить нагрузку, которая может кратковременно возникать при проскальзывании заготовки, при этом статический момент будет равен:

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					15

$$M_{\text{ростн}} = M_{\text{тн}} + \frac{m_3 \cdot \mu_B \cdot D \cdot g}{2}; \quad (5)$$

где μ_B – коэффициент трения скольжения роликов по заготовке при буксовании (проскальзывании) принимаем $\mu_B = 0,15$;

тогда:

$$M_{\text{ростн1}} = 44,1 + \frac{3000 \cdot 0,15 \cdot 0,25 \cdot 9,8}{2} = 595,35 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{ростн2}} = M_{\text{ростн1}} = 595,35 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Динамические моменты характеризуют способность движущимися массами рабочего органа запасать (и выделять) кинетическую энергию.

Для определения динамических моментов рабочей машины рассчитаем момент инерции рабочего органа:

$$J_{\text{po}} = N \cdot J_p + J_6 + \frac{m_3 \cdot D^2}{4}; \quad (6)$$

отсюда:

$$J_{\text{po1}} = 4 \cdot 10 + 3 + \frac{3000 \cdot 0,25^2}{4} = 89,87 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_{\text{po2}} = J_{\text{po1}} = 89,87 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

Теперь для каждого режима рабочей машины определим динамические моменты по формуле:

$$M_{\text{родин}} = \frac{J_{\text{po}} \cdot 2 \cdot a_{\text{дон}}}{D}; \quad (7)$$

получаем:

$$M_{\text{родин1}} = \frac{J_{\text{po1}} \cdot 2 \cdot a_{\text{дон}}}{D} = \frac{89,87 \cdot 2 \cdot 1}{0,25} = 718,96 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{\text{родин2}} = M_{\text{родин1}} = 718,96 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Тогда полный момент рабочего органа

$$M_{\text{po}} = M_{\text{рост}} + M_{\text{родин}}; \quad (8)$$

Определим полный момент для каждого режима работы:

									Лист
									16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

- установившийся режим

$$M_{poy1} = M_{pocm1} = 102,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{poy2} = M_{pocm2} = 102,9 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- пуск

$$M_{pon1} = M_{pocm1} + M_{podin1} = 102,9 + 718,96 = 821,86 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{pon2} = M_{pocm2} + M_{podin2} = 102,9 + 718,96 = 821,86 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

- торможение

$$M_{pom1} = M_{pocm1} - M_{podin1} = 102,9 - 718,96 = -616,06 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{pom2} = M_{pocm2} - M_{podin2} = 102,9 - 718,96 = -616,06 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

Таблица 2 – Результаты расчетов нагрузочных диаграмм

Участок движения		Подача листа			Прокат листа		
Параметр	Обозначение	Пуск	Уст. Режим	Торможение	Пуск	Уст. Режим	Торможение
1	2	3	4	5	6	7	8
Скорость, м/с	V_{po}	0	0,7	0	0	1,2	0
Время работы, с	t_{po}	0,7	20,72	0,7	1,2	11,3	1,2
Путь, м	L_{po}	0,245	14,51	0,245	0,72	13,56	0,72
Моменты РО, Н·м:							

Продолжение таблицы 2

Участок движения		Подача листа			Прокат листа		
- трения скольжения в подшипниках	M_{mn}	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1	44,1
- трения качения	M_{mk}	58,8	58,8	58,8	58,8	58,8	58,8
Статический момент, Н·м	$M_{рост}$	102,9	102,9	102,9	102,9	102,9	102,9
Момент инерции, кг·м ²	$J_{ро}$	89,87	89,87	89,87	89,87	89,87	89,87
Динамический момент, Н·м	$M_{родин}$	718,96	718,96	718,96	718,96	718,96	718,96
Суммарный момент, Н·м	$M_{ро}$	821,86	102,9	-616,06	821,86	102,9	-616,06

По данным таблицы 2, с учетом того что механизм при подаче листа движется на пониженной скорости $V_n = 0,8$ м/с, а при прокате со скоростью $V_p = 1,6$ м/с строим нагрузочные диаграммы скоростей и моментов рабочего органа для каждого режима работы (рисунки 2, 3).

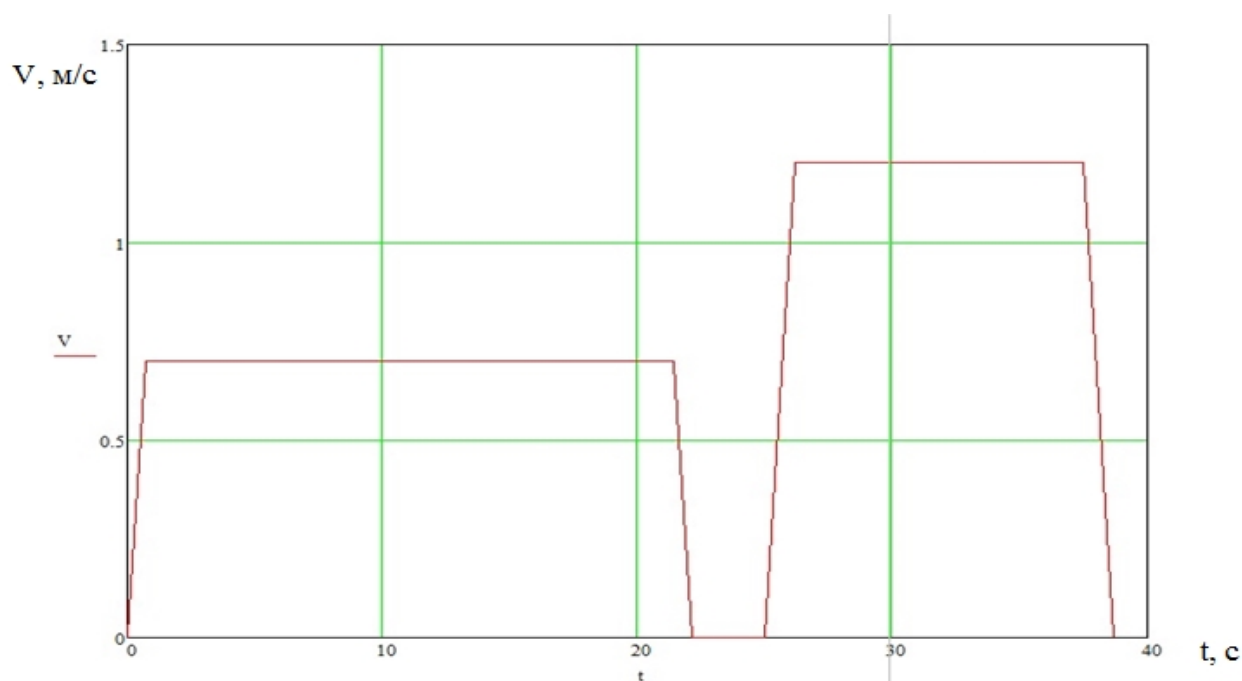


Рисунок 2 – Нагрузочная диаграмма скоростей от времени

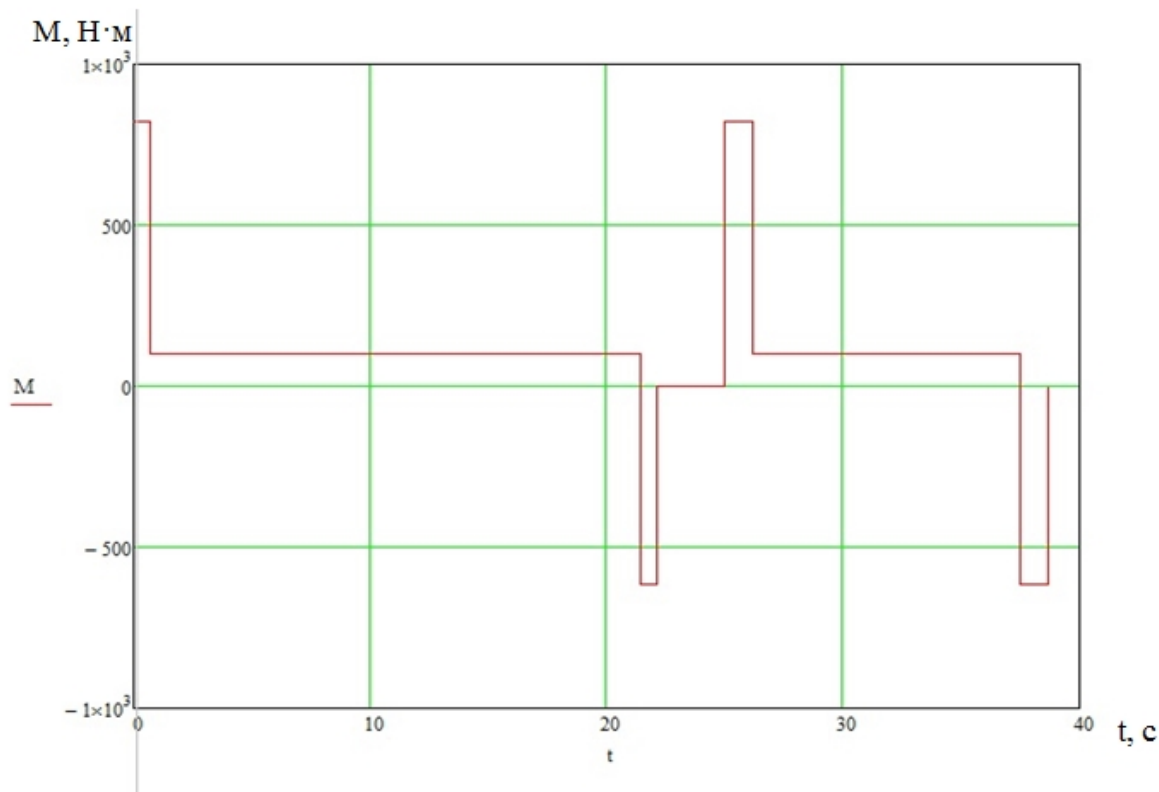


Рисунок 3 – Нагрузочная диаграмма моментов от времени

На основании построенной нагрузочной диаграммы момента рабочей машины (рисунок 3) рассчитаем среднеквадратичное значение момента, в котором учтены статические и часть динамических нагрузок:

$$M_{CPKB} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n M_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^n t_k}}, \quad (9)$$

где M_k – момент двигателя на k -м участке ($k=1, \dots, n$);

t_k – длительность k -го участка.

$$\begin{aligned} M_{CPKB} &= \sqrt{\frac{M_{POП1}^2 \cdot t_{П1} + M_{POY1}^2 \cdot t_{Y1} + M_{POГ1}^2 \cdot t_{T1} + M_{POП2}^2 \cdot t_{П2} + M_{POY2}^2 \cdot t_{Y2} + M_{POГ2}^2 \cdot t_{T2}}{t_{П1} + t_{Y1} + t_{T1} + t_{П2} + t_{Y2} + t_{T2}}} = \\ &= \sqrt{\frac{821,9^2 \cdot 0,7 + 102,9^2 \cdot 20,72 + 616,06^2 \cdot 0,7 + 821,9^2 \cdot 1,2 + 102,9^2 \cdot 11,3 + 616,06^2 \cdot 1,2}{0,7 + 20,72 + 0,7 + 1,2 + 11,3 + 1,2}} = \\ &= 255,79 \text{ Н}\cdot\text{м}; \end{aligned}$$

Теперь найдем время цикла при заданном числе циклов работы машины в час и фактическое значение относительной продолжительности включения:

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{z} = \frac{3600}{60} = 60 \text{ с};$$

$$ПВ_{\text{ф}} = \frac{t_{n1} + t_{y1} + t_{m1} + t_{n2} + t_{y2} + t_{m2}}{t_{\text{ц}}} = \frac{0,7 + 20,72 + 0,7 + 1,2 + 11,3 + 1,2}{60} = 0,59;$$

И, наконец, определяем расчетную мощность двигателя:

$$P_{\text{дв}} = \frac{k_1 \cdot M_{\text{сркс}} \cdot 2 \cdot v_0 \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{ф}}}{ПВ_{\text{кат}}}}}{D}, \quad (10)$$

где v_0 – основная скорость движения РО (при работе двигателя на естественной механической характеристике), в нашем случае $v_0 = v_B$;

$ПВ_{\text{кат}}$ – ближайшее к $ПВ_{\text{ф}}$ каталожное значение относительной продолжительности включения, для электродвигателей выбранной серии $ПВ_{\text{кат}} = 0,6$;

k_1 – коэффициент, учитывающий динамические нагрузки, обусловленные вращающимися элементами электропривода, а также потери мощности в редукторе, принимаем $k_1 = 1,5$.

Тогда:

$$P_{\text{дв}} = \frac{1,5 \cdot 255,79 \cdot 2 \cdot 1,2 \cdot \sqrt{\frac{0,59}{0,6}}}{0,25} = 3652,55 \text{ Вт.}$$

2.2 Предварительный выбор электродвигателя, определение передаточного числа и выбор редуктора

2.2.1 Выбор типа и мощности двигателя

Для повторно-кратковременного режима работы следует выбирать двигатели специальных серий, предназначенных для этого режима (режим работы S3).

Двигатель выбирается по каталогу таким образом, чтобы значение его мощности $P'_{дв}$ при $PВ_{КАТ}$ было бы равно или несколько больше мощности $P_{дв}$, рассчитанной в п. 2.2.

Таким образом, исходя из условия $P'_{дв} \geq P_{дв}$ и, по каталогу выбираем двигатель, основные технические характеристики которого приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические данные двигателя АИР 112МВ6

Параметр	Обозначение	Значение
1	2	3
Мощность, кВт	P	4
Частота вращения, об/мин	n	950
Ток номинальный, А	I _н	9,2
КПД	η	82
Коэф. Мощности	cos φ	0,81
Пусковой ток, А	I _п	55,2
Номинальный момент, Н·м	M _{НОМ}	40,24
Пусковой момент, Н·м	M _п	88,46

Продолжение таблицы 3

Параметр	Обозначение	Значение
Критический момент, Н·м	$M_{кр}$	92,48
Момент инерции, кг·м ²	J	0,0425
Масса двигателя, кг	m	48

2.2.2 Выбор редуктора

Передаточное число редуктора определяется по номинальной скорости вращения выбранного двигателя ω_n и основной скорости движения исполнительного органа v_0 .

$$j'_p = \frac{\omega_n \cdot D}{2 \cdot v_0} = \frac{99,4 \cdot 0,25}{2 \cdot 1,2} = 10,35;$$

Редуктор выбираем, исходя из требуемого передаточного числа, заданного значения номинальной и скорости выбранного двигателя с учетом характера нагрузки (режима работы) РО, для которого проектируется электропривод.

Выбранный редуктор должен иметь передаточное число, равное или несколько меньшее расчетного значения. При передаточном числе, превышающем расчетное значение, скорость на валу рабочего органа не достигнет заданного значения, что приведет к снижению производительности рабочей машины. Режим работы редуктора для нашего механизма принимаем “тяжелый”.

На основании вышеперечисленного, по справочнику выбираем цилиндрический двухступенчатый редуктор типа РЦД-350 с передаточным числом $j_p = 10$, предельной скоростью вращения быстроходного вала $n_6 = 1500$ об/мин, допускаемой нагрузкой $T_m = 1100$ Н·м и КПД $\eta_p = 97\%$.

										Лист
										22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

2.3 Приведение статических моментов к валу двигателя

При составлении расчетной схемы механической части электропривода моменты сопротивления движению РО (статические моменты) и моменты инерции приводятся к валу двигателя.

Критерием приведения моментов к валу двигателя является энергетический баланс механической части электропривода. Статические и динамические моменты на валу рабочей машины приведены в таблице 2.

Статические моменты рабочей машины, приведенные к валу двигателя, рассчитываем для заданных режимов работы по формулам:

$$M_{pc1} = \frac{M_{pocm1}}{j_p} = \frac{102,9}{10} = 10,29 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{pc2} = M_{pc1} = 10,29 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Теперь определим статический момент на валу в двигательном режиме:

$$M_{ec1\delta} = \frac{M_{pc1}}{\eta_p} = \frac{10,29}{0,97} = 10,6 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{ec2\delta} = M_{ec1\delta} = 10,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При работе электропривода в тормозных режимах потери в редукторе вызывают уменьшение нагрузки двигателя, при этом моменты на валу:

$$M_{ec1m} = M_{pc1} \cdot \eta_p = 10,29 \cdot 0,97 = 9,98 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{ec2m} = 9,98 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

В двигательном режиме работы двигателя статический момент увеличивается на величину момента потерь холостого хода (M_{xx} покрывается за счет электромагнитного момента двигателя).

При работе двигателя в тормозном режиме статический момент уменьшается на величину момента потерь холостого хода (M_{xx} покрывается за счет статического момента рабочего органа).

									Лист
									23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

Таким образом, приведенные статические моменты системы электропривод – рабочая машина рассчитывают для каждого участка с учетом режима работы электропривода по формуле:

$$M_c = M_{вс} \pm M_{xx}, \quad (11)$$

где M_{xx} – момент потерь холостого хода, который принимаем равным 5% от номинального момента двигателя, т.е.

$$M_{xx} = 0,05 \cdot M_n = 0,05 \cdot \frac{P_n}{\omega_n} = 0,05 \cdot \frac{4000}{99,4} = 2,01 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Тогда статические моменты в двигательном режиме:

$$M_{c1d} = M_{вс1d} + M_{xx} = 10,6 + 2,01 = 12,61 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{c2d} = 12,61 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

в тормозном режиме:

$$M_{c1m} = M_{вс1m} - M_{xx} = 9,98 - 2,01 = 7,97 \text{ Н}\cdot\text{м};$$

$$M_{c2m} = 7,97 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

При этом в статическом моменте учитываются не только силы сопротивления движению в рабочей машине, но также и потери в редукторе, и механические потери в двигателе.

2.4 Приведение моментов инерции и коэффициентов жесткости к валу двигателя

Суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции системы может быть рассчитан по соотношению:

$$J = \delta \cdot J_\delta + J_{np}, \quad (12)$$

где J_δ – момент инерции ротора двигателя;

δ – коэффициент, учитывающий момент инерции остальных элементов электропривода: муфт, тормозного шкива, редуктора и др., принимаем $\delta = 1,5$;

									Лист
									24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

J_{np} – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции движущихся исполнительных органов рабочей машины и связанных с ними движущихся масс.

$$J_{np1} = \frac{J_{pc1}}{j_p^2} = \frac{89,87}{10^2} = 0,898 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_{np2} = 0,898 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

тогда получаем:

$$J_1 = \delta \cdot J_\delta + J_{np1} = 1,5 \cdot 0,0425 + 0,898 = 0,961 \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$J_2 = 0,961 \text{ кг}\cdot\text{м}^2.$$

Для возможности учета влияния упругостей в механизме указана крутильная жесткость C_k , отнесенная к рабочему валу.

Приведенную к валу двигателя жесткость упругой механической связи C_{np} определим по формуле:

$$C_{np} = \frac{C_k}{j_p^2} = \frac{50000000}{10^2} = 500000 \text{ Н}\cdot\text{м/рад}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

2.5 Предварительный расчет моментов

Для каждого участка работы электропривода найдем значения установившейся скорости двигателя:

$$\omega_{c1} = \frac{2 \cdot v_p \cdot j_p}{D} = \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 10}{0,25} = 56 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{c2} = \frac{2 \cdot v_B \cdot j_p}{D} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10}{0,25} = 96 \text{ рад/с};$$

Теперь определим динамический момент:

$$M_{дин1} = M_{дин2} = \frac{2 \cdot a_{дон} \cdot J_1 \cdot j_p}{D} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 0,961 \cdot 10}{0,25} = 76,88 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

									Лист
									25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

И, наконец, рассчитаем пусковые и тормозные моменты двигателя, при которых обеспечивается возможность разгона и торможения электропривода с заданным допустимым ускорением.

Моменты пуска

$$M_{n1} = M_{n2} = M_{c1\theta} + M_{дин1} = 12,61 + 76,88 = 89,49 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Моменты торможения

$$|M_{m1}| = |M_{m2}| = M_{c1m} - M_{дин1} = 4,97 - 76,88 = 68,91 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты приведения статических моментов и моментов инерции к валу двигателя

Участок движения		Рабочий ход			Ускоренный ход		
Параметр	Обозначение	Пуск	Уст. Режим	Торможение	Пуск	Уст. Режим	Торможение
1	2	3	4	5	6	7	8
Скорость двигателя, рад/с	ω_c	0	56	0	0	96	0
Момент статический на валу, Н·м:							
- без учета потерь в передаче	M_{pc}	10,29	10,29	10,29	10,29	10,29	10,29
- с учетом потерь в передаче	M_{bc}	10,6	10,6	9,98	10,6	10,6	9,98
- с учетом потерь в двигателе	M_c	12,61	12,61	7,97	12,61	12,61	7,97
Приведенный момент инерции, кг·м ²	J_{np}	0,898	0,898	0,898	0,898	0,898	0,898

Продолжение таблицы 4

Участок движения		Рабочий ход			Ускоренный ход		
Момент инерции электропривода, кг·м ²	J	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961	0,961
Динамический момент, Н·м	$M_{дин}$	76,88	-	76,88	76,88	-	76,88
Момент двигателя, допускаемый по ускорению, Н·м	$M_{доп.уск}$	89,49	-	68,91	89,49	-	68,91

2.6 Предварительная проверка двигателя по нагреву и производительности

Целями предварительной проверки являются:

- 1) изучение приближенных способов оценки времени переходных процессов;
- 2) уточнение нагрузочных диаграмм момента и скорости двигателя с учетом момента инерции предварительно выбранного двигателя;
- 3) снижение затрат времени на выполнение курсового проекта для случая, когда предварительно выбранный двигатель не проходит по нагреву.

Для приближенного расчета времени переходного процесса оценивают средний момент двигателя $M_{ср}$.

При питании от преобразователя с задатчиком интенсивности средний момент двигателя можно принять равным моменту, допустимому по ускорению.

Теперь рассчитаем время переходных процессов:

- время разгона до пониженной скорости V_n

$$t_{n1} = \frac{J_1 \cdot \omega_{c1}}{M_\delta} = \frac{0,961 \cdot 56}{76,88} = 0,7 \text{ с};$$

- время торможения с пониженной скорости

									Лист
									27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

$$t_{m12} = \frac{J_1 \cdot \omega_{c1}}{|M_\partial|} = \frac{0,961 \cdot 56}{76,88} = 0,7 \text{ с};$$

- время разгона до повышенной скорости заготовки V_p

$$t_{n2} = \frac{J_2 \cdot \omega_{c2}}{M_\partial} = \frac{0,961 \cdot 96}{76,88} = 1,2 \text{ с};$$

- время торможения с повышенной скорости заготовки

$$t_{m2} = \frac{J_2 \cdot \omega_{c2}}{|M_\partial|} = \frac{0,961 \cdot 96}{76,88} = 1,2 \text{ с}.$$

Далее определяем угол поворота вала двигателя за время переходных процессов:

$$\alpha_{n1} = \frac{\omega_{c1} \cdot t_{n1}}{2} = \frac{56 \cdot 0,7}{2} = 19,6 \text{ рад};$$

$$\alpha_{m12} = \frac{\omega_{c1} \cdot t_{m12}}{2} = \frac{56 \cdot 0,7}{2} = 19,6 \text{ рад};$$

$$\alpha_{n2} = \frac{\omega_{c2} \cdot t_{n2}}{2} = \frac{96 \cdot 1,2}{2} = 57,6 \text{ рад};$$

$$\alpha_{m2} = \frac{\omega_{c2} \cdot t_{m2}}{2} = \frac{96 \cdot 1,2}{2} = 57,6 \text{ рад}.$$

Найдем угол поворота вала двигателя, соответствующий величине перемещения в данном режиме:

$$\alpha = \frac{2 \cdot L \cdot j_p}{D} = \frac{2 \cdot 15 \cdot 10}{0,25} = 1200 \text{ рад}.$$

Теперь рассчитаем время работы двигателя с установившейся скоростью:

- $\omega_{c1} = 56 \text{ рад/с}$,

$$t_{y1} = \frac{\alpha - (\alpha_{n1} + \alpha_{m1})}{\omega_{c1}}, \quad (13)$$

тогда, согласно формуле (13):

$$t_{y1} = \frac{1200 - (19,6 + 19,6)}{56} = 20,72 \text{ с};$$

- $\omega_{c2} = 96 \text{ рад/с}$,

$$t_{y2} = \frac{\alpha - (\alpha_{n2} + \alpha_{m2})}{\omega_{c2}} = \frac{1200 - (57,6 + 57,6)}{96} = 11,3 \text{ с.}$$

На предварительном этапе расчета принимают, что момент двигателя за время переходного процесса от начального до конечного значения скорости остается постоянным, т.е. не учитывается нарастание и снижение момента при управлении от тиристорных преобразователей.

Таблица 5 – Результаты предварительного расчета

Участок движения		Рабочий ход			Ускоренный ход		
Параметр	Обозн.	Пуск	Уст.	Торм.	Пуск	Уст.	Торм.
Средний момент на участке, Н·м	M_{cp}	89,49	12,61	-68,91	89,49	12,61	-68,91
Время работы, с	t_{ϵ}	0,7	20,72	0,7	1,2	11,3	1,2
Угол поворота вала, рад	α_{ϵ}	19,6	1160	19,6	57,6	1084	57,6

Проверка двигателя по производительности заключается в сравнении суммарного фактического времени работы электропривода в цикле t_{ϕ} с заданным значением времени работы t_p в исходных данных для проектирования.

Для обеспечения требуемой производительности необходимо, чтобы фактическое время работы было меньше заданного.

В нашем случае:

$$t_{\phi} = \sum_{k=1}^m t_{\epsilon k} = 0,7 + 20,72 + 0,7 + 1,2 + 11,3 + 1,2 = 35,82 \text{ с;}$$

$$t_p = 38 \text{ с.}$$

Условие производительности, безусловно выполнено, поскольку $t_{\phi} < t_p$.

Предварительная проверка двигателя по нагреву осуществляется сравнением среднеквадратичного момента с допусковым моментом двигателя при его работе с фактической продолжительностью включения ПВ_ф.

Для начала определим фактическую продолжительность включения:

$$ПВ_{\phi} = \frac{t_{\phi}}{t_{\psi}} \cdot 100\% = \frac{35,82}{60} \cdot 100\% = 59,7\%.$$

Затем момент двигателя при $ПВ_{кат} = 60\%$, ближайшем к $ПВ_{\phi}$:

$$M_{кат} = \frac{P_{кат}}{\omega_{кат}} = \frac{4000}{99,48} = 40,2 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Теперь найдем момент двигателя, допускаемый по нагреву для рассчитанного (фактического) графика нагрузки:

$$M_{дон} = M_{кат} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{кат}}{ПВ_{\phi}}} = 40,2 \cdot \sqrt{\frac{0,6}{0,597}} = 40,3 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

И, наконец, рассчитываем среднеквадратичный момент двигателя при фактическом графике нагрузки по результатам предварительного расчета:

$$M_{СРКВ} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m M_{срк}^2 \cdot t_{ек}}{\sum_{k=1}^m t_{ек}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{89,49^2 \cdot 0,7 + 12,61^2 \cdot 20,72 + 68,91^2 \cdot 0,7 + 89,49^2 \cdot 1,2 + 12,61^2 \cdot 11,3 + 68,91^2 \cdot 1,2}{0,7 + 20,72 + 0,7 + 1,2 + 11,3 + 1,2}} =$$

$$= 28,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Так как выполнено условие $M_{сркв} \leq M_{дон}$ ($28,6 \text{ Н}\cdot\text{м} < 40,3 \text{ Н}\cdot\text{м}$), выбранный двигатель проходит по условиям нагрева, поэтому приступаем к детальному точному расчету выбранного электропривода.

2.7 Расчет статических характеристик электродвигателя

С помощью естественной характеристики оценивают возможности двигателя при его работе в механической системе: выдерживать предельные значения тока (момента), которые двигатель может развивать кратковременно; обеспечивать перевод двигателя в генераторный режим (если требуется) и т.д.

						13.03.02.2018.584.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			30

Расчет естественной характеристики двигателя выполняют аналитическим и графоаналитическим методами.

Существенно облегчает расчет применение программы «haradkz.m», которая позволяет рассчитать механическую $\omega(M)$, энергетические характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Характеристики рассчитываются для заданных значений частоты и напряжения на базе T-образной схемы замещения двигателя.

Программа позволяет вывести на экран результаты нескольких расчетов (при разных напряжениях, токах статора – при питании от источника тока, частоте питающей сети и т.п.), что позволяет совместить на одном графике механические характеристики при различных параметрах сети, электромеханические характеристики, энергетические характеристики и сравнивать их. Расчёт характеристик выполняется с помощью программного обеспечения “*Matlab 13*”.

Синхронная скорость двигателя $\omega_{0н}$ зависит от частоты питающей сети f и числа пар полюсов p . Для асинхронного электродвигателя типа АИР112 МВ6 синхронная скорость равна:

$$\omega_{он} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{3} = 104,66 \text{ рад/с.}$$

Номинальная скорость двигателя равна:

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 950}{30} = 99,48 \text{ рад/с.}$$

									Лист
									31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

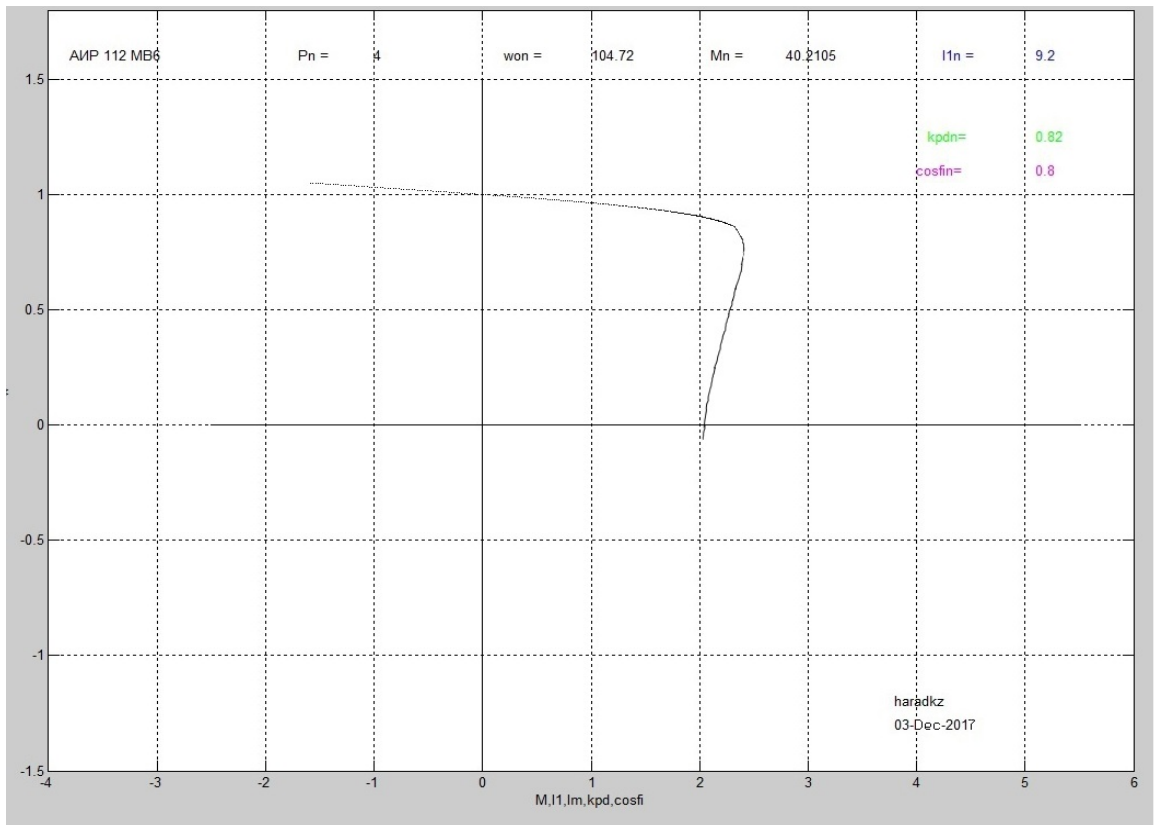


Рисунок 4 – Естественная механическая характеристика

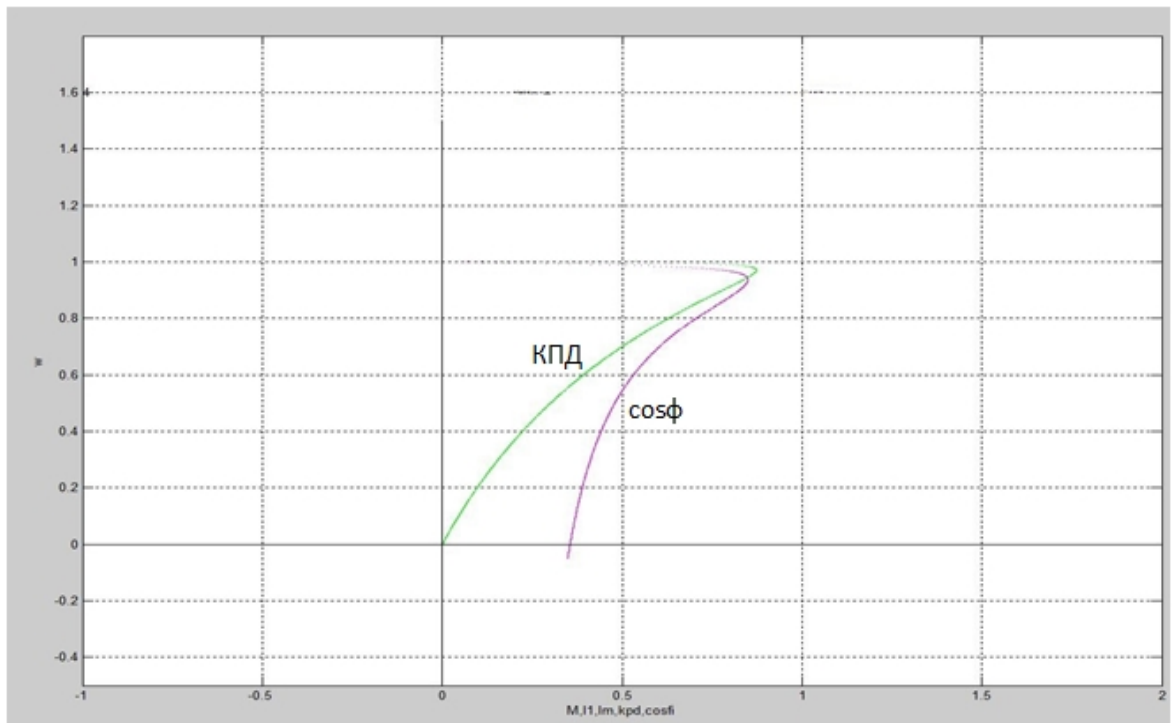


Рисунок 5 – Энергетические характеристики

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.584.01 ПЗ

Лист

32

Для устойчивой работы двигателя необходимо при изменении частоты поддерживать перегрузочную способность двигателя, что обеспечивается регулированием напряжения на статоре по различным законам в зависимости от частоты и от характера изменения статического момента. Эти особенности необходимо учитывать при расчете частоты и амплитуды напряжения.

Наиболее распространен закон изменения амплитуды напряжения пропорционально частоте $U/f = \text{const}$. При таком законе (если $r_1 = 0$) максимальный момент постоянен $M_k = \text{const}$ и не зависит от частоты.

Это позволяет для приближенных расчетов использовать прием параллельного переноса естественной механической характеристики, при этом естественная характеристика перемещается вдоль оси ω и устанавливается в точке $\omega_{зад}$, $M_{зад}$. В этом случае синхронная скорость, соответствующая заданной точке равна:

$$\omega_{0зад} = \omega_{зад} + \Delta\omega_e \quad (14)$$

где $\Delta\omega_e = \omega_{0н} \cdot S_e = \omega_{0н} \cdot S_H \cdot \frac{M_{зад}}{M_H}$ – отклонение скорости от синхронной на естественной характеристике при заданном моменте $M_{зад}$;

$$S_H = \frac{\omega_{0н} - \omega_H}{\omega_{0н}} \text{ – скольжение на номинальной скорости.}$$

тогда:

$$\Delta\omega_e = \omega_{0н} \cdot S_H \cdot \frac{M_{зад}}{M_H} = (\omega_{0н} - \omega_H) \cdot \frac{M_{зад}}{M_H}.$$

Частота напряжения в заданной точке равна:

$$f_{1зад} = \frac{\omega_{0зад}}{\omega_{0н}} \cdot f_{1н} = \alpha \cdot f_{1н}, \quad (15)$$

где $f_{1н} = 50$ Гц – частота напряжения на статоре;

$\omega_{0н}$ – синхронная частота вращения двигателя при номинальной частоте f_1 .

Определим относительное значение частоты напряжения на статоре:

									Лист
									33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

$$\alpha = \frac{f_{1зад}}{f_{1н}} \quad (16)$$

Заданное значение напряжения определим из соотношения:

$$U_1 = 4,4 \cdot \alpha \cdot f_{1н} \quad (17)$$

Исходя из выше приведенных формул, рассчитаем искусственные механические характеристики для электродвигателя АИР 112 МВ6:

Первый участок: подача листа к станку. $\omega_{зад}=56$ p/c, $M_{зад}=12,61$ Н·м.

- отклонение скорости от синхронной на естественной характеристике при заданном моменте равно:

$$\omega_e = (104,6 - 99,48) \cdot \frac{12,61}{40,2} = 1,6 \text{ p/c};$$

- синхронная скорость, соответствующая заданной точке равна:

$$\omega_{озад} = 56 + 1,6 = 57,6 \text{ p/c};$$

- частота напряжения в заданной точке равна:

$$f_{1зад} = \frac{57,6}{104,66} \cdot 50 = 27,5 \text{ Гц};$$

- относительное значение частоты напряжения на статоре:

$$\alpha = \frac{27,5}{50} = 0,55;$$

- заданное значение напряжения равно:

$$U_1 = 4,4 \cdot 0,55 \cdot 50 = 121 \text{ В}.$$

Второй участок: прокат и отведение листа. $\omega_{зад}=96$ p/c, $M_{зад}=12,61$ Н·м.

- отклонение скорости от синхронной на естественной характеристике при заданном моменте равно:

$$\omega_e = (104,6 - 99,48) \cdot \frac{12,61}{40,2} = 1,6 \text{ p/c};$$

- синхронная скорость, соответствующая заданной точке равна:

$$\omega_{озад} = 96 + 1,6 = 97,6 \text{ p/c};$$

									Лист
									34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

- частота напряжения в заданной точке равна:

$$f_{1зад} = \frac{97,6}{104,66} \cdot 50 = 46,62 \text{ Гц};$$

- относительное значение частоты напряжения на статоре:

$$\alpha = \frac{46,62}{50} = 0,93;$$

- заданное значение напряжения равно:

$$U_1 = 4,4 \cdot 0,93 \cdot 50 = 204,6 \text{ В.}$$

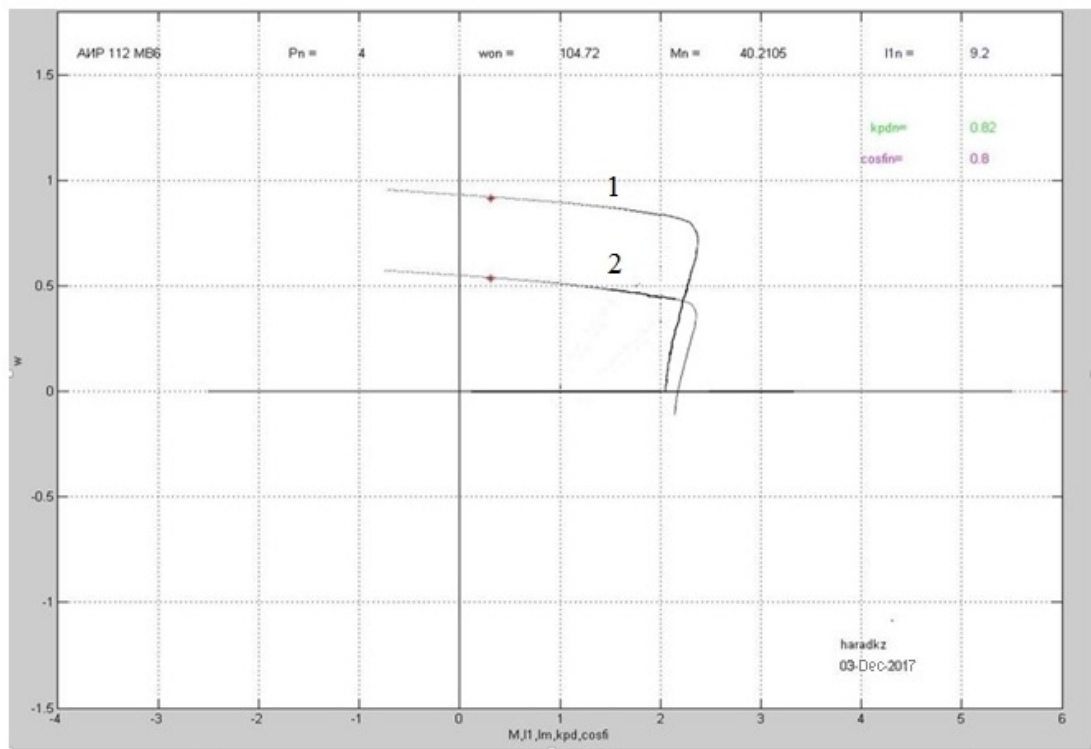


Рисунок 6 – Искусственные механические характеристики

(1 – прокат и отведение листа; 2 – подведение листа)

Данные с рисунка 6: модель двигателя АИР 112 МВ6, номинальная мощность 4 кВт, скорость идеального холостого хода 104,72 рад/с, номинальный момент 40,21 Н·м, ток номинальный 9,2 А.

3 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В данном проекте помимо уже выбранных электродвигателя и редуктора, по техническому заданию также выбирается преобразователь частоты для питания двигателя.

3.1 Выбор преобразователя частоты

На рисунке 7 представлена функциональная схема электропривода переменного тока с АИН.

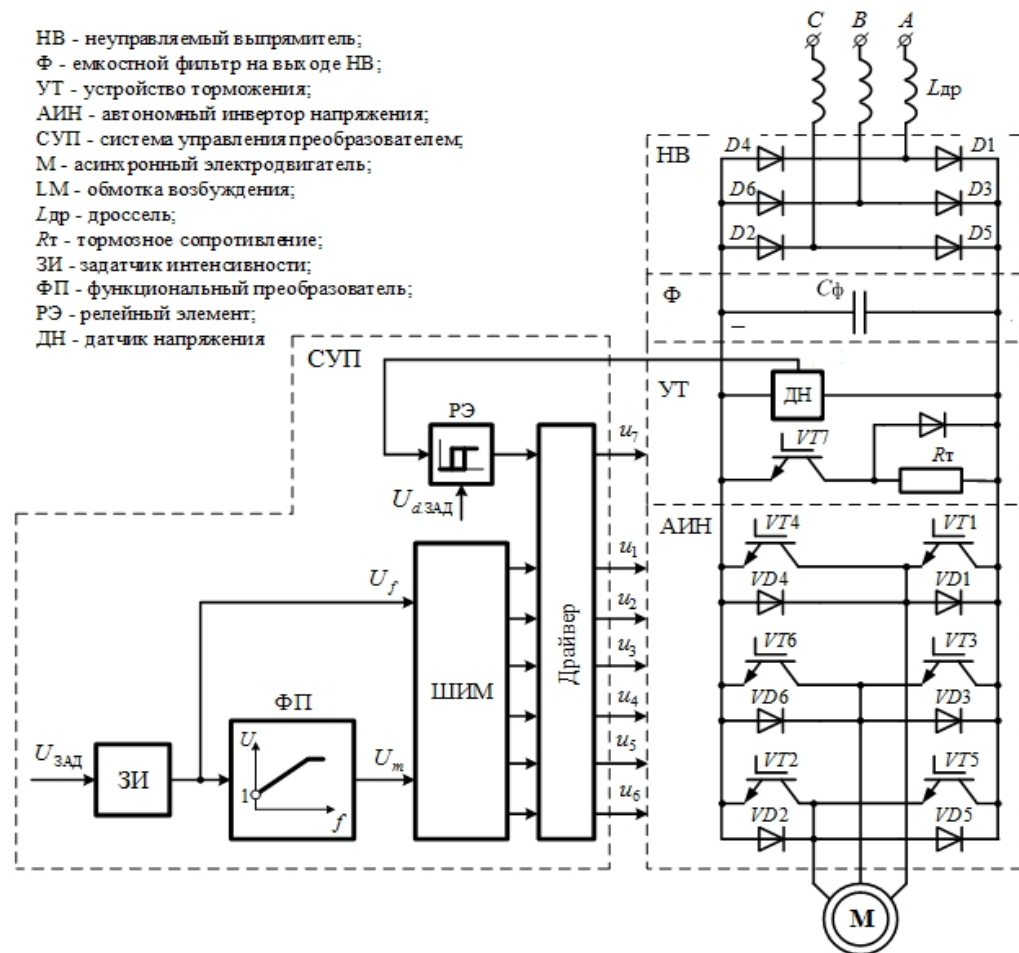


Рисунок 7 – Функциональная схема двухзвенного преобразователя частоты с неуправляемым выпрямителем и автономным инвертором напряжения со скалярной системой управления

Силовая часть схемы включает в себя трехфазный неуправляемый выпрямитель (НВ), емкостной фильтр Ф; устройство торможения (УТ), выполненного на IGBT-транзисторе VT7, резисторе RT и датчике напряжения UV1; силовой автономный инвертор напряжения, выполненный на IGBT – транзисторах со встречно параллельными диодами; асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

АИН преобразует нерегулируемое постоянное напряжение на выходе неуправляемого выпрямителя и фильтра в регулируемое синусоидальное напряжение.

Система управления преобразователем (СУП) состоит из следующих блоков: задатчика интенсивности; функционального преобразователя ФП; блока векторной ШИМ, формирующего широтно-импульсный сигнал; драйверов, предназначенных для гальванической развязки и усиления импульсов управления для силовых транзисторов ПЧ; релейного элемента РЭ с гистерезисной характеристикой для управления тормозным транзистором VT7.

ФП обеспечивает постоянство перегрузочной способности электродвигателя в области малых скоростей, задавая такое соотношение между заданиями частоты и напряжения, при котором обеспечивается компенсация падения напряжения на активном сопротивлении статора. Точка 1 на характеристике ФП задает форсировку статорного напряжения и выбирается с учетом ухудшения охлаждения двигателя из условий ограничения тока статора $(0,7...0,8)I_{ном}$, что соответствует при $U_{г1}=0$ установке $U_1 \cong (0,7-0,8)I_{ном}R_1$.

Торможение электропривода происходит в импульсном режиме. При переходе двигателя в генераторный режим энергия, накопленная в индуктивностях фаз статорных обмоток, через обратные диоды передается в емкостной накопитель (конденсатор) Сф Это вызывает рост напряжения в звене постоянного тока, которое фиксируется датчиком напряжения UV1. Как только напряжение на конденсаторе Сф станет больше напряжения на выходе неуправляемого выпрямителя НВ или достигнет верхнего порога срабатывания РЭ, открывается

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					37

- плавное регулирование скорости вращения электродвигателя практически от нуля до номинального значения в ранее нерегулируемых технологических процессах;

- создание замкнутых систем с возможностью точного поддержания заданных технологических параметров;

- синхронное управление несколькими электродвигателями от одного преобразователя частоты;

- уменьшение потребления электроэнергии за счет оптимального управления электродвигателем в зависимости от нагрузки;

- увеличение срока службы электропривода и оборудования;

- повышение надежности и долговечности работы оборудования, упрощение его технического обслуживания.

Исходя из этого можно остановить свой выбор на системе преобразователь частоты - асинхронный двигатель. Данная система полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым к системе.

Одним из наиболее важных параметров электропривода является его мощность. По этой причине при выборе частотного преобразователя, в первую очередь, следует определиться с его нагрузочной способностью. В соответствии с имеющейся номинальной мощностью двигателя выбирается преобразователь частоты, рассчитанный на такую же мощность. И такой выбор будет являться правильным при условии, что нагрузка на валу не будет динамично изменяться, ток не будет значительно превышать номинальное установленное значение, как для данного двигателя, так и преобразователя. Поэтому более корректным было бы производить выбор по максимальному значению тока потребляемого двигателем от частотного преобразователя с учетом перегрузочной способности последнего.

Диапазон изменения выходной частоты преобразователя должен быть не менее требуемого диапазона изменения частоты питания двигателя.

										Лист
										39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

Преобразователь допускает работу двигателя при номинальной скорости с двукратным током нагрузки.

Выбор преобразователя осуществляется на основании номинальных данных предварительно выбранного двигателя:

$$U_{пч} \geq U_{нл},$$

$$I_{пч} \geq I_{нд},$$

$$P_{пч} \geq P_{д},$$

где $U_{нл}$, $I_{нд}$, $P_{д}$ – соответственно номинальное линейное напряжение, номинальный ток статора и мощность двигателя;

$U_{пч}$, $I_{пч}$, $P_{пч}$ – соответственно номинальное напряжение, номинальный ток, мощность преобразователя частоты.

Компания Schneider Electric – ведущий производитель компонентов и оборудования для автоматизации производства. Компания была основана в 1836 году и до сих пор не теряет лидирующую позицию на рынке компонентов автоматизации производства, предприятий промышленности, энергетики и т.д.

Использование преобразователей Schneider Electric не только позволяет достичь экономии вплоть до 70%, но и удешевить техническое обслуживание и эксплуатацию.

Частотные преобразователи Schneider Electric предназначены для бесступенчатой регулировки скорости вращения асинхронных двигателей. Оборудование данной марки производится с использованием современных IGBT-транзисторов и логических контроллеров.

Благодаря эффективному регулированию частот асинхронных двигателей преобразователи частоты Schneider Electric позволяют значительно сократить потребление электроэнергии. Это обеспечивает быструю окупаемость оборудования и снижение производственных затрат.

Преобразователи частоты Schneider Electric характеризуются универсальностью, безотказностью, повышенной надежностью и долгим сроком

									Лист
									40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

службы. Оборудование давно зарекомендовало себя на рынке, ведь эта марка является знаком высокого качества.

Преобразователь Schneider Electric Altivar 71 может использоваться для решения многочисленных задач, требующих применения приводов с изменяемыми скоростями вращения. Модели серии характеризуются высоким КПД и значительной перегрузочной способностью (170% от номинального тока в течение 60 сек.). Одна из особенностей устройств – широкие возможности конфигурации под различные задачи.

ПЧ Schneider Electric Altivar 71 имеют микропроцессорную систему управления, а также используют современные технологии на базе IGBT транзисторов.

За счет применения широтноимпульсной модуляции с опцией выбора частоты коммутации достигается практически бесшумная работа электрического двигателя.

Преобразователи, которые поставляются с заводскими настройками, уже выступают оптимальными решениями для обширной сферы самых различных простых применений в области регулирования скоростей. Наличие расширенного перечня параметров и функций позволяет использовать такое приводное оборудование и для специфических условий.

Основные особенности:

- простой пуск в эксплуатацию;
- защита двигателя и преобразователя;
- бесшумная работа двигателя благодаря высокой частоте импульсов;
- U/f-управление линейное;
- U/f^2 -управление квадратичное;
- параметрируемая кривая зависимости U/f;
- компенсация скольжения;
- автоматический повторный запуск при пропадании сети или нарушениях режима;

									Лист
									41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

- цифровое микропроцессорное управление;
- новейшая технология IGBT.

Преобразователи частоты Schneider Electric Altivar 71, оснащенные высокоэффективным бездатчиковым способом регулирования по векторному типу успешно применяются для регулирования показателей скорости вращения низковольтных электродвигателей переменного тока. Также преобразователи этого класса рационально использовать в процессах с высокой динамикой и повышенным набором требований к стартовому моменту и перегрузке.

Исходя из поставленных требований по выбору преобразователя частоты, выбираем преобразователь Schneider Electric Altivar 71 HU40N4, данные приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Номинальные данные преобразователя частоты.

Тип	Altivar 71 HU40N4
Номинальное напряжение, В	380-480
Номинальный ток, А	11,5 для 480 В, 14,1 для 380 В
Номинальная мощность, кВт	4
Класс защиты	IP20



Рисунок 8 – Внешний вид преобразователя частоты Schneider Electric
Altivar 71

3.2 Выбор тормозного модуля и резистора

Тормозной модуль – электрическое переключающее устройство коммутирующее напряжение постоянного тока на резистор, на котором энергия рекуперации рассеивается в виде тепла. Тормозные модули включаются автоматически, когда напряжение на шине постоянного тока превышает установленный уровень, зависящий от номинального напряжения питания инвертора.

Тормозные резисторы требуются всегда, когда требуется эффективное торможение; во избежание ошибки перенапряжения, когда двигатель подключен к несбалансированной нагрузке; когда нагрузку тянет двигатель (лифт).

Требуемое время торможения, рассчитанное раньше: $t_T=1,2$ с.

$$ПВТ = \frac{t_m}{t_{\zeta}} = \frac{1,2}{13,7} = 8,7\%$$

						13.03.02.2018.584.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			43

Максимальная мощность торможения:

$$P_{Tmax} = t_T \cdot M_{Tmax} \cdot \omega = 1,2 \cdot 40 \cdot 96 = 4608 \text{ Вт.}$$

Определим максимальную электрическую мощность торможения:

$$P_{emax} = P_{Tmax} - k \cdot P_d - (1 - \eta_p) \cdot P_{Tmax} = 4608 - 0,2 \cdot 4000 - 0,03 \cdot 4608 = 3669,7 \text{ Вт,}$$

где k – коэффициент, зависящий от мощности двигателя, $P_d = 4$ кВт $k=0,2$;
 η_p – КПД редуктора.

Рассчитаем номинальную мощность тормозного резистора:

$$P_{TH} = \frac{P_{emax}}{f_k} = \frac{3669,7}{10} = 366,9 \text{ Вт,}$$

где f_k – коэффициент, зависящий от ПВ. Определяем по рисунку 9.

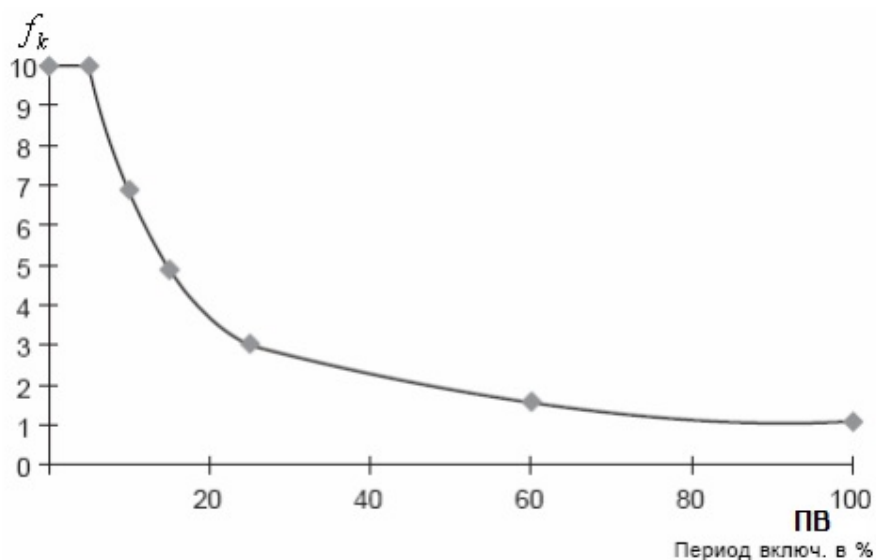


Рисунок 9 – Зависимость f_k от ПВ

Для выбора тормозного модуля нужно рассчитать ток во время торможения, который будет коммутировать тормозной модуль:

$$I_T = \frac{U_p}{R_T} = \frac{760}{160} = 4,75 \text{ А;}$$

По полученным значениям выбираем тормозной резистор: ATV7140N4 резистор тормозной VW3 A7 704. Значение сопротивления $R=15$ Ом.

Номинальная мощность тормозного резистора $P_{тн}=1000$ Вт. Рекомендован для установки на электропривод мощностью $P=4000$ Вт.



Рисунок 10 – Внешний вид тормозного резистора

У преобразователей частоты Schneider Electric Altivar 71 мощностью до 160 кВт имеется встроенный тормозной модуль.

Также по рекомендациям производителя необходимо выбрать сетевой дроссель. Сетевой дроссель необходимо выбирать по номинальному току преобразователя частоты и по рассчитанной индуктивности дросселя $L_{др}$.

$$L_{др} = \frac{U_{л} \cdot 0,02}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot I_{ннч} \cdot f_c} = \frac{380 \cdot 0,02}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 11,5 \cdot 50} = 0,0013 \text{ Гн,}$$

где f_c – частота сети.

В нашем случае $I_{ннч}=11,5$ А, исходя из поставленных условий выбираем сетевой дроссель ATV7140N4 VW3 A4 553 с номинальным током 16 А. Индуктивность $L=2$ мГн.

									Лист
									45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

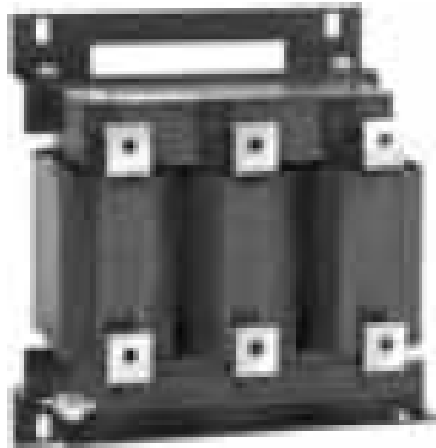


Рисунок 11 – Внешний вид сетевого дросселя

3.3 Расчет статических характеристик электропривода

3.3.1 Расчет параметров схем пуска и торможения

При питании двигателя от преобразователя частоты появляется возможность плавного регулирования напряжения, поэтому переходные процессы пуска и торможения обеспечиваются формированием напряжения управления преобразователем. В разомкнутой системе ПЧ-АД чаще всего применяют линейное нарастание напряжения управления, что определяет линейное нарастание напряжения питания двигателя. В этом случае величина динамического момента двигателя определяется темпом нарастания напряжения, и, в конечном итоге, производной скорости идеального холостого хода двигателя во времени $d\omega/dt$.

В установившемся режиме нарастания скорости двигателя, когда затухают свободные составляющие переходного процесса,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega_0}{dt} = \xi_0 = const, \quad (18)$$

а величина установившегося значения динамического момента двигателя

									Лист
									46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

$$M_{дин} = J \cdot \xi_0. \quad (19)$$

Для формирования линейного закона изменения напряжения управления на вход преобразователя подключают интегральный задатчик интенсивности ЗИ, выходное напряжение которого при подаче на его вход скачка задающего напряжения $U_{зад}$ изменяется по линейному закону. При достижении величины $U_{зад}$ нарастание напряжения на выходе ЗИ прекращается. Выходное напряжение ЗИ, таким образом, является управляющим напряжением преобразователя, а величина $U_{зад}$ определяет установившуюся величину скорости ω_0 двигателя. Темп нарастания скорости определяется величиной базовой постоянной времени ЗИ $T_{зи}$, численно равной времени достижения выходного напряжения преобразователя от нуля до базового значения U_n .

Таким образом, базовая постоянная задатчика интенсивности определяется по формуле:

$$T_{зи} = \frac{T_\delta \cdot M_n}{M_{дин}}, \quad (20)$$

где T_δ – механическая постоянная времени,

$$T_{\delta 1} = \frac{J_1 \cdot \omega_{0n}}{M_n} = \frac{0,961 \cdot 104,66}{40,2} = 2,5 \text{ с};$$

тогда:

$$T_{зи1} = \frac{T_{\delta 1} \cdot M_n}{M_{дин1}} = \frac{2,5 \cdot 40,2}{76,88} = 1,3 \text{ с};$$

3.3.2 Построение статических характеристик электропривода

После выбора основного оборудования построим статические характеристики электропривода. Характеристики будем снимать в среде *Matlab*. Характеристики будем строить по точкам, которые получим при расчетах. На рисунке 3.6 представлены статические характеристики электропривода.

										Лист
										47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

Виртуальная модель позволяет наглядно промоделировать процессы, происходящие в системе. Для этого необходимо ввести параметры электродвигателя, указать время задатчика интенсивности.

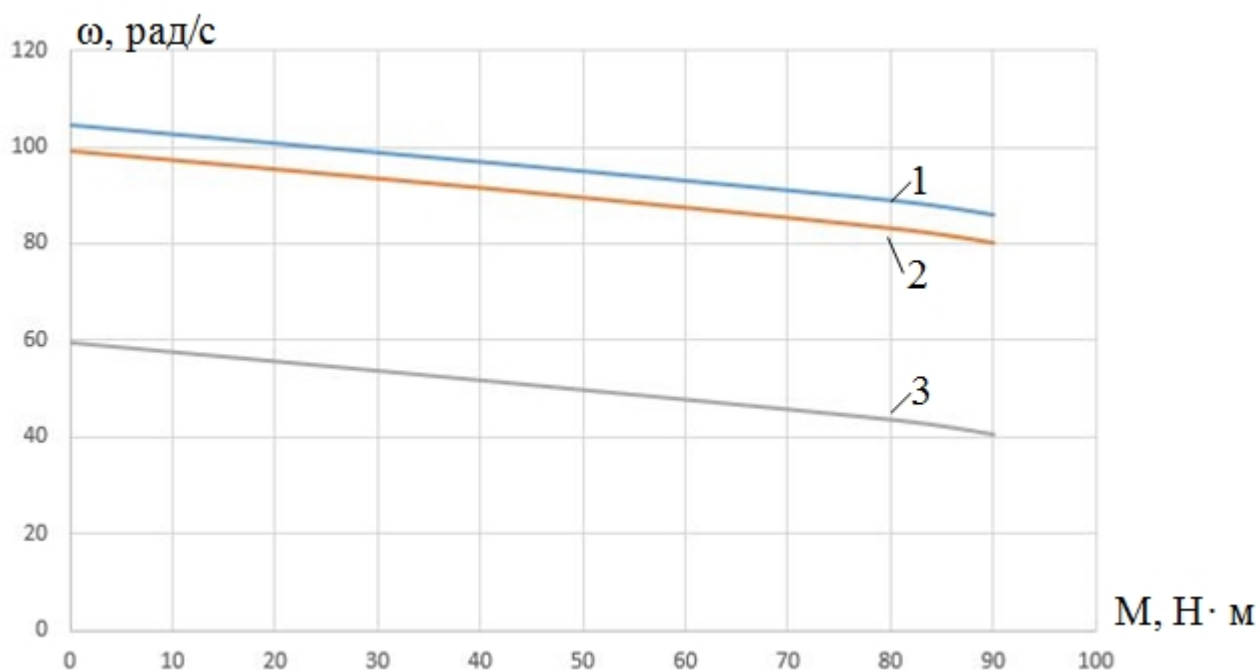


Рисунок 12 – Статические характеристики электропривода

(1 – естественная характеристика; 2 – искусственная характеристика, прокат листа; 3 – искусственная характеристика, подача листа в станок)

Также в среде *Matlab* можно получить временные диаграммы, поясняющие принцип работы преобразователя частоты. Далее будут приведены временные диаграммы фазного напряжения U_{1a} , фазного тока I_{1a} , напряжения на статоре двигателя U_{1s} , тока статора I_{1s} . Диаграммы снимались при номинальном моменте двигателя.

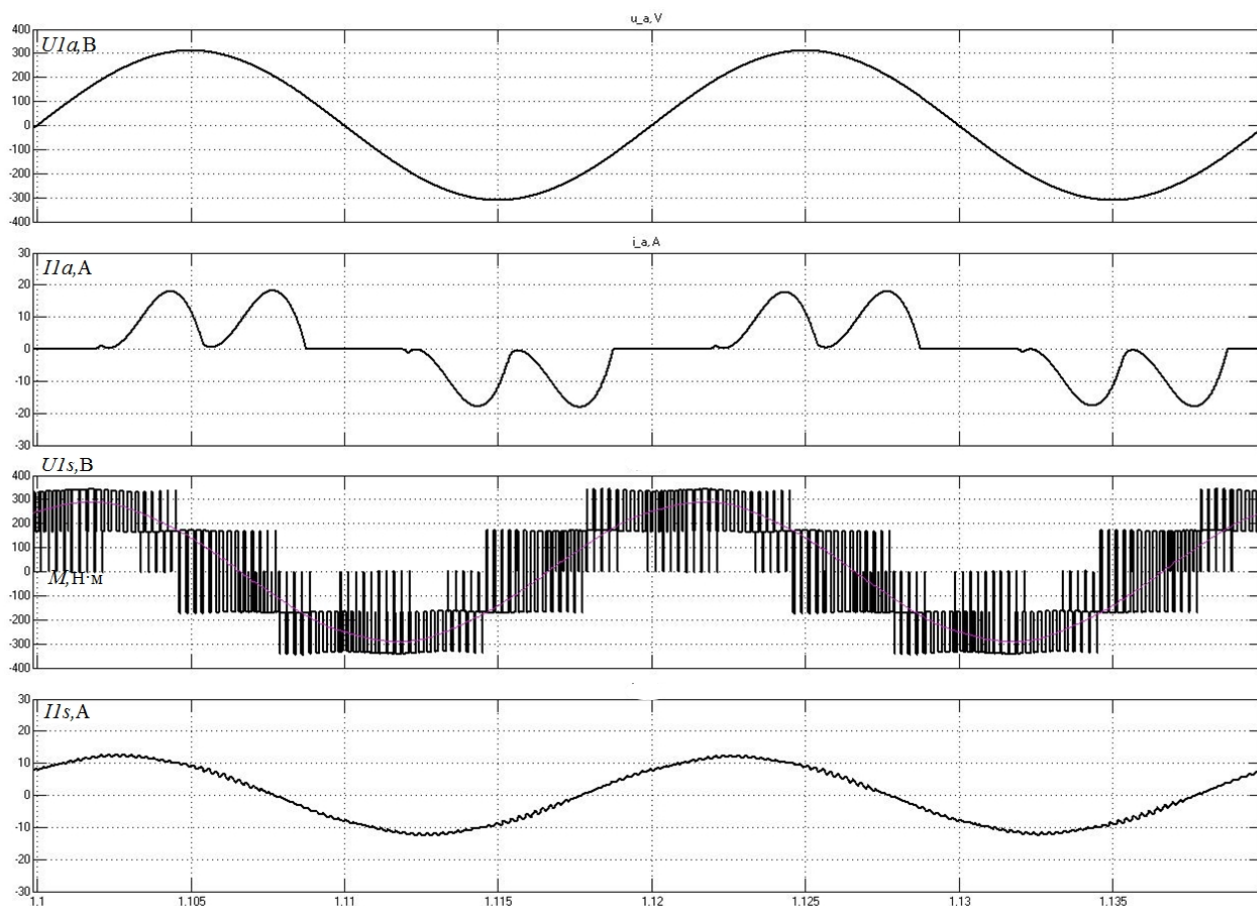


Рисунок 13 – Временные диаграммы фазного напряжения U_{1a} , фазного тока I_{1a} , напряжения на статоре двигателя U_{1s} , тока статора I_{1s}

Из рисунка 13 видно, что ток, потребляемый из сети выпрямителем, несинусоidalен. Это связано с тем, что трехфазный неуправляемый выпрямитель работает на емкостную нагрузку и генерирует высшие гармоники, которые приводят к искажению сетевого напряжения.

Высокое содержание высших гармоник тока приводит к ухудшению энергетических показателей.

3.4 Расчет переходных процессов электропривода

Расчет переходных режимов необходим:

- для оценки их соответствия требованиям технологического процесса рабочего органа;
- для оценки механических и электрических перегрузок;
- для правильного выбора мощности двигателей, преобразователей и аппаратуры управления.

На характер переходного процесса оказывают существенное влияние механическая инерция электропривода, жесткость механической передачи, электромагнитная инерция обмоток двигателя и элементов преобразователя.

3.4.1 Расчет переходных процессов

При современном состоянии вычислительной техники и разработанных численных методах непосредственное решение системы дифференциальных уравнений с подстановкой необходимых параметров возможно осуществить программным методом. Для этого необходимо составить программу расчета переходных процессов для решения конкретных задач исследования.

Используем готовую программу для расчета переходных процессов в системе ПЧ-АД под названием «*zipchad*», которая основана на дифференциальных и алгебраических уравнениях элементов систем электропривода, приведенных в приложении.

Подставляя в программу данные параметров схем пуска и торможения, а также данные выбранного двигателя, преобразователя частоты, получаем нагрузочные диаграммы переходных процессов в нашей системе электропривода.

										Лист
										50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

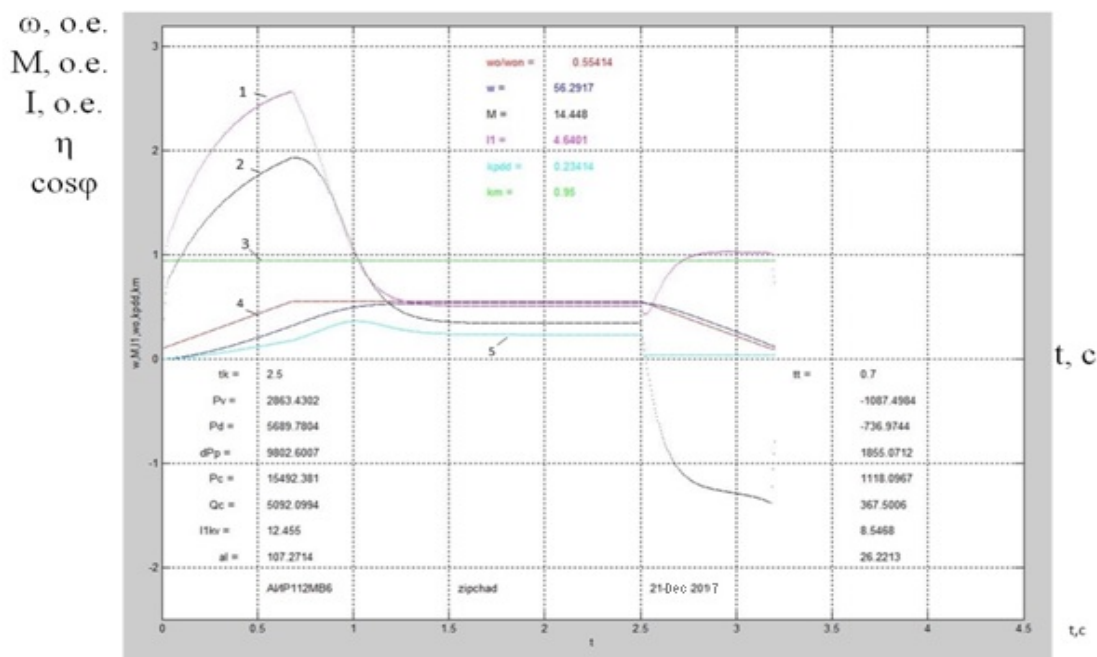


Рисунок 14 – Временны диаграммы переходных процессов.

Первый участок: подача листа

(1 – ток, 2 – момент, 3 – коэф. мощности, 4 – скорость двигателя, 5 – КПД)

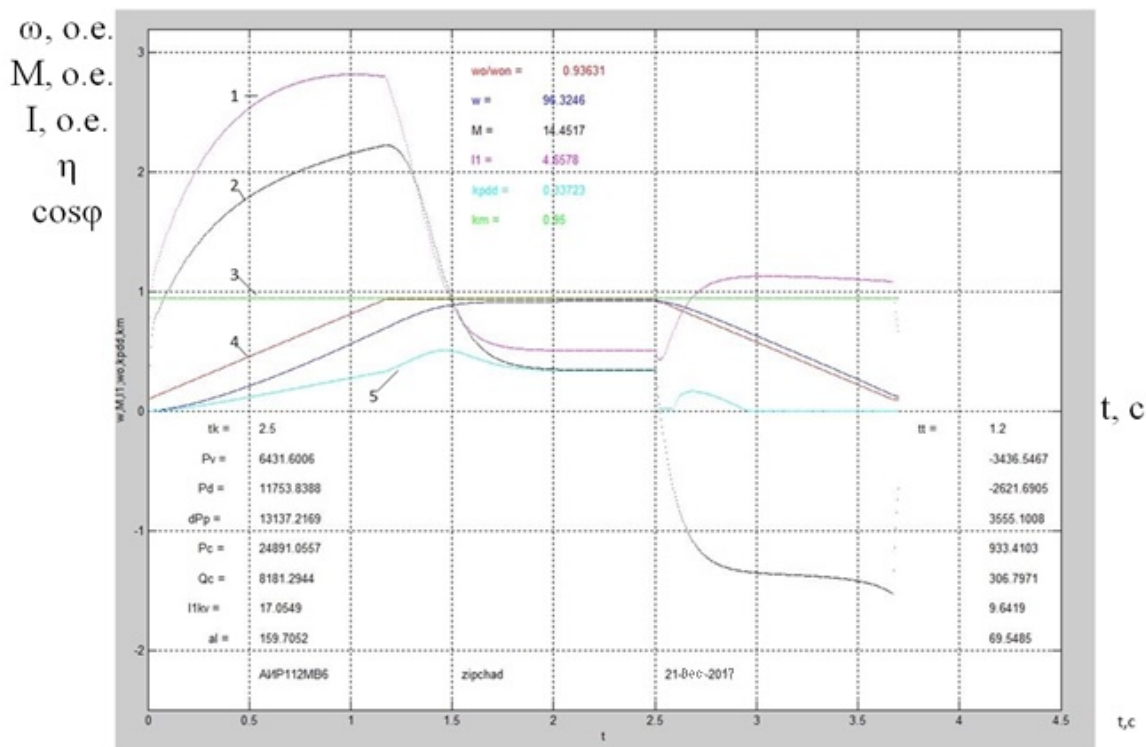


Рисунок 15 – Временны диаграммы переходных процессов.

Второй участок: прокат и удаление листа

(1– ток, 2– момент, 3– коэф. мощности, 4– скорость двигателя, 5– КПД)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.584.01 ПЗ

Лист

51

3.4.2 Расчет интегральных показателей

Существенной задачей расчета переходных процессов различных систем электропривода является оценка интегральных показателей работы конкретного электропривода за цикл. После расчета нагрузочных диаграмм переходных процессов необходимо выполнить ряд дополнительных расчетов с целью получения ответов на вопросы технического задания на проектирование – соответствие результатов расчетов выданному заданию и современному состоянию электропривода, в том числе и мировому.

Источником информации по проекту являются нагрузочные диаграммы электропривода, и расчетные данные программы «*zipchad*», причем параметры, полученные во время расчета, представлены в абсолютных величинах

Интегральные показатели электропривода приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Интегральные показатели электропривода

Участок движения		Подача листа			Прокат и отвод листа		
Параметр	Обозн.	Пуск	Уст.	Торм.	Пуск	Уст.	Торм.
Активная эл. мощность из сети	P_c , Вт	7397,3	15485,7	1128,5	1699,3	26970	941,9
Реактивная эл. мощность из сети	Q_c , В·Ар	2431,4	9542,3	370,9	5587,4	10452	309,6
Активная эл. мощность двигателя	P_d , Вт	2580,5	20376,3	-741,6	7622,4	19059	-2629
Мех. мощность на валу	P_v , Вт	709,2	5595,5	-1084	3210,3	15389	-3423
Угол поворота вала двигателя	α , рад	11	1160	11	45	1080	45
Среднеквадратичный ток якоря	$I_{ср.кв}$, А	16,44	6,102	8,58	16,8	8,7	9,66
Время работы на участке	t_p , с	0,7	20,72	0,7	1,2	11,3	1,2
Максимальный момент	$M_{макс}$, Н·м	72,36	-	60,3	86,4	-	60,3

Продолжение таблицы 7

Участок движения		Подача листа			Прокат и отвод листа		
Максимальный ток	I_{\max} , А	18	-	9,66	18,3	-	10,12
Установившаяся скорость	$\omega_{уст}$, рад/с	-	56,3	-	-	96,3	-
Установившийся момент	$M_{уст}$, Нм	-	14,4	-	-	14,4	-
Установившийся ток якоря	$I_{уст}$, А	-	4,64	-	-	4,65	-
Средний КПД	$\eta_{ср}$, %	0,19	0,43	-	0,35	0,53	-
Средний $\cos(\varphi)$	$\cos(\varphi)_{ср}$	0,95	0,95	-	0,95	0,95	-

					13.03.02.2018.584.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

3.5 Энергетические показатели электропривода

Энергетические показатели электропривода характеризуют экономичность преобразования энергии системой электропривода (коэффициент полезного действия) и экономичность потребления энергии от сети (коэффициент мощности).

Для электропривода, работающего в повторно-кратковременном режиме работы, универсальной оценкой энергетических показателей является их средневзвешенные значения за цикл работы (цикловые значения). Мгновенные значения КПД и $\cos(\varphi)$ могут характеризовать экономичность работы электропривода только в установившихся режимах работы.

Для расчета энергетических показателей в проекте использованы результаты расчета переходных процессов на ЭВМ (таблица 7). Вычислим значения механической W_A , активной W_P и реактивной W_Q энергий за цикл.

Энергия за время цикла складывается из суммы энергий за время переходных процессов и за время работы в установившихся режимах.

Механическая энергия за цикл:

$$W_A = \sum A_i \cdot t_i = 709,2 \cdot 0,7 + 5595,5 \cdot 20,72 + (-1084) \cdot 0,7 + 3210,3 \cdot 1,2 + 15389 \cdot 11,3 + (-3423) \cdot 1,2 = 289300 \text{ Дж};$$

Активная электрическая энергия из сети за цикл:

$$W_P = \sum P_i \cdot t_i = 7397,3 \cdot 0,7 + 15485,7 \cdot 20,72 + 1128,5 \cdot 0,7 + 1699 \cdot 1,2 + 26970 \cdot 11,3 + 941 \cdot 1,2 = 631300 \text{ Дж};$$

Реактивная электрическая энергия из сети за цикл:

$$W_Q = \sum Q_i \cdot t_i = 2431,4 \cdot 0,7 + 9542,3 \cdot 20,72 + 370,9 \cdot 0,7 + 5587,4 \cdot 1,2 + 10452 \cdot 11,3 + 309,6 \cdot 1,2 = 324900 \text{ Дж}.$$

									Лист
									54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

Цикловой КПД представляет собой отношение произведенной механической работы за цикл к потребленной за это время электроэнергии (активной энергии) из сети:

$$\eta_{ц} = W_A/W_P = 289300/631300 = 0,46.$$

И, наконец, определяем цикловой $\cos(\varphi)$:

$$\cos(\varphi)_{ц} = \frac{W_P}{\sqrt{W_P^2 + W_Q^2}} = \frac{631300}{\sqrt{631300^2 + 324900^2}} = 0,89.$$

3.6 Проверка электропривода на заданную производительность, по нагреву и перегрузочной способности двигателя

Проверка на заданную производительность состоит в сравнении рассчитанного фактического времени работы электропривода с заданным временем. Определим фактическое время работы:

$$t_{\phi} = \sum_{k=1}^m t_{\text{вк}} = 0,7+20,6+0,7+1,2+11,2+1,2 = 35,6 \text{ с};$$

$$t_p = 38 \text{ с}.$$

Условие производительности выполнено, поскольку $t_{\phi} < t_p$.

Теперь рассчитаем относительную продолжительность включения:

$$ПВ_{\phi} = \frac{1}{t_{ц}} \cdot \sum_{K=1}^m t_K = \frac{1}{60} \cdot (0,7+20,6+0,7+1,2+11,2+1,2) = 0,59.$$

Проверку выбранного двигателя по нагреву выполняем методом эквивалентного тока

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \Delta t_i}} \leq I_{\text{дон}}, \quad (21)$$

где I_i – среднеквадратичное значение тока на i -ом участке;

Δt_i – длительность i -го участка работы;

β_i – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя ;

$I_{\text{доп}}$ – допустимый по нагреву ток.

Ухудшение условий охлаждения двигателя в переходных режимах учитывают коэффициентом ухудшения теплоотдачи, который в зависимости от скорости, принимает значения:

$$\beta_i = \beta_0 = 0,5 \quad \text{при} \quad 0 \leq \omega \leq 0,2 \cdot \omega_n ;$$

$$\beta_i = \frac{1 + \beta_0}{2} = \frac{1 + 0,5}{2} = 0,75 \quad \text{при} \quad 0,2 \cdot \omega_n \leq \omega \leq 0,8 \cdot \omega_n ;$$

$$\beta_i = 1 \quad \text{при} \quad \omega \geq 0,8 \cdot \omega_n ,$$

где $\beta_0 = 0,5$ для двигателей закрытых с самовентиляцией.

Тогда

$$I_s = \sqrt{\frac{16,44^2 \cdot 0,7 + 6,1^2 \cdot 20,6 + 8,58^2 \cdot 0,7 + 16,8^2 \cdot 1,2 + 8,7^2 \cdot 11,2 + 9,6^2 \cdot 1,2}{2 \cdot (0,5 \cdot 0,25 + 0,75 \cdot 0,45) + 20,6 \cdot 0,75 + 2 \cdot (0,5 \cdot 0,25 + 0,75 \cdot 0,75) + 1 + 11,2 + 1}} = 8,6 \text{ А.}$$

При проверке двигателя по нагреву эквивалентный ток I_s сравниваем с допустимым током $I_{\text{доп}}$ при тех же условиях работы (при той же относительной продолжительности включения).

Допустимый ток рассчитаем через представленное в каталоге значение допускаемого тока $I_{\text{кат}}$ для каталожной ПВ_{кат}, ближайшей к фактической ПВ_ф, полученной по результатам расчета нагрузочных диаграмм

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{кат}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\text{кат}}}{ПВ_{\text{ф}}}} = 9,2 \cdot \sqrt{\frac{0,6}{0,59}} = 9,27 \text{ А};$$

При проверке двигателя по нагреву превышение эквивалентного тока над допустимым является неприемлемым. В нашем же случае $I_s < I_{\text{доп}}$ (8,6 А < 9,27 А), поэтому выбранный двигатель проходит по условиям нагрева.

Проверка двигателя на кратковременную перегрузку заключается в сравнении наибольшего значения момента двигателя с максимально допустимым значением

									Лист
									56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

момента выбранного двигателя. Наибольшее значение момента двигателя определяем по таблице 9: $M_{\max} = 86,4$ Н·м. А максимально допустимое значение момента двигателя: $M_{\max.\text{доп}} = 92,46$ Н·м.

Таким образом, можно заключить, что выбранный двигатель проходит по перегрузочной способности, т.к. $M_{\max} \leq M_{\max.\text{доп}}$ ($86,4$ Н·м $<$ $92,46$ Н·м).

Проверка по нагреву преобразователя выполняется сравнением среднеквадратичного тока двигателя за время работы с номинальным выходным током преобразователя, который должен быть больше, либо равен ему.

Определим среднеквадратичный ток двигателя за время работы:

$$I_{\text{СРКВ}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m I_{\text{срк}}^2 \cdot t_{\text{ек}}}{\sum_{k=1}^m t_{\text{ек}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{16,44^2 \cdot 0,7 + 6,1^2 \cdot 20,6 + 8,58^2 \cdot 0,7 + 16,8^2 \cdot 1,2 + 8,7^2 \cdot 11,2 + 9,6^2 \cdot 1,2}{0,7 + 20,6 + 0,7 + 1,2 + 11,2 + 1,2}} = 8,8 \text{ А.}$$

Поскольку среднеквадратичный ток двигателя меньше номинального тока преобразователя $I_{\text{сркв}} < I_{\text{нмн}}$ ($8,8$ А $<$ $11,5$ А), преобразователь частоты проходит по условию нагрева.

Проверка на кратковременную перегрузку преобразователя заключается в сравнении наибольшего значения тока двигателя с максимально допустимым током преобразователя. Как было сказано ранее Altivar 71 NU40N4 допускает перегрузку в 170% в течение 60 с, т.е. $I_{\max.\text{доп}} = 19,6$ А, а максимальный ток двигателя $I_{\max} = 18,3$ А, но длится менее 1,2 с (см. таблицу 7).

Можно сделать вывод, что преобразователь проходит по перегрузочной способности.

срабатывании датчика П2, который свидетельствует о достижении листом конечного положения, для предотвращения падения листа с рольганга, отключаются подводный рольганг и отводящий рольганг, а также ролики станка.

Рольганги приводятся в движение от асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

4.1.2 Требования системы автоматизации

Система автоматизации должна обеспечивать работу устройства без участия оператора. Функции оператора должны сводиться к подаче напряжения на все элементы системы и постановке тумблера выбора режима «Авто/Руч» в положение «Авто» - автоматический режим.

Далее оператор оценивает ситуацию на производственном участке и, если есть возможность начать работу в автоматическом режиме, запускает систему в работу.

Если же ситуация на производственном участке не позволяет начать работу в автоматическом режиме, он должен в ручном режиме привести оборудование к тому состоянию, из которого система может быть введена в автоматический режим работы. Переход на ручной режим работы осуществляется переводом тумблера «Авто/Руч» в положение «Руч».

Система управления должна иметь возможность переключения с автоматического на ручной режим работы, необходимый при наладке, ремонтах, устранении аварийных ситуаций и др.

Сигнал о возможности работы в автоматическом режиме должен поступать в виде загорания лампочки «Готовность для работы в автоматическом режиме».

В автоматическом режиме система автоматизации должна обеспечить следующие функции:

- включение/отключение рольгангов согласно алгоритму;
- включение/отключение станка;

										Лист
										60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

В ручном режиме возможно управление рольгангами, валками станка, роликами станка.

4.1.3 Алгоритм работы системы автоматизации. Общие сведения

По условию поставленной задачи система автоматизации участка листоправильного станка должна обеспечивать работу в двух режимах: ручном и автоматическом.

Из представленного выше описания технологического процесса и последовательности работы следует, что система автоматизации должна формировать следующие выходные команды:

- включение двигателей подающего рольганга;
- включение двигателей отводящего рольганга;
- включение листоправильного станка.

Кроме команд на исполнительные механизмы необходимо задействовать выходные сигналы на индикацию и сигнализацию состояния системы, для удобства эксплуатации и устранения неполадок в системе. На пульт управления оператора будут выводиться следующие сигналы:

- сигнал о готовности всей системы;
- сигнал «Авария».

Для управления механизмами в ручном режиме введен пульт управления. С него оператор осуществляет работу в ручном режиме и может задавать следующие входные сигналы:

- команда «Пуск» в автоматическом режиме;
- команда «Стоп» в автоматическом режиме;
- команда с переключателя «Авто/Руч» для выбора автоматического или ручного управления;
- сброс аварии.

										Лист
										61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

Для автоматизации работы системы необходимо иметь информацию о состоянии производственного объекта. Поэтому необходимо использовать следующие датчики:

- датчик индуктивный П0 о наличии листа на подающем рольганге;
- датчик индуктивный П1 о достижении листом станка;
- датчик индуктивный П2 о достижении листом конечного положения.

Таблица 8 – Сигналы и команды, используемые в системе автоматизации

Наименование сигнала или команды	Обозначение
1	2
Входные сигналы	
Пуск	Пуск
Стоп	Стоп 1
Автоматический режим	Авто
Ручной режим	Руч
Сигнал с датчика П0	П0
Готовность рольгангов	ГотРол
Готовность станка	ГотСт
Сигнал с датчика П1	П1
Сигнал с датчика П2	П2
Рольганг подающий вперёд в ручном режиме	РолПВпРуч
Рольганг подающий назад в ручном режиме	РолПНРуч
Рольганг отводящий вперёд в ручном режиме	РолОтВпРуч
Рольганг отводящий назад в ручном режиме	РолОтНРуч
Стоп подающего рольганга в ручном режиме	Стоп 2
Стоп отводящего рольганга в ручном режиме	Стоп 3
Сброс аварии	СбросАв
Сигнал охранной зоны системы	ОЗ
Выходные сигналы	
Готовность всей системы	ГотС
Сигнал «Авария»	Ав
Включение подающего рольганга	ПодРол
Включение отводящего рольганга	ОтРол
Отключение системы	ОтклС

4.1.4 Описание программы

В начале работы подается питание на блок управления системой, все силовые элементы схемы. Сигнал готовности всей системы «ГотС» возникает в автоматическом режиме, при наличии сигналов готовности рольгангов «ГотРол» и готовности прокатных валков «ГотВ» и сохраняется до тех пор, пока не возникнет авария «Ав»:

$$ГотС = (ГотРол \cdot ГотВ + ГотС) \cdot \overline{Ав}$$

Память команды «Пуск» нужна для того, чтобы включить все механизмы согласно заданию. Память «ППуск» возникает при пуске и сохраняется до нажатия кнопки «Стоп» или до поступления сигнала об аварии:

$$ППуск = (Пуск + ППуск) \cdot \overline{Стоп} \cdot \overline{Ав}$$

Память команды автоматического режима «ПАвто» необходима для того, чтобы обеспечить нормальную работу всех механизмов в автоматическом режиме. Команда «ПАвто» возникает при появлении команды автоматического режима «Авто» и сохраняется до тех пор, пока не появится команда на ручной режим «Руч»:

$$ПАвто = (Авто + ПАвто) \cdot \overline{Руч}$$

Память команды ручного режима «ПРуч» необходима для того, чтобы обеспечить нормальную работу всех механизмов в ручном режиме. Команда «ПРуч» возникает при появлении команды ручного режима «Руч» и сохраняется до тех пор, пока не появится команда на автоматический режим «Авто»:

$$ПРуч = (Руч + ПРуч) \cdot \overline{Авто}$$

Подающий рольганг включается на пониженной скорости в автоматическом режиме, когда есть память о команде «Пуск», память об автоматическом режиме, при готовности всей системы, и при наличии листа, о чем информирует датчик П0. Движение сохраняется до тех пор пока лист не дойдёт до срабатывания датчика П1:

									Лист
									63
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

$$\text{ПодРолПон} = (\text{ППуск} \cdot \text{ГотС} \cdot \text{ПАвто} \cdot \text{П0} + \text{ПодРол}) \cdot \overline{\text{П1}} \cdot \overline{\text{Стоп}} \cdot \overline{\text{Ав}}$$

При достижении положения П1 рольганги включаются на основную скорость. Когда есть память о команде «Пуск», память об автоматическом режиме, при готовности всей системы, при срабатывании датчика П1, который свидетельствует о подходе листа к станку. Далее включается основная скорость проката и сохраняется до положения П2.

$$\text{ОснРолПон} = (\text{ППуск} \cdot \text{ГотС} \cdot \text{ПАвто} \cdot \text{П1} + \text{ОснРолПон}) \cdot \overline{\text{П2}} \cdot \overline{\text{Стоп}} \cdot \overline{\text{Ав}}$$

Авария возникает если при поданном сигнале Пуск (используем память Пуска) нет готовности рольгангов, готовности станка, сигнал с охранной зоны.

$$\text{Ав} = (\text{ППуск} \cdot \overline{\text{ГотПод}} \cdot \overline{\text{ГотРол}} \cdot \overline{\text{ГотТел}} \cdot \overline{\text{ОЗ}} + \text{Ав}) \cdot \overline{\text{СбросАв}}$$

										Лист
										64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

4.2 Разработка функциональной схемы автоматизации

В рассматриваемой системе автоматизации можно выделить следующие функциональные элементы:

- блок питания (БП);
- пульт управления (ПУ);
- блок управления (БУ);
- системы управления подводящим рольгангом, отводящим рольгангом, станком (СУ);
- двигатель подводящего рольганга (М1);
- двигатель отводящего рольганга (М2);
- двигатель валков станка (М3);
- двигатель роликов станка (М4);
- датчики технологической информации (П0, П1, П2, ОЗ).

На функциональной схеме показана взаимосвязь отдельных элементов системы автоматизации. Основным связующим элементом является программируемый контроллер.

Описание функциональной схемы:

С пульта управления (ПУ) оператор задает сигналы управления рольгангами, управления прокатными валками, а также может наблюдать за протеканием технологического процесса. С пульта управления сигналы поступают на блок управления (БУ). Блок управления формирует команды для преобразователей частоты рольгангов, прокатных валков, роликов станка (СУ). Сигналы готовности преобразователей частоты рольгангов, валков станка. Также сигнал об аварии поступают на пульт управления для отслеживания процессов в системе. Сигналы с датчиков поступают на блок управления, пульт управления и блок управления получают питание от блока питания (БП).

										Лист
										65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

4.3 Выбор элементной базы автоматизации и преобразователей технологической информации

4.3.1 Выбор электродвигателей

Отводящий и подводящий рольганги приводятся в движение асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором АИР 112МВ6, технические данные приведены в таблице 3.

4.3.2 Выбор преобразователей частоты

Для двигателей подводящего и отводящего рольганга выбираем по каталогу преобразователи частоты Schneider Electric Altivar 71 HU40N4.

Данные приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Каталожные данные ПЧ Altivar 71 HU40N4.

Тип	Altivar 71 HU40N4
Номинальное напряжение, В	380-480
Номинальный ток, А	11,5 для 480 В, 14,1 для 380 В
Номинальная мощность, кВт	4
Класс защиты	IP20

4.3.3 Выбор датчиков

Для получения информации о наличии листа в начале участка и информации о достижении листом конечного положения на рольганге выберем индуктивные датчики типа ВБИ-Ф80-40К-2183-С.9.18. Технические данные датчика приведены в таблице 10.

Таблица 10 – Технические данные датчика ВБИ-Ф80-40К-2183-С.9.18

Размер корпуса, ДхВхШ, мм	40x80x80
Номинальный расстояние срабатывания, мм	50
Гарантированный интервал срабатывания, мм	0...40,5
Способ установки в металл	Невстраиваемый
Диапазон рабочих напряжений, В	10...30
Максимальный рабочий ток, мА	500
Падение напряжения при макс.токе, В	2,0
Тип контакта / Структура выхода	PNP Переключающий
Частота переключения	25 Гц
Диапазон рабочих температур	-55 ⁰ С...+85 ⁰ С
Присоединение / Подключение	Клеммник (до 2,5 мм ²)
Световая индикация	Есть
Комплексная защита	Есть
Материал корпуса	Полиамид
Степень защиты	IP68

Габаритный чертеж и схема подключения датчика ВБИ-Ф80-40К-2183-С.9.18 представлены соответственно на рисунке 18 и рисунке 19.

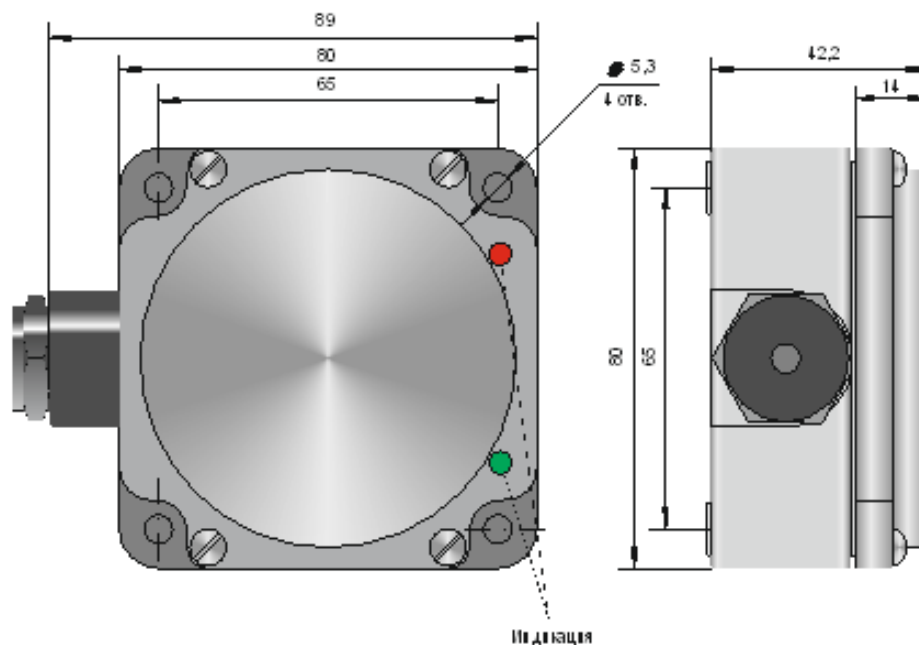


Рисунок 18 – Габаритный чертеж датчика ВБИ-Ф80-40К-2183-С.9.18



Рисунок 19 – Схема подключения датчика ВБИ-Φ80-40К-2183-С.9.18

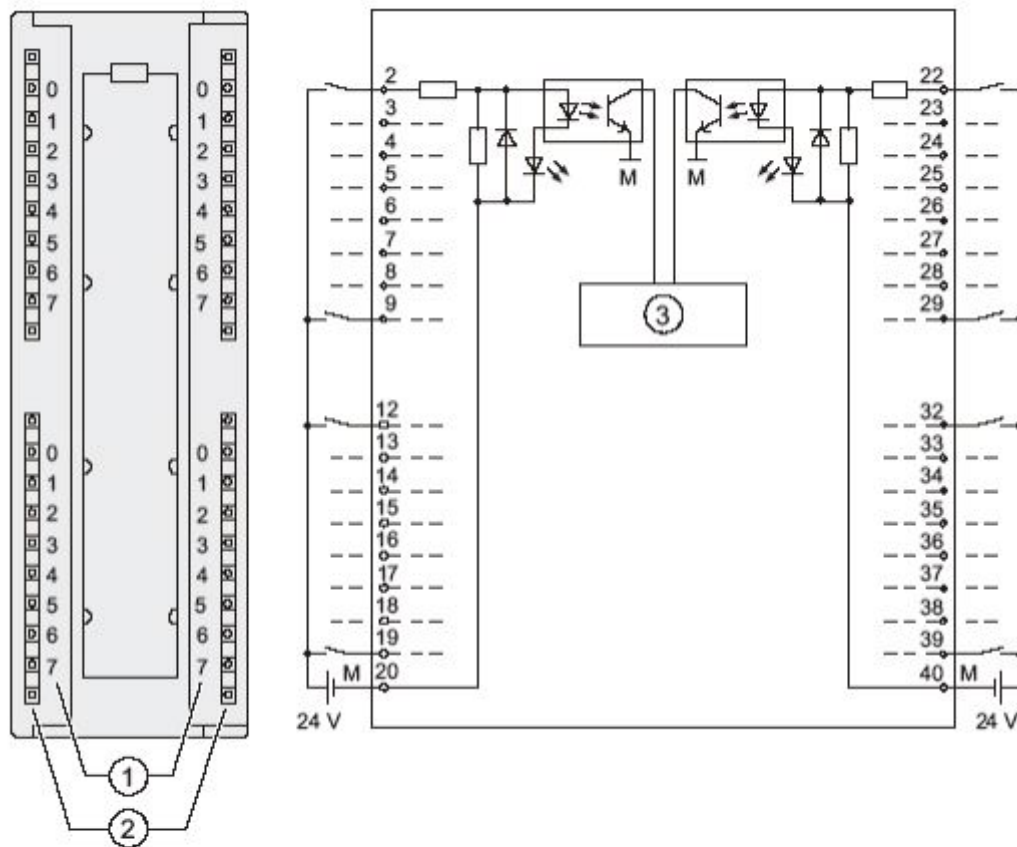
4.3.4 Выбор программируемого контроллера

В качестве программируемого контроллера выбираем Siemens SIMATIC S7-1200.

Контроллерный блок включает в себя:

- блок питания типа SITOP;
- процессорный модуль CPU1215 (заказной номер 6ES7 211-1HD30-0XB0);
- модуль ввода SM1221-DI16 x DC24V (6ES7 221-1BH30-0XB0), на 16 каналов ввода сигналов постоянного тока напряжением 24 В;
- модуль вывода SM1223-DI8,DQ8 x DC24V/0,5A (6ES7 223-1PH30-0XB0), на 8 релейных выходов и 8 входов;
- коммуникационный модуль с интерфейсом RS-232 CM1241(6ES7 241-1AH30-0XB0).

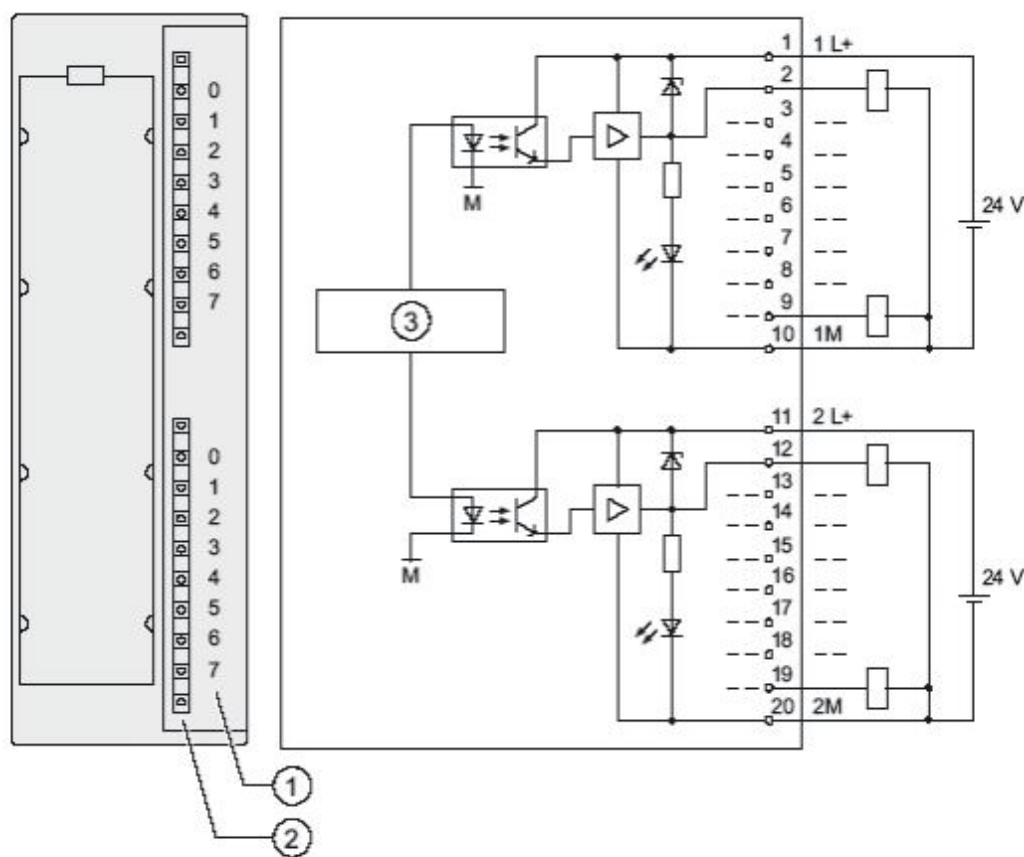
Схема подключения модуля SM1221-DI16 x DC24V представлена на рисунке 20.



- ① Номера каналов
- ② Индикаторы состояния - зеленые
- ③ Подключение к задней шине

Рисунок 20 – Схема подключения модуля SM1221-DI16 x DC24V

Схема подключения модуля SM1223-DI8,DQ8 x DC24V/0,5A представлена на рисунке 21.



- ① Номер канала
- ② Индикаторы состояния - зеленые
- ③ Подключение к задней шине

Рисунок 21 – Схема подключения модуля SM1223-DI8, DQ8 x DC24V/0,5A

Также необходимо выбрать блок питания. Для обеспечения питания датчиков и модулей ввода/вывода необходимо выбрать блок питания. Требуемая мощность блока питания определяется суммой мощностей потребителей, нагруженных на него, причем для оптимального использования необходимо учитывать то, что не все потребители включены одновременно. Для упрощения выбора, а также для обеспечения запаса, мощность блока питания выбирается по суммарной мощности всех потребителей.

По суммарной мощности потребителей выбираем блок питания Siemens Sitop PM 1207 2,5A с номинальным током 2,5 А и напряжением 24 В.

4.4 Разработка программного обеспечения системы автоматизации

Перед составлением программы необходимо определить адреса входных и выходных переменных в соответствии с их подключением к программируемому устройству, а также задать адреса промежуточных переменных и используемых таймеров. Адресация переменных, используемых в программе, приведена в таблице 11.

Таблица 11 – Адресация переменных

Наименование сигнала или команды	Обозначение	Адрес
1	2	3
Входные сигналы		
Пуск	Пуск	I0.0
Стоп	Стоп 1	I0.1
Автоматический режим	Авто	I0.2
Ручной режим	Руч	I0.3
Готовность рольгангов	ГотРол	I0.5
Готовность станка	ГотСт	I0.6
Сигнал с датчика П0	П0	I0.7
Сигнал с датчика П1	П1	I1.0
Сигнал с датчика П2	П2	I1.1
Рольганг подающий вперёд в ручном режиме	РолПВпРуч	I1.2
Рольганг подающий назад в ручном режиме	РолПНРуч	I1.3
Рольганг отводящий вперёд в ручном режиме	РолОтВпРуч	I1.4
Рольганг отводящий назад в ручном режиме	РолОтНРуч	I1.5
Стоп подающего рольганга в ручном режиме	Стоп 2	I1.6
Стоп отводящего рольганга в ручном режиме	Стоп 3	I1.7
Сброс аварии	СбросАв	I2.0
Сигнал охранной зоны системы	ОЗ	I2.1
Выходные сигналы		
Готовность всей системы	ГотС	Q0.0
Сигнал «Авария»	Ав	Q0.1
Включение подающего рольганга	ПодРол	Q0.2
Включение отводящего рольганга	ОтРол	Q0.4
Отключение системы	ОтклС	Q0.5
Включение прокатных валков	ВПВ	Q0.6

Продолжение таблицы 11

Наименование сигнала или команды	Обозначение	Адрес
Включение роликов станка	ВРС	Q0.7
Промежуточные переменные		
Память о включенном режиме авто	Павто	M0.0
Память о включенном ручном режиме	Пручн	M0.1
Память о нажатой кнопке «Пуск»	ППуск	M0.2

Листинг программы приведен ниже. Программа написана на языке *LD*.

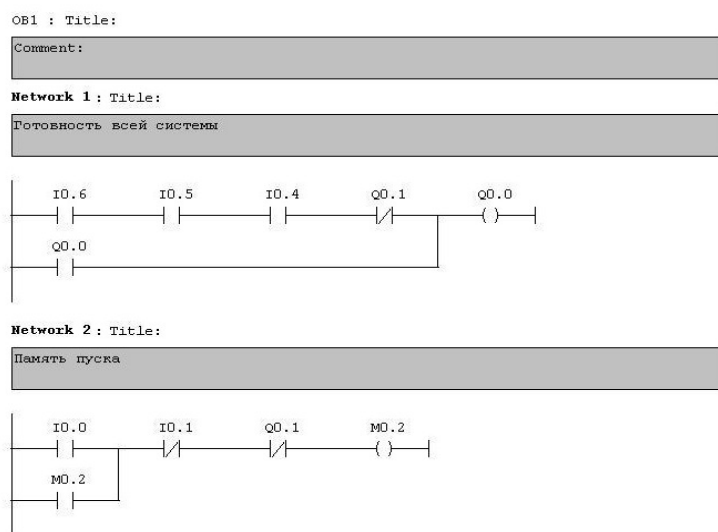


Рисунок 22 – Листинг программы

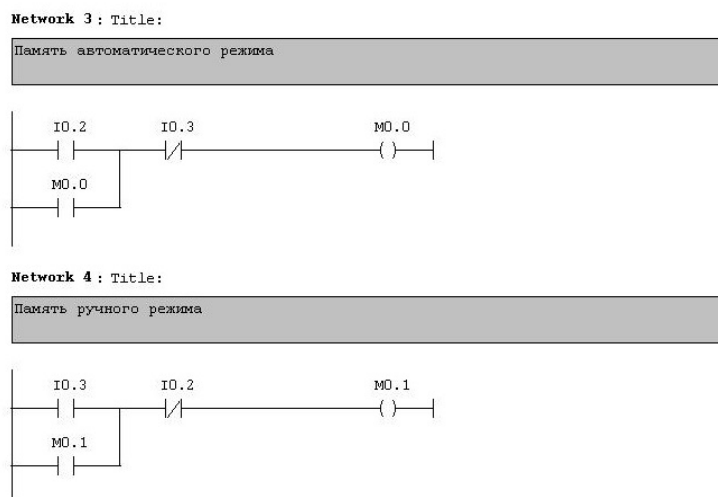
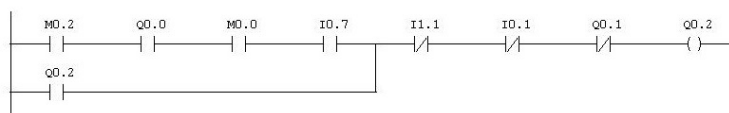


Рисунок 23 – Листинг программы

Network 5: Title:

Подающий рольганг



Network 6: Title:

Включение рольганга установленного на тележке

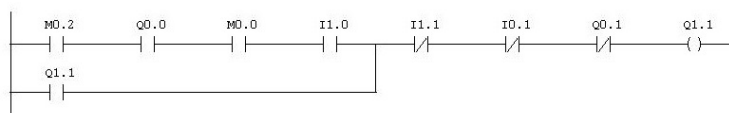
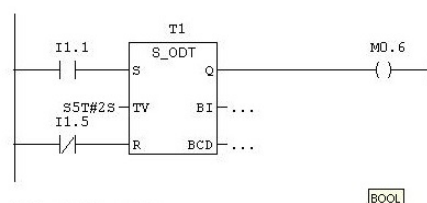


Рисунок 24 – Листинг программы

Network 7: Title:

Память установки



BOOL

Network 8: Title:

установка труб на тележку

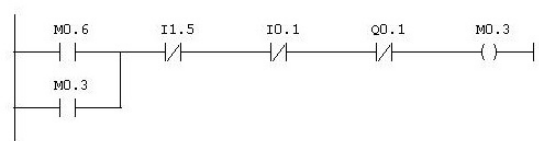
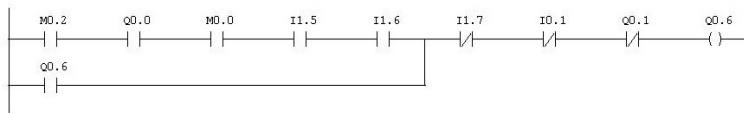


Рисунок 25 – Листинг программы

Network 9: Title:

Команда вперед для тележки



Network 10: Title:

Команда Вниз для подъемного механизма

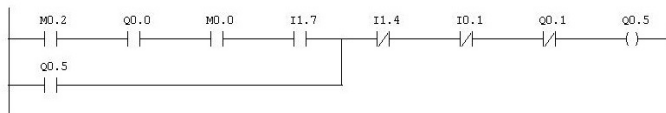


Рисунок 26 – Листинг программы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

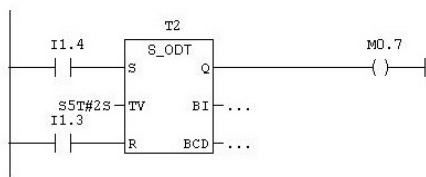
13.03.02.2018.584.01 ПЗ

Лист

74

Network 11 : Title:

Задержка включения основного рольганга



Network 12 : Title:

Память движения вниз

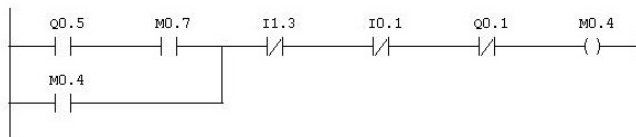


Рисунок 27 – Листинг программы

Network 13 : Title:

Включение рольганга повышенная скорость



Network 14 : Title:

Отводящий рольганг



Рисунок 28 – Листинг программы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

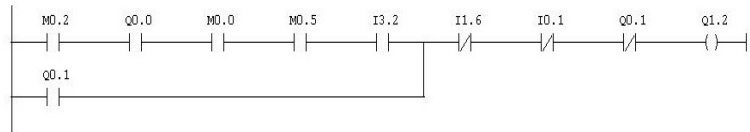
13.03.02.2018.584.01 ПЗ

Лист

75

Network 16: Title:

пониженная скорость тележки



Network 17: Title:

Память движения назад

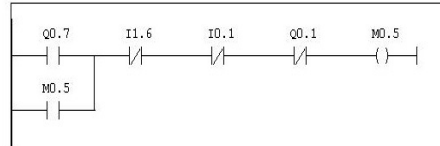
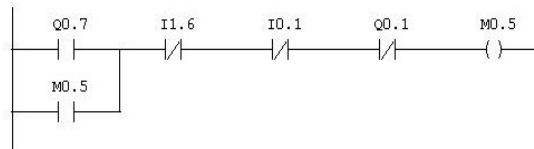


Рисунок 29 – Листинг программы

Network 17: Title:

Память движения назад



Network 18: Title:

Авария OUT: BOOL

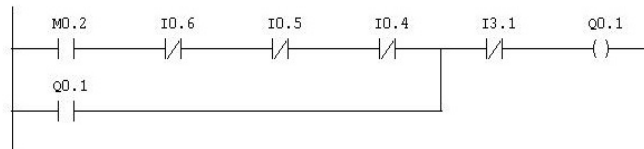


Рисунок 30 – Листинг программы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

13.03.02.2018.584.01 ПЗ

Лист

76

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе дипломного проектирования был спроектирован электропривод рольганга согласно требованиям, предъявляемым в техническом задании.

Выбранная система электропривода преобразователь частоты – асинхронный двигатель (ПЧ – АД).

По предварительно рассчитанной мощности был выбран асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором АИР 112 МВ6. Затем выбрали цилиндрический двухступенчатый редуктор РЦД-350. Все статические и динамические моменты были приведены к валу двигателя. Далее проведена предварительная проверка двигателя по нагреву.

Кроме того, был выбран преобразователь частоты Schneider Electric Altivar 71 NU40N4. Также был произведен расчет и выбор тормозного резистора и сетевого дросселя. По расчетам выбрали тормозной резистор VW3 A7 704, значение сопротивления $R=15$ Ом, а также сетевой дроссель ATV7140N4 VW3 A4 553 с номинальным током 16 А. Индуктивность $L=2$ мГн.

На основе номинальных данных электродвигателя были рассчитаны статические характеристики двигателя и системы ПЧ – АД. Были рассчитаны параметры системы, обеспечивающие работу привода в заданных точках.

Также были построены динамические характеристики электропривода.

На каждом участке работы привода рассчитаны необходимые параметры: заданные скорость и момент, требуемое время переходного процесса. Исследованы переходные процессы пуска и торможения.

Проверено выполнение приводом требований технологии по производительности и перегрузочной способности. Выполнена проверка выбранного электродвигателя по нагреву методом эквивалентного тока.

Сравнили допустимый ток двигателя с током эквивалентным, при чем допустимый ток должен быть больше эквивалентного. $I_э < I_{доп}$ ($8,6$ А $<$ $10,5$ А), выбранный двигатель проходит по условиям нагрева. Также по нагреву

									Лист
									77
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ				

проверили преобразователь частоты. Проверка по нагреву преобразователя выполняется сравнением среднеквадратичного тока двигателя за время работы с номинальным выходным током преобразователя, который должен быть больше, либо равен ему. Поскольку среднеквадратичный ток двигателя меньше номинального тока преобразователя $I_{сркв} < I_{нмп}$ (8,8 А < 11,5 А), преобразователь частоты проходит по условию нагрева.

После расчета основных параметров и выбора оборудования, была произведена автоматизация участка листоправильного станка Fassin R9 3000. В ходе работы была разработана структурная схема участка.

Были сформулированы основные требования, предъявляемые к системе автоматизации. Разработана панель оператора. В среде *Step 7* было разработано программное обеспечение системы автоматизации.

Также производился выбор элементной базы автоматизации и преобразователей технологической информации. Были выбраны индуктивные датчики ВБИ-Ф80-40К-2183-С.9.18. Для обеспечения питания датчиков и модулей ввода/вывода выбран блок питания PS 1207 2,5А. В качестве программируемого контроллера выбрали Siemens SIMATIC S7 – 1200. Контроллерный блок включает в себя: процессорный модуль CPU1215, модуль ввода SM1221-DI16 x DC24V (6ES7 221-1BH30-0XB0), на 16 каналов ввода сигналов постоянного тока напряжением 24 В, модуль вывода SM1223-DI8,DQ8 x DC24V/0,5А (6ES7 223-1PH30-0XB0), на 8 релейных выходов и 8 входов, .

На основе проведенного расчета можно сделать вывод, что спроектированный электропривод рольганга и система автоматизации выполняют все необходимые требования, предъявляемые в техническом задании.

										Лист
										78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1 Анфимов, М.И. Редукторы: конструкция и расчет: альбом / М.И. Анфимов.– М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.

2 Борисов, А.М. Автоматизация технологических процессов (технические средства, проектирование, лабораторный практикум): Учебное пособие./А. М. Борисов, Н. Е. Лях. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2001. – Ч.1. – 404 с.

3 Вешеневский, С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе / С.Н. Вешеневский. – М.: Энергия, 1977. – 432 с.

4 Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.

5 Драчев, Г.И. Теория электропривода: Учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию / Г.И. Драчев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2012. – 168 с.

6 Драчев, Г.И. Теория электропривода: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию / Г.И. Драчев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 196 с.

7 Драчев, Г.И. Теория электропривода: учебное пособие в 2 ч. / Г.И. Драчев. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – Ч.1. – 207 с; Ч.2. – 203 с.

8 Дудкин, М.М. Элементы информационной электроники систем управления вентильными преобразователями: монография / М.М. Дудкин, Л.И. Цытович. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 362 с.

9 Стандарт предприятия: курсовые и дипломные проекты. Общие требования к содержанию и оформлению. СТО ЮУрГУ 04 – 2008. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2008. – 56 с.

										Лист
										79
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2018.584.01 ПЗ					