

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Институт открытого и дистанционного образования
Кафедра «Техника, технологии и строительство»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой,
к.т.н., доцент
_____ К.М. Виноградов
_____ 2021 г.

Электропривод мостового крана грузоподъемностью 80 т

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–13.03.02.2021.117 ПЗ ВКР

Руководитель работы,
к.т.н., доцент
_____ К.М. Виноградов
_____ 2021г.

Автор работы
студент группы ДО – 481
_____ А.А. Сидельников
_____ 2021г.

Нормоконтролер,
Преподаватель
_____ О.С. Микерина
_____ 2021г.

Челябинск,
2021

АННОТАЦИЯ

Сидельников А.А., Электропривод мостового крана грузоподъемностью 80 т. – Челябинск: ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)», ИОДО; 2021, 50 с., 11 ил., библиографический список – 7 наименований, 9 листов чертежей ф. А1.

Целью выпускной квалификационной работы является модернизация электропривода механизма главного подъема мостового крана грузоподъемностью 80 тонн.

Выпускная квалификационная работа состоит из 71 страниц, 16 иллюстраций, 8 таблиц и 7 использованных источников. Также к работе прилагается презентация в электронном виде.

Ключевые слова: преобразователь частоты, асинхронный электродвигатель, мостовой электрический кран, векторное регулирование.

В выпускной квалификационной работе приводится описание технологического процесса, требования к электроприводу, выбор двигателя и основного силового оборудования, защита электропривода, разработка и расчет системы автоматического управления электроприводом, расчет динамических процессов.

					13.03.02.2021.117 ПЗ			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Сидельников А.А.			Электропривод мостового крана грузоподъемностью 80 т	<i>Лист</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Виноградов КМ.				Д	2	50
<i>Реценз.</i>						ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)» ИОДО		
<i>Н. Контр.</i>		Микерина О.С.				Кафедра «ГТС» гр.ДО-481		
<i>Утвердил.</i>		Виноградов К.М.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА	7
1.1 Описание механизмов, рабочих органов, кинематическая схема	7
1.2 Исходные данные для проектирования	10
2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ	12
2.1 Расчет нагрузочных диаграмм скорости и моментов рабочего органа	12
2.2 Предварительный расчёт мощности электродвигателя	12
2.3 Предварительный выбор электродвигателя и редуктора	12
2.4 Приведение статических моментов и моментов инерции	14
2.5 Предварительная проверка двигателя по нагреву и производительности	15
3 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ ЦЕПИ	17
3.1 Выбор преобразователя	17
3.2 Выбор коммутационных аппаратов	20
3.3 Шкаф управления электроприводом	21
4 РАСЧЁТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА	23
5 РАСЧЁТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	29
6 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	35
6.1 Проверка двигателя и преобразователя по нагреву	35
6.2 Проверка на перегрузочную способность	36
7 АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	37
7.1 Выбор ПЛК	37
7.2 Логические уравнения	38
7.3 Программирование ПЛК	40
8 РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	42
9 РАЗРАБОТКА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ	

						13.03.02.2021.117 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			3

ЭЛЕКТРОПРИВОДА	45
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48

									Лист
									4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.117 ПЗ				

ВВЕДЕНИЕ

Модернизация мостовых кранов – это один из необходимых процессов, которые рано или поздно необходимо проводить с любым мостовым краном, исходя из конкретной степени физического и морального износа.

Модернизация мостового крана предусматривает выполнение работ, направленных на восстановление и улучшение характеристик оборудования, путем модификации основных и вспомогательных узлов. В результате удастся повысить производительность, функциональность, продлить срок службы, адаптировать технику к новым условиям эксплуатации.

Своевременно проведенная модернизация электрооборудования мостового крана позволит предотвратить аварийные остановки и незапланированные простои, снизить затраты на техническое обслуживание. Все эти факторы обуславливают актуальность выбранной темы.

Актуальность темы. В настоящее время наметилась устойчивая тенденция к применению частотного регулирования скорости асинхронных двигателей во многих отраслях промышленности, как в России, так и за рубежом. Это обстоятельство объясняется следующим. Использование частотного регулирования асинхронного двигателя дает ряд преимуществ: широкий диапазон регулирования скорости, жесткие механические характеристики, малые потери энергии, плавные переходные процессы. В свою очередь, применение преобразователя частоты с возможностью рекуперации энергии в питающую сеть позволяет снизить потребление электрической энергии по сравнению с традиционными способами регулирования скорости асинхронного электродвигателя с фазным ротором. Плавное регулирование скорости крановых механизмов позволяет значительно снизить динамические нагрузки в элементах кинематической цепи привода, что позволяет повысить надежность и долговечность работы механического оборудования крана, увеличивается ресурс редуктора, канатоведущего барабана, тормозных колодок, электродвигателя и других элементов.

Применение частотного преобразователя позволяет использовать асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором общего назначения, а не специализированные асинхронные двигатели с фазным ротором. Маховый момент ротора таких двигателей в разы меньше аналогичных крановых асинхронных двигателей с фазным ротором, а стоимость их снижается в 3-4 раза по сравнению с крановыми двигателями, специальной серии.

Целью выпускной квалификационной работы является модернизация электропривода механизма главного подъема мостового крана грузоподъемностью 80 тонн.

Задачи работы:

- описать технологический процесс электропривода главного подъема мостового крана;

										13.03.02.2021.117 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							5

1. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

1.1 Описание механизмов, рабочих органов, кинематическая схема

Мостовой электрический подъемный кран служит для подъема груза и перемещения в горизонтальном направлении на сравнительно небольшие расстояния - в пределах цеха.

Мостовой кран является наиболее распространенным типом кранов, применяемых для внутрицехового и внутри складского транспорта во всех отраслях промышленности. Мостовой кран перемещается вдоль цеха или рабочей площадки по подкрановым путям.

Конструкция крана [1] состоит из моста по рельсам которого перемещается грузовая тележка 2. Управление краном производится из кабины крановщика 3, расположенной под рабочей площадкой моста. Для обслуживания питающих крановых троллей и токоприемников предусмотрена кабина для обслуживания троллей 4. Электрооборудование 5, расположенное на мосту, тележки и в кабине крановщика, предназначено для управления механизмами крана. Токоподвод к грузовой тележке осуществляется гибким кабелем 6, подвешенным к кареткам, перемещающимся по монорельсу.

Мост крана состоит из двух полумостов, вес каждого из которых равно-мерно, передается на четыре ходовых колеса. Полумосты шарнирно соединены между собой переходными балками. Привод передвижения моста - отдельный. Мост оборудован переходными площадками, лестницами, буферами.

Мост крана состоит из двух пролетных балок коробчатого сечения, каждая из которых опирается на две концевые балки коробчатого сечения, шарнирно соединённых между собой соединительной балкой, образующих жесткую раму.

На концевых балках моста крана закреплены восемь двухребордных ходовых колес, из которых четыре - приводные. Для выхода на площадку моста из кабины предусмотрен люк.

На пролетных балках при помощи прижимных планок закрепляются под-тележечные рельсы.

Площадки пролетных балок оборудованы перилами и предназначены для безопасного и удобного обслуживания кабельного токоподвода грузовой тележки, а также электрооборудования и механизмов, расположенных вне кабины и тележки. Для обслуживания главных троллей у торца моста подвешена кабина.

Концевые балки моста при монтаже крана оборудуются перилами, а площадки перилами и ограждениями. Переход между площадками пролетных балок, осуществляется по концевым балкам с использованием лестниц. На рисунке 1 изображен общий вид мостового крана.

										Лист
										7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

Рисунок 1.1 – Общий вид крана

Ограничение перемещения тележки крана осуществляется буферными устройствами, расположенными на пролетных балках моста, а крана - буферами, закрепленными на концевых балках.

Скребки, установленные перед колесами моста, предотвращают возможность попадания под колеса посторонних предметов.

Механизм передвижения крана с приводными колесами выполнен с четырьмя отдельными приводами, состоящими из электродвигателя, тормоза, быстроходного вала с шарнирами муфт, редуктора, тихоходного вала с шарнирами муфт, соединённого с валом приводного колеса.

Грузовая тележка служит для подъема и перемещения груза вдоль моста крана. Грузовая тележка состоит из: стальной рамы 1, на которую монтируются ведущие и поддерживающие колеса, двух двигателей подъема с канатными барабанами и редукторами, кабельного барабана для питания грузового магнита, гидравлические толкатели для механизма подъема и передвижения телеги. Рама тележки сварная, балочной конструкции, разъёмная для обеспечения возможности её транспортировки железнодорожным транспортом. Соединение частей рамы выполнено с помощью накладок и чистых болтов без применения сварки. На рисунке 1.2 изображен общий вид грузовой тележки мостового крана.

										Лист
										8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

Рисунок 1.2 – Общий вид грузовой тележки

Механизм главного подъема состоит из электродвигателя, двух шарниров муфт с промежуточным валом, редуктора, двух колодочных тормозов, барабана, полиспаста, подвески грузоподъемностью 80т.

Полиспаст механизма главного подъема — четырехкратный сдвоенный.

Барабаны механизма подъемов получают вращение через зубчатую ступицу с редуктора. Опорами барабанов с одной стороны являются подшипники в выходном зубчатом вале редуктора, а с другой стороны подшипники в опоре барабана.

Барабан механизма главного подъема состоит из сварной обечайки, на поверхности которой нарезаны винтовые канавки, обеспечивающие направление и однослойность навивки грузового каната. С помощью шпилек с пружинными шайбами и гайками, на поверхности барабана накладками, закрепляются концы каната. Задняя опора барабана состоит из корпуса, который может поворачиваться относительно шарнира и вторым концом опирается на тензометрический датчик, который является одним из элементов ограничителя грузоподъемности. Вращение на вилку концевого выключателя передается с вала ступицы через стакан, закрепленного к валу болтами и сухарь.

Механизм вспомогательного подъема состоит из электродвигателя, вала с зубчатыми муфтами, редуктора, колодочного тормоза, барабана, сдвоенного полиспаста, подвески грузоподъемностью 20 т.

Полиспаст механизма вспомогательного подъема - двукратный сдвоенный.

Барабан вспомогательного механизма подъема состоит из обечайки, на

										Лист
										9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

поверхности которого нарезаны винтовые канавки, обеспечивающие направление и однослойность навивки грузового каната. На поверхности барабана накладками закрепляются концы каната. Задняя опора барабана состоит из корпуса, который может поворачиваться относительно шарнира и вторым концом опирается на тензометрический датчик, который является одним из элементов ограничителя грузоподъемности ОНК-160М. Вращение на вилку концевого выключателя передается с вала ступицы через стакан, закрепленного к валу болтами и сухарь.

Тележка опирается на четыре двухребордных колеса, два из которых приводные.

Механизм передвижения тележки состоит из электродвигателя, колодочного тормоза, быстроходного вала с зубчатыми муфтами, вертикального редуктора, двух промежуточных валов с зубчатыми муфтами (шарнирами муфт) и двух приводных колёс. Приводные колеса тележки состоят из колеса, насаженного на вал с применением шпонок. Вал колеса вращается на подшипниках качения, установленных в угловых буксах.

Кабина управления закрытого типа остеклена, имеет тепло и шумоизоляцию, оснащена кондиционером, электрообогревателем и пультом управления.

Пульт управления предназначен для управления всеми механизмами крана. Пульт управления поворотный оборудован креслом крановщика имеющего регулировку положения по высоте и вдоль продольной оси кабины.

В конструкции крана предусмотрены:

- 1 свободный доступ для обслуживания механизмов и электрооборудования;
- 2 безопасность обслуживания, ремонта, монтажа механизмов и их сборочных единиц;
- 3 места для строповки сборочных единиц крана при монтаже и ремонте;
- 4 система лестниц и площадок, необходимых для технического обслуживания и ремонта механизмов и электрооборудования.

Кинематическая схема механизма главного подъема крана представлена на рисунке 1.3.

										Лист
										10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

Рисунок 1.3 – Кинематическая схема механизма подъема

1.2 Исходные данные для проектирования

Таблица 1.1 – Исходные данные для проектирования

Наименование	Обозначение	Величина
Масса груза, т	$G_{Г}$	80
Масса крюка, т	$G_{ГО}$	2
Суммарный момент инерции механизма, кг м ²	J_m	2,2
Передаточное отношение редуктора	i	77
КПД редуктора	η_p	0,95

Окончание таблицы 1.1

Наименование	Обозначение	Величина
КПД полиспаста	$\eta_{\text{п}}$	0,97
Скорость подъема заданная, м/с	V	0,115
Ускорение м/с ²	a	0,04
Диаметр барабана, м	$D_{\text{б}}$	0,910
Кратность полиспаста	m	4
Номинальная скорость двигателя заданная, об/мин	$n_{\text{з}}$	750
Количество двигателей	y	1
Высота подъема, м	h	26,00
Диапазон регулирования скорости		1:4
Пауза для присоединения к грузу, с	$t_{\text{п.с}}$	40
Пауза для перемещения груза, с	$t_{\text{п.п}}$	98
Пауза для отсоединения груза, с	$t_{\text{п.о}}$	40
Пауза между циклами, с	$t_{\text{п.ц}}$	180
Ускорение свободного падения, м/с ²	g	9,81

2 РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

2.1 Расчет нагрузочных диаграмм скорости и моментов рабочего органа

Рассчитаем мощность и произведем предварительный выбор электродвигателя [2]. Для этого необходимо предварительно рассчитать следующие параметры.

Найдем суммарный КПД механизма

$$\eta_{\text{сум.мех}} = \left(2 - \frac{1}{\eta_p \cdot \eta_n} \right) = \left(2 - \frac{1}{0,95 \cdot 0,97} \right) = 0,915 \quad (1)$$

где η_p – кпд редуктора;

η_n – кпд полиспаста.

Приведенный к валу двигателя статический момент при подъеме груза

$$M_{\text{ст.под}} = \frac{(G_T + G_{TO}) \cdot D_{\delta} \cdot g}{i_p \cdot 2 \cdot y \cdot m \cdot \eta_c} = \frac{(80000 + 2000) \cdot 0,910 \cdot 9,81}{77 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,915} = 1298 \text{ (Нм)} \quad (2)$$

где G_{TO} – масса грузозахватного органа, кг;

D_{δ} – диаметр барабана, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²

i_p – передаточное отношение редуктора;

y – количество двигателей;

m – кратность полиспаста;

η_c – суммарный кпд механизмов.

Определяем максимальный статический момент при подъеме с номинальным грузом и с коэффициентом запаса равным 1,2.

$$M_{\text{ст.р.}} = M_{\text{ст.под}} \cdot 1,2 = 1298 \cdot 1,2 = 1557 \text{ (Нм)}$$

2.2 Предварительный расчет мощности электродвигателя

Расчетная мощность электродвигателя

$$P_{\text{рас}} = \frac{M_{\text{ст.р.}} \cdot n_{\text{зад}}}{9550} = \frac{1557 \cdot 750}{9550} = 122 \text{ (кВт)} \quad (3)$$

2.3 Предварительный выбор электродвигателя и редуктора

Выбираем электродвигатель из условия:

$$P_{н.дв} \geq P_{рас}$$

Выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором фирмы VEM K21F315L8 [3]. Характеристики двигателя представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики электродвигателя K21F315L8

Наименование	Обозначение	Величина
Мощность номинальная, кВт	P_n	132
Скорость вращ. номин., об/мин	n	740
Момент инерции ротора, кг*м	J_d	6,8
Ток номинальный А	I_n	242
Ток пусковой (6,3) А	$I_{п}$	1524
КПД, %	η	95
Сos φ	cos φ	0,83
Момент номинальный, Н*м	M_n	1704
Момент пусковой, Н*м ($2 \cdot M_n$)	$M_{пуск}$	3408
Момент критический, Н*м ($2,1 \cdot M_n$)	M_k	3578
Диапазон рабочих температур	t	-20....+40

Находим угловую скорость барабана, приведенную к валу двигателя и угловую скорость ротора двигателя. После чего сравним полученные скоростные показатели.

Скорость барабана, приведенная к валу двигателя

$$\omega_{б.пр.} = \frac{V \cdot i_p \cdot i_n \cdot 2}{D_b} = \frac{0,115 \cdot 77 \cdot 4 \cdot 2}{0,91} = 77,8 \text{ (рад / с)} \quad (5)$$

Скорость выбранного двигателя

$$\omega_{\text{дв.}} = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 740}{30} = 77,5 \text{ (рад / с)} \quad (6)$$

$$\omega_{\text{дв.}} \approx \omega_{\text{б.лр}}$$

Предварительно выбранный двигатель подходит по мощности и по скоростным показателям требованиям механизма подъема.

Определение передаточного числа редуктора и выбор редуктора

Передаточное число редуктора определим по известной номинальной скорости вращения выбранного электродвигателя и по основной скорости рабочего органа:

$$j_p = \frac{\omega_n 15 \cdot D}{2 \cdot v_0} \quad (7)$$

где ω_n - номинальная скорость вращения двигателя, $\frac{1}{с}$;

D – Диаметр колеса, преобразующего вращательное движение вала в поступательное, м;

v_0 - основная скорость рабочего органа, $\frac{м}{с}$.

В соответствии с формулой (5.1) имеем:

$$j_p = \frac{89.012 \cdot 9.65 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.1} = 4.295 \quad (8)$$

где D_p - диаметр колеса, находящегося на выходном валу редуктора и преобразующего вращение вала в поступательное движение исполнительного органа рабочей машины.

Редуктор выбирают по справочнику, исходя из требуемого передаточного числа, номинальной мощности и скорости выбранного двигателя с учетом характера нагрузки (режима работы) машины, для которой проектируется электропривод.

$$U_p = \frac{2\pi D n_{\text{дв}}}{60 V_n K_n} = \frac{2 \times 3.14 \times 0.910 \times 750}{60 \times 0.115 \times 4} = 76611.45 \text{ рад} \approx 77 \quad (9)$$

Выбранный редуктор должен иметь по возможности передаточное число, равное или близкое по значению. Выбираем редуктор типа 1ЦЗУ-250, с передаточным числом равным 80 КПД данного редуктора составляет 0.96%.

2.4 Приведение статических моментов и моментов инерции

						13.03.02.2021.117 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			15

Приведенный к валу двигателя статический момент при подъеме груза

$$M_{ст.под} = \frac{(G_{Г} + G_{ГО}) \cdot D_{б} \cdot g}{i_p \cdot 2 \cdot y \cdot m \cdot \eta_c} = \frac{(80000 + 2000) \cdot 0,910 \cdot 9,81}{77 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,915} = 1298 \text{ (Нм)} \quad (10)$$

где $G_{ГО}$ – масса грузозахватного органа, кг;

$D_{б}$ – диаметр барабана, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²

i_p – передаточное отношение редуктора;

y – количество двигателей;

$M_{п}$ – кратность полиспаста;

η_c – суммарный КПД механизмов.

Определяем максимальный статический момент при подъеме с номинальным грузом и с коэффициентом запаса равным 1,2

$$M_{ст.р.} = M_{ст.под} \cdot 1,2 = 1298 \cdot 1,2 = 1557 \text{ (Нм)} \quad (11)$$

Момент статический при спуске груза номинальной массы, приведенный к валу двигателя

$$M_{ст.сп.} = M_{ст.под} \cdot \eta_{сум.мех} = 1298 \cdot 0,915 = 1187,67 \text{ (Нм)} \quad (12)$$

Найдем суммарный момент инерции механизма:

$$J_{\Sigma} = J_{дв} + J_{мех} = 6,8 + 2,2 = 9 \text{ (кг} \cdot \text{м}^2\text{)} \quad (13)$$

2.5 Предварительная проверка двигателя по условиям нагрева и производительности

Проверку двигателя выполняем методом эквивалентного момента [2].

Эквивалентный момент при естественном воздушном охлаждении двигателя

$$M_{экв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \times t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \times t_i}} \text{ Нм} \quad (14)$$

где β -коэффициент ухудшения теплоотдачи.

Двигатель имеет принудительную вентиляцию, поэтому $\beta=1$.

Тогда:

										Лист
										16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

$$M_{\text{ЭКВ}}^* = \sqrt{\frac{M_{1P}^2 t + M_{2УСТ}^2 t + M_{3T}^2 t + M_{4P}^2 t + M_{5УСТ}^2 t + M_{6T}^2 t + M_{7P}^2 t + M_{8УСТ}^2 t + M_{9T}^2 t + M_{10P}^2 t + M_{11УСТ}^2 t + M_{12T}^2 t}{4 \cdot (t_p + t_T + t_{УСТ}) + t_{II}}}, \text{Нм} \quad (15)$$

$$M_{\text{ЭКВ}}^* = \sqrt{\frac{(-318,5^2 \cdot 2,875) + (26,5^2 \cdot 2,875) + (265,5^2 \cdot 2,875) + (1596^2 \cdot 2,875) + (1298^2 \cdot 223) + (1006^2 \cdot 2,875) + (895^2 \cdot 2,875) + (1187^2 \cdot 223) + (1479^2 \cdot 2,875) + (323^2 \cdot 2,875) + (31,7^2 \cdot 223) + (-260^2 \cdot 2,875)}{4 \cdot (2,875 + 2,875 + 2,875) + 1100}} = 278$$

Так как двигатель предназначен для работы в режиме S1, а фактическая продолжительность включения равна:

$$ПВ_{\phi} = \frac{t_{\text{раб.ц}}}{t_{II} + (t_p \cdot 4)} \cdot 100\% = \frac{912}{1100 + (228 \cdot 4)} \cdot 100\% = 45\% \quad (16)$$

То произведем соответствующий пересчет эквивалентного момента, определив для данного двигателя:

$$M_{\text{ЭКВ1}} = M_{\text{ЭКВ}}^* \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{\phi}}{ПВ_0}} = 278 \cdot \sqrt{\frac{45}{100}} = 186 \quad (17)$$

Условие проверки двигателя по нагреву:

$$M_{\text{ЭКВ1}} < M_{\text{н.дв}}$$

$$M_{\text{н.дв}} = 1704 \text{ (Нм)}$$

Следовательно,

$$186 < 1704$$

Двигатель удовлетворяет условиям проверки по нагреву.

Условие проверки по перегрузке:

Максимальный момент двигателя

$$M_{\text{макс(нд)}} < M_{\text{макс.дв}}$$

$$M_{\text{макс(нд)}} = 1557 \text{ (Нм)}$$

$$M_{\text{макс.дв}} = 3578 \text{ (Нм)}$$

Следовательно

$$1557 < 3578$$

									Лист
									17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2021.117 ПЗ

Условие выполняется, двигатель K21F315L8 проверку по перегрузке проходит.

3 ВЫБОР ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОЙ ЦЕПИ

3.1 Выбор преобразователя

Критерии выбора силовой части преобразователя частоты:

- 1) номинально длительно – допустимый ток, зависящий от температуры окружающей среды и максимально – допустимой температурой вентиляей;
- 2) максимально – допустимый ток, учитывающий условия термической стабильности транзисторов;
- 3) ограничение величины тока коммутации, так как чрезмерные токи короткой длительности могут вызвать разрушение полупроводниковых элементов.

С учётом всего этого, автономные инверторы и преобразователи частоты характеризуются тремя значениями мощности в кВа:

- 1) номинальная мощность $S_{нп}$, то есть максимальная мощность в длительном режиме на выходе ПЧ (инвертора);
- 2) кратковременная мощность (малой длительности) $S_{кп}$, которая может быть достигнута на выходе ПЧ при номинальном токе и максимально – допустимой температуре окружающей среды;
- 3) коммутационная мощность $S_{кт}$, представляющая собой максимальную мгновенную мощность, позволяющую обеспечить перегрузочную способность при коммутации.

В большинстве случаев $S_{кт}=1,6 S_{н}$, при времени перегрузки 30 секунд и общей доле перегрузки в технологическом процессе не более 20%. Если коммутационная мощность специально не оговаривается, то считают, что она равна кратковременной мощности ПЧ ($S_{кп}=S_{кт}$). Эта мощность намного меньше аналогичной мощности электрических машин. При прямом пуске с номинальным напряжением и частотой сети пусковые токи асинхронных двигателей превышают номинальный ток двигателя в 4-7 раз. В этом случае номинальный ток инвертора должен иметь такой же порядок, что приводит к завышению мощности инвертора, а значит и ПЧ. Приемлемые номинальные данные ПЧ могут быть получены либо при ограничении пускового тока двигателя, либо при пуске посредством изменения частоты от нуля до номинальной. Но указанные мероприятия не применимы в данном электроприводе т.к. их применение приводит к уменьшению момента двигателя, а также к увеличению времени пуска двигателя.

В АИН с амплитудной модуляцией выходное напряжение инвертора имеет ступенчатую форму, поэтому при расчёте мощности ПЧ (АИН) необходимо учитывать также влияние высших гармоник, которые увеличивают действующее и максимальное значения токов инвертора (двигателя), зависящие от индуктивного сопротивления x_k обмоток двигателя:

									Лист
									18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2021.117 ПЗ

$$X_{K}^{*} = \frac{I_{ном.}}{I_{пуск.}} \cdot \sqrt{1 - (\cos\phi)^2} = \frac{242}{1524} \cdot \sqrt{1 - (0,83)^2} = 0,088 \text{ Ом.} \quad (17)$$

Действующее значение полного тока при номинальной нагрузке:

$$I^{*} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,046}{X_{K}^{*}}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,046}{0,088}\right)^2} = 1,13 \quad (18)$$

Определим номинальную длительно-допустимую мощность инвертора:

$$S_{н} = \sqrt{3} \cdot U_{ндв} \cdot I_{ндв} \cdot I^{*} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 242 \cdot 1,13 = 179,7 \text{ кВА} \quad (19)$$

где $U_{н}$ - номинальное напряжение двигателя, В;

$I_{н}$ - номинальный ток двигателя, А;

I^{*} - действующее значение полного тока при номинальной нагрузке, А.

Выберем преобразователи частоты, исходя из следующих данных:

$$S_{н.пч.} \geq K_3 \cdot S_{н} \geq 197 \text{ кВА}$$

$$U_{н.пч.} \geq U_{н.сети} \geq 380 \text{ В.}$$

$$I_{н.пч.} \geq I_{н.дв} \geq 242 \text{ А}$$

$K_3=1,1$ - коэффициент запаса

Определим активную мощность на выходе инвертора:

$$P_{н.и.} = S_{н} \cdot \cos\phi = 226,3 \cdot 0,66 = 149,3 \text{ кВт} \quad (20)$$

Выбираем модуль двигателя по вышеуказанным параметрам из каталога Siemens [4].

Краткие характеристики модуль двигателя:

- Выходной ток: 310А
- Номинальная мощность: 160 кВт
- Ток перегрузки (60 сек) $I_n \cdot 1,6$
- Ток DC: 372 А

Для процедуры параметрирования необходимо иметь понятие о нескольких базовых параметрах, позволяющих получить доступ к изменению параметров и конфигурации протоколов общения с компьютером. В начале процедуры настройки необходимо уделить внимание параметру P0003, который выполняет функцию разрешения изменения параметров и произведение процедуры самонастройки.

P0003 – ВОР степень доступа;

P0004 – ВОР фильтр индикации.

В таблице 3.1 представлены параметры настройки двигателя.

Таблица 3.1 – Настройка параметров двигателя

Параметр №	имя	значение
p0100	стандарт двигателя	0: двигатель ИЕС 50Гц
p0300	выбор тип двигателя	1: асинхронный двигатель
p0304	номинальное напряжение двигателя	400В
p0305	номинальный ток двигателя	242А
p0307	номинальная мощность	132кВт
p0308	номин. коэффициент мощности двигателя	0.8
p0309	номинальный КПД двигателя	95%
p0310	номинальная частота двигателя	50Гц
p0311	номинальная частота вращения двигателя	740об/мин
p0314	число пар полюсов двигателя	4
p0316	постоянная момента вращения двигателя	0
p0322	максимальное число оборотов двигателя	740об/мин
p0335	тип охлаждения двигателя	1:форсированное охлаждение
p0640	предельный ток	1525А
p0972	выбор телеграммы PROFIDrive	999 свободное проектирование телегр.с ВICO
p0970	сброс параметров привода	0: неактивен

p1080	минимальная скорость	0.0об/мин
p1082	максимальная скорость	740об/мин

Окончание таблицы 3.1

Параметр №	имя	значение
p1120	датчик разгона — время разгона	0.5сек
p1121	датчик разгона — время возврата	0.5сек
p1300	режим работы управления/регулирования	21: векторное управление с датчиком
p1500	выбор заданного значения момента вращения	
p1900	идентификация данных двигателя и измерение при вращении	1: индентификация данных двиг. в сост. покоя и при вращающ. двигателе

3.2 Выбор коммутационных аппаратов

К коммутационным аппаратам относится достаточно широкий спектр электрооборудования, с помощью которого осуществляется включение-отключение как основных токовых цепей, так и цепей управления.

Для коммутации основных токовых цепей наряду с рассмотренными выше автоматическими выключателями используются рубильники, переключатели, контакторы, магнитные пускатели и т.п.

Для коммутации цепей управления используются различные реле, как мгновенного действия, так и реле с выдержкой времени на замыкание и размыкание контактов, кнопки и ключи (переключатели) управления. К ним относятся:

- защиту от тока перегрузки;
- защиту от перенапряжений;
- защиту от понижения напряжения;
- защиту от замыканий на землю;
- контроль фаз питающей сети;
- контроль фаз выходной цепи;
- защиту двигателя от заклинивания;
- защиту привода от работы с недогрузкой;

- защиту двигателя от перегрузки;
- защита полупроводников от перегрева

Режимы защиты электродвигателя от перегрузки основываются на его тепловой модели, контролирующей изменение параметра произведение квадрата тока нагрузки на время ($I^2 \cdot t$), заложенного в программном обеспечении преобразователя частоты для стандартного электродвигателя и дополнительно на использовании термисторного датчика перегрева электродвигателя наружного или встроенного в обмотку статора. Тепловая защита электродвигателя, основанная только на тепловой модели, не обеспечивает 100% точность, потому что температура двигателя только рассчитывается, а не измеряется, а также не учитывается изменение температуры окружающей среды.

Полупроводники выпрямителя и инвертора защищаются от токов короткого замыкания быстродействующими плавкими вставками.

Рассчитаем номинала быстродействующих предохранителей [6].

Напряжение звена постоянного тока найдем по формуле

$$U_{дн} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{л} \cdot \pi}{2 \cdot \sqrt{3}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380 \cdot 3,14}{2 \cdot \sqrt{3}} = 488 \text{ (В)} \quad (21)$$

Найдем ток звена постоянного тока

$$I_{дн} = \frac{P_{дн}}{U_{дн}} = \frac{160000}{488} = 327 \text{ (А)} \quad (22)$$

Найдем номинальный ток предохранителей

$$I_{НОМ.В} = K_{зап} \cdot \frac{\lambda_{ПЧ} \cdot I_{дн}}{\sqrt{3} \cdot n} = 1,2 \cdot \frac{2 \cdot 327}{\sqrt{3} \cdot 1} = 370 \text{ (А)} \quad (23)$$

где $K_{зап}$ – коэффициент запаса по току, не менее 1,2;

$\lambda_{ПЧ}$ – перегрузочная способность ПЧ;

$I_{дн}$ – номинальное значение выпрямленного тока;

n – число параллельно включенных тиристоров.

Выбираем предохранители исходя из следующих условий

$$U_{П} \geq U_{сети} \geq 380 \text{ (В)}$$

$$I_{П} \geq I_{ПЧ} \geq 370 \text{ (А)}$$

Выбираем быстродействующие плавкие предохранители ножевого типа ЗНЕ1331-2 номинальный ток 400 А.

										Лист
										22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

3.3 Шкаф управления электроприводом

Исходя из выбранного частотного преобразователя, выбираем под его размер подходящий электрический шкаф. Проанализировав все варианты, остановимся на Rittal TS 8208.500.

Система линейных шкафов TS 8 из листовой стали благодаря симметричному профилю по ширине и глубине обеспечивает значительный выигрыш в пространстве, а также простой внутренний монтаж. При этом также гарантируется возможность соединения в линейку со всех сторон. Кроме того, встроенное автоматическое выравнивание потенциалов всех плоских деталей и трехступенчатая обработка поверхности обеспечивают оптимальную безопасность.

Рисунок 3.1 – Электрический шкаф

В электрическом шкафу присутствуют:

X3 – Клемма 4 контурная;

QF2 – Выключатель автоматический 1 полюсный;

QF3 – Выключатель автоматический 1 полюсный;

X4 – Клемма 3 контурная;

QF4 – Выключатель автоматический;

G1 – Блок питания Trio power 240V AC 24V DC, 20A;

KM – Линейный контактор LC1F800;

										Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

L1 – Сетевой дроссель $I_H=508A$, $P_{пот}=0,31$ кВт;
 L2 – Дроссель двигателя $I_H=380 A$, $P_{пот}=0,5$ кВт;
 A2 – Модуль датчика SMC 30;
 QS – Разъединительные предохранители 3NP, 690V AC , 400A;
 A1– Модуль управления CU320-2DP;
 U1– Модуль питания Smart $P_H=250$ кВт, $I_{вх}=463 A$;
 U2 – Модуль двигателя Модуль двигателя $P_H=160$ кВт, $I_H=310 A$.

4 РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Электроприводы крановых механизмов по характеру нагрузок можно разделить на две группы: с преимущественно активным статическим моментом и преимущественно с реактивным статическим моментом.

Найдем суммарный КПД механизма по формуле

$$\eta_{сум.мех} = \left(2 - \frac{1}{\eta_p \cdot \eta_n} \right) = \left(2 - \frac{1}{0,95 \cdot 0,97} \right) = 0,915 \quad (24)$$

Приведенный к валу двигателя статический при опускании крюка вычисляются по формуле

$$M_{1ст} = \frac{G_{ГО} \cdot D_B \cdot g \cdot \eta_c}{i_p \cdot 2 \cdot y \cdot m_n} = \frac{2000 \cdot 0,91 \cdot 9,81 \cdot 0,915}{77 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4} = 26,5 \text{ (Нм)} \quad (25)$$

где $G_{ГО}$ – масса грузозахватного органа, кг;

D_B – диаметр барабана, м;

g – ускорение свободного падения, м/с²

i_p – передаточное отношение редуктора;

y – количество двигателей;

m_n – кратность полиспаста;

η_c – суммарный КПД механизмов.

Время разгона двигателя до номинальной скорости

$$t = t_p = \frac{V_n}{a} = \frac{0,115}{0,04} = 2,875 \text{ (с)} \quad (26)$$

где V_n – максимальная скорость подъема, м/с;

a – допустимое ускорение, м/с².

Путь пройденный при разгоне

$$S_p = S_1 = \frac{V_n}{2} \cdot t_{p(1)} = \frac{0,115}{2} \cdot 2,875 = 0,165 \text{ (м)} \quad (27)$$

Угловое ускорение двигателя

$$\varepsilon_1 = \frac{2\pi \cdot n_n \cdot a}{V_n \cdot 60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 740 \cdot 0,04}{0,115 \cdot 60} = 27 \text{ (рад/ с}^2\text{)} \quad (28)$$

где n_n – максимальная скорость подъема, об/м;

Динамический момент при ускорении

$$M_{дин} = J_{\Sigma} \cdot \varepsilon_1 = 10,8 \cdot 27 = 292 \text{ (Нм)} \quad (29)$$

Суммарный момент на участке разгона при спуске крюка без груза:

$$M_p = M_1 = -M_{дин} - M_{1cm} = -292 - 26,5 = -318,5 \text{ (Нм)} \quad (30)$$

Путь пройденный на участке с установившейся скоростью

$$S_{ycm} = S_2 = S - (S_1 + S_3) = 26 - (0,165 + 0,165) = 25,67 \text{ (м)} \quad (31)$$

где $S_1 = 26$ – максимальная высота подъема , м;

S_1 – путь пройденный при разгоне , м;

S_2 – путь пройденный при остановке , м;

Время работы на участке с установившейся скорости:

$$t_{ycm} = t_2 = \frac{S_{ycm}}{V} = \frac{25,67}{0,115} = 223 \text{ (с)} \quad (32)$$

На участке с установившейся скоростью момент статический равен:

$$M_2 = M_{1cm} = 26,5 \text{ (Нм)} \quad (33)$$

Время торможения до полной остановки в секундах:

									Лист
									25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2021.117 ПЗ

$$t_T = t_3 = \frac{V_n}{a} = \frac{0,115}{0,04} = 2,875 \text{ (с)} \quad (34)$$

Путь пройденный до полной остановки механизма:

$$S_T = S_3 = \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{V_n}{2} \cdot t = \frac{0,115}{2} \cdot 2,875 = 0,165 \text{ (м)} \quad (35)$$

Момент на участке торможения:

$$M_T = M_3 = M_{дин} - M_{1ст} = 292 - 26,5 = 265,5 \text{ (Нм)} \quad (36)$$

Рассмотрим участок, на котором происходит подъем крюка с номинальной массой груза.

Приведенный к валу двигателя статический момент при подъеме груза номинальной массы в соответствии с формулой (2) будет равен

$$M_{ст.под} = 1298 \text{ (Нм)}$$

Время разгона двигателя до номинальной скорости:

$$t_4 = t_p = 2,875 \text{ (с)}$$

Путь пройденный при разгоне:

$$S_4 = S_p = 0,165 \text{ (м)}$$

Суммарный момент на участке разгона при подъеме крюка с номинальной массой груза

$$M_4 = M_{ст.под} + M_{дин} = 1298 + 292 = 1596 \text{ (Нм)} \quad (37)$$

Путь пройденный на участке с установившейся скоростью

$$S_5 = S_{уст} = 25,67 \text{ (м)}$$

Время работы на участке с установившейся скорости:

$$t_5 = t_{ycm} = 223 \text{ (с)}$$

На участке с установившейся скоростью момент статический равен:

$$M_5 = M_{ст.под} = 1298 \text{ (Нм)}$$

Время торможения до полной остановки

$$t_6 = t_T = \frac{V_n}{a} = \frac{0,115}{0,04} = 2,875 \text{ (с)} \quad (38)$$

Путь проходимый до полной остановки:

$$S_6 = S_T = 0,165 \text{ (м)}$$

Момент на участке торможения:

$$M_6 = M_T = M_{ст.под} - M_{дин} = 1298 - 292 = 1006 \text{ (Нм)} \quad (39)$$

Рассмотрим участок, на котором происходит спуск крюка с номинальной массой груза.

Момент статический при спуске груза номинальной массы, приведенный к валу двигателя

$$M_{ст.сп.} = M_{ст.под} \cdot \eta_{сум.мех} = 1298 \cdot 0,915 = 1187,67 \text{ (Нм)} \quad (40)$$

Время разгона двигателя до номинальной скорости:

$$t_7 = t_p = 2,875 \text{ (с)}$$

Путь пройденный при разгоне:

$$S_7 = S_p = 0,165 \text{ (м)}$$

Суммарный момент на участке разгона при спуске крюка с номинальной массой груза:

										Лист
										27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

$$M_7 = M_{cm.cn} - M_{дин} = 1187,67 - 292 = 895,67 \text{ (Нм)} \quad (41)$$

Путь пройденный на участке с установившейся скоростью

$$S_8 = S_{ycm} = 25,67 \text{ (м)}$$

Время работы на участке с установившейся скорости

$$t_8 = t_{ycm} = 223 \text{ (с)}$$

На участке с установившейся скоростью момент статический равен:

$$M_8 = M_{cm.cn} = 1187,67 \text{ (Нм)}$$

Время торможения до полной остановки

$$t_9 = t_T = \frac{V_n}{a} = \frac{0,115}{0,04} = 2,875 \text{ (с)} \quad (42)$$

Путь пройденный до полной остановки

$$S_9 = S_T = 0,165 \text{ (м)}$$

Момент на участке торможения

$$M_9 = M_{cm.cn} + M_{дин} = 1187,67 + 292 = 1479,67 \text{ (Нм)} \quad (43)$$

Рассмотрим участок, на котором происходит подъем крюка без груза.

Статический момент при подъеме крюка без груза

$$M_{2cm} = \frac{G_{ГО} \cdot D_B \cdot g}{i_p \cdot 2 \cdot y \cdot m_{II} \cdot \eta_c} = \frac{2000 \cdot 0,91 \cdot 9,81}{77 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 4 \cdot 0,915} = 31,7 \text{ (Нм)} \quad (44)$$

где $G_{ГО}$ – масса грузозахватного органа, кг;

D_B – диаметр барабана, м;

g – ускорение свободного падения, m/c^2

i_p – передаточное отношение редуктора;

y – количество двигателей;

m_{II} – кратность полиспаста;

η_c – суммарный КПД механизмов.

Время разгона двигателя до номинальной скорости

$$t_{10} = t_p = 2,875c$$

Путь пройденный при разгоне

$$S_{10} = S_p = 0,165m$$

Суммарный момент на участке разгона при подъеме

$$M_{10} = M_{2cm} + M_{дин} = 31,7 + 292 = 323,7 \text{ (Нм)}$$

(45)

Путь пройденный на участке с установившейся скоростью

$$S_{11} = S_{ycm} = 25,67 \text{ (м)}$$

Время работы на участке с установившейся скорости:

$$t_{11} = t_{ycm} = 223 \text{ (с)}$$

На участке с установившейся скоростью момент статический равен:

$$M_{11} = M_{2cm} = 31,7 \text{ (Нм)}$$

Время торможения до полной остановки

$$t_{12} = t_T = \frac{V_n}{a} = \frac{0,115}{0,04} = 2,875 \text{ (с)}$$

(46)

Путь пройденный до полной остановки

$$S_{12} = S_T = 0,165 \text{ (м)}$$

Момент на участке торможения:

$$M_{12} = M_{2cm} - M_{дин} = 31,7 - 292 = -260 \text{ (Нм)}$$

(47)

Полное время спуска/подъема

$$t_{раб} = t_p + t_{ycm} + t_T = 2,875 + 223 + 2,875 = 228 \text{ (с)}$$

(48)

Рассчитаем время паузы в полном цикле работы крана:

										Лист
										29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ

- 1) Пауза для соединения груза $t_{п.с} = 40$ (с)
- 2) Пауза для перемещения груза $t_{п.п} = 98$ (с)
- 3) Пауза для отсоединения груза $t_{п.о} = 40$ (с)
- 4) Пауза между циклами $t_{п.ц} = 180$ (с)
- 5) Суммарное время паузы:

$$t_{п} = 40 + 40 + 98 + 180 = 358 \text{ (с)} \quad (49)$$

- 7) Время полного цикла:

$$T_{ц} = t_{п} + (t_{раб} \cdot 4) = 358 + (228 \cdot 4) = 1270 \text{ (с)} \quad (50)$$

Рисунок 4.1 – Статические характеристики

5 РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В динамике во время переходных процессов амплитуды векторов состояний и фазовые сдвиги между ними меняются. Рассмотрим более подробно приведенную выше векторную диаграмму.

Треугольник токов

Вектор тока намагничивания равен сумме векторов тока ротора и статора:

$$\vec{I}_m = \vec{I}_S + \vec{I}_R \quad (51)$$

Треугольник потокосцепления статора

Вектор потокосцепления статора равен сумме вектора потока намагничивания и потока рассеяния статора:

$$\vec{\Psi}_S = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{\sigma S} \quad (52)$$

Поток рассеяния статора равен произведению тока статора на индуктивность рассеяния статора ($L_{\sigma S}$):

$$\vec{\Psi}_{\sigma S} = L_{\sigma S} \cdot \vec{I}_S \quad (53)$$

Треугольник потокосцепления ротора

Вектор потокосцепления ротора равен сумме вектора потока намагничивания и потока рассеяния ротора:

$$\vec{\Psi}_R = \vec{\Psi}_m + \vec{\Psi}_{\sigma R} \quad (54)$$

Поток рассеяния ротора равен произведению тока ротора на индуктивность рассеяния ротора ($L_{\sigma R}$):

$$\vec{\Psi}_{\sigma R} = L_{\sigma R} \cdot \vec{I}_R \quad (55)$$

Связь между треугольником токов и треугольниками потоков

$$\vec{\Psi}_m = L_m \cdot \vec{I}_m = L_m \cdot \vec{I}_S + L_m \cdot \vec{I}_R \quad (56)$$

$$\vec{\Psi}_S = L_S \cdot \vec{I}_S + L_m \cdot \vec{I}_R \quad (57)$$

$$\vec{\Psi}_R = L_R \cdot \vec{I}_R + L_m \cdot \vec{I}_S \quad (58)$$

где: $L_S = L_m + L_{\sigma S}$ - индуктивность статора; (59)

$L_R = L_m + L_{\sigma R}$ - индуктивность ротора. (60)

Момент асинхронного двигателя

$$M = \frac{3}{2} \cdot Z_P \cdot I_R \psi_R = \frac{3 \cdot Z_P \cdot I_{Sq} \cdot \psi_R^2}{2(L_{\sigma R} \cdot I_{Sd} + \psi_R)} \Rightarrow I_{Sq} = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot Z_P \cdot \psi_R^2} \cdot (L_{\sigma R} \cdot I_{Sd} + \psi_R) \quad (61)$$

При заданном ψ_R выражением проекция статорного тока на ось q ставится в зависимость от момента. Сомножитель $(L_{\delta R} I_{Sd} + \psi_R)$ при малом рассеянии примерно равен ψ_R . Проекция статорного тока на ось q пропорциональна моменту. То есть, управляя составляющей I_{Sq} , можно практически безынерционно управлять моментом двигателя.

Рисунок 5.1 – Векторная диаграмма в системе координат dq

Управляя углом (рисунок 5/1) и величиной вектора \vec{I}_s можно получить проекцию на ось d равную реактивному току а на ось q активному току и таким образом управлять моментом и потоком двигателя.

Функциональна схема системы регулирования скорости электропривода представлена на рисунке 5.2.

Рисунок 5.2 – Функциональная схема системы регулирования с косвенной ориентацией по потоку ротора

B_{ω} – вычислитель скорости. Если в системе регулирования используется датчик положения (например, фотоимпульсный), то данный узел осуществляет вычисление скорости по приращению угла. Если система строится без датчика положения или скорости, то данный узел осуществляет оценку реальной скорости по модели косвенными методами.

PC – регулятор скорости. ПИ или ПИД- регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по скорости сигнал задания момента.

Ogr – ограничитель момента. Ограничивает момент в зависимости от частоты, используя формулу:

$$M = M_{MAX} \frac{\omega_{НОМ}}{\omega} \quad (54)$$

$B_{\psi r}$ – вычислитель потока выполняет функцию задания потока ротора при работе с постоянным потоком, или оптимизации потока ротора в зависимости от момента.

BI_d – вычислитель d -составляющей тока выполняет функцию вычисления d -составляющей тока статора, используя формулу:

$$I_{sd} = \frac{\psi_m}{L_m} = \frac{\psi_R}{L_m} \quad (55)$$

BI_q – вычислитель q -составляющей тока выполняет функцию вычисления q -составляющей тока статора, используя формулу:

$$I_{sq} = \frac{2 \cdot M}{3 \cdot Z_p \cdot \psi_R^2} \cdot (L_{\sigma R} \cdot I_{sd} + \psi_R) \quad (56)$$

$V\Delta\omega$ – вычислитель частоты скольжения выполняет функцию вычисления частоты скольжения, используя формулу:

$$\Delta\omega = \frac{2 \cdot R_R}{3 \cdot Z_P \cdot \psi_R^2} \cdot R \quad (57)$$

PT_d – регулятор тока d -составляющей. П или ПИ-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по току сигнал задания напряжения по оси d .

PT_q – регулятор тока q -составляющей. П или ПИ-регулятор, вырабатывающий из сигнала ошибки по току сигнал задания напряжения по оси q .

БКПС – блок компенсации перекрестных связей вычисляет напряжения компенсации перекрестных связей. Токи координат регулируются с помощью вырабатываемых регуляторами токов напряжений координат. Статорное напряжение координаты (d или q) есть сумма двух составляющих, одна из которых зависит от тока данной координаты, а другая от составляющей тока ортогональной данной координате. Таким образом, регулирование Iq вызывает возмущающее воздействие в канале регулирования Id . Соответственно регулирование Id вызывает возмущение в канале регулирования Iq . Схема компенсации перекрестных связей позволяет избежать этих взаимных возмущений, что естественно, улучшает качество регулирования. Регулятор тока каждой координаты в такой схеме вырабатывает составляющую статорного напряжения, зависящую только от тока регулируемой координаты (Uq или Ud), а составляющая, зависящая от другой (ортогональной) составляющей тока (Uqk или Udk), добавляется в напряжение координаты.

Вычислитель угла – осуществляет вычисления текущего угла поворота потока ротора. Угол вычисляется как сумма интеграла от частоты скольжения и угла поворота ротора, умноженного на число пар полюсов двигателя: $ПК1$ – преобразователь координат осуществляет перевод тока статора из трехфазной неподвижной системы координат в двухфазную, а затем во вращающуюся систему.

Произведем расчет динамических процессов в программном обеспечении Simulink входящем состав MATLAB [7]. Программное обеспечение MATLAB является мощнейшим инструментом для моделирования разнообразных физических процессов.

Рисунок 5.3 – Пуск под отсечку с нагрузкой

									Лист
									35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.117 ПЗ				

Рисунок 5.4 – Подъем номинального груза с ЗИ

Рисунок 5.5 – Спуск номинального груза с ЗИ

									Лист
									36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.117 ПЗ				

Рисунок 5.6 – наброс нагрузки

					13.03.02.2021.117 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

6 ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

6.1 Проверка двигателя и преобразователя по нагреву

Проверку двигателя выполняем методом эквивалентного момента.

Эквивалентный момент при естественном воздушном охлаждении двигателя

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 \times t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i \times t_i}} H_m \quad (58)$$

Где β -коэффициент ухудшения теплоотдачи.

Двигатель имеет принудительную вентиляцию, поэтому $\beta=1$.

Тогда:

$$M_{\text{экв}}^* = \sqrt{\frac{M_{1P}^2 t + M_{2VCT}^2 t + M_{3T}^2 t + M_{4P}^2 t + M_{5VCT}^2 t + M_{6T}^2 t + M_{7P}^2 t + M_{8VCT}^2 t + M_{9T}^2 t + M_{10P}^2 t + M_{11VCT}^2 t + M_{12T}^2 t}{4 \cdot (t_p + t_t + t_{VCT}) + t_{II}}} H_m \quad (59)$$

$$M_{\text{экв}}^* = \sqrt{\frac{(-318,5^2 \cdot 2,875) + (26,5^2 \cdot 2,875) + (265,5^2 \cdot 2,875) + (1596^2 \cdot 2,875) + (1298^2 \cdot 223) + (1006^2 \cdot 2,875) + (895^2 \cdot 2,875) +$$

$$\frac{+(1187^2 \cdot 223) + (1479^2 \cdot 2,875) + (323^2 \cdot 2,875) + (31,7^2 \cdot 223) + (-260^2 \cdot 2,875)}{4 \cdot (2,875 + 2,875 + 2,875) + 1100} = 278$$

Так как двигатель предназначен для работы в режиме S1, а фактическая продолжительность включения равна:

$$\frac{ПВ}{\phi} = \frac{t_{\text{раб.ц}}}{t_{II} + (t_p \cdot 4)} \cdot 100\% = \frac{912}{1100 + (228 \cdot 4)} \cdot 100\% = 45\% \quad (60)$$

То произведем соответствующий пересчет эквивалентного момента, определив для данного двигателя:

$$M_{\text{экв1}} = M_{\text{экв}}^* \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{\phi}} = 278 \cdot \sqrt{\frac{45}{100}} = 186 \quad (61)$$

Условие проверки двигателя по нагреву:

$$M_{\text{экв1}} < M_{\text{н.дв}}$$

$$M_{\text{н.дв}} = 1704 \text{ (Нм)}$$

Следовательно,

$$186 < 1704$$

Двигатель удовлетворяет условиям проверки по нагреву.

Проведем проверку преобразователя:

									Лист
									38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2021.117 ПЗ

$$X^* = \frac{I_{ном.}}{K} \cdot \sqrt{1 - (\cos\phi)^2} = \frac{242}{1524} \cdot \sqrt{1 - (0,83)^2} = 0,088 \text{ Ом.} \quad (62)$$

Действующее значение полного тока при номинальной нагрузке:

$$I^* = \sqrt{1 + \left(\frac{0,046}{X^*}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,046}{0,088}\right)^2} = 1,13 \quad (63)$$

Определим номинальную длительно-допустимую мощность инвертора:

$$S_H = \sqrt{3} \cdot U_{ндв} \cdot I_{ндв} \cdot I^* = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 242 \cdot 1,13 = 179,7 \text{ кВА} \quad (64)$$

где U_H - номинальное напряжение двигателя, В;

I_H - номинальный ток двигателя, А;

I^* - действующее значение полного тока при номинальной нагрузке, А.

Выберем преобразователи частоты, исходя из следующих данных:

$$S_{н.пч.} \geq K_3 \cdot S_H \geq 197 \text{ кВА}$$

$$U_{н.пч.} \geq U_{н.сети} \geq 380 \text{ В.}$$

$$I_{н.пч.} \geq I_{н.дв} \geq 242 \text{ А}$$

$K_3=1,1$ - коэффициент запаса

Определим активную мощность на выходе инвертора:

$$P_{н.л.} = S_H \cdot \cos\phi = 226,3 \cdot 0,66 = 149,3 \text{ кВт} \quad (65)$$

Преобразователь подходит по всем условиям нагрева.

6.2 Проверка на перегрузочную способность

Условие проверки по перегрузке:

Максимальный момент двигателя

$$M_{макс(нд)} < M_{макс.дв}$$

$$M_{макс(нд)} = 1557 \text{ (Нм)}$$

$$M_{макс.дв} = 3578 \text{ (Нм)}$$

Следовательно

$$1557 < 3578$$

Условие выполняется, двигатель проверку по перегрузке проходит.

7 АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

7.1 Выбор ПЛК

В качестве блока управления механизмом передвижения грузовой тележки выбираем программируемый логический контроллер Direct Logic серии 06 (DL06) - программируемый контроллер стандартного исполнения для эксплуатации в нормальных промышленных условиях для решения задач автоматизации низкой и средней степени сложности. Это моноблочный программируемый логический контроллер, который имеет встроенные дискретные каналы ввода/вывода на 20 входов и 16 выходов и четыре слота для установки дополнительных модулей: дискретных, аналоговых (в том числе и 16-битовых), температурных, коммуникационных или интеллектуальных. К одному контроллеру может быть подключено до 100 сигналов ввода/вывода. Существует 9 моделей, которые различаются по сочетанию типов сигналов: переменного, постоянного тока и реле. Широкие диапазоны питающего напряжения, позволяют применять DL06 в большинстве приложений без использования дополнительного трансформатора. DirectLogic серии 06 имеет память 14.8 К слов [1], программируется на релейной логике, языке стадий, имеет более 230 команд, включая математику с плавающей точкой.

Команды барабанного командоаппарата по времени или по событиям позволяют легко создавать жестко заданные последовательности действий, поддерживаются до 8 контуров ПИД-регулирования. Широкие коммуникационные возможности позволяют встраивать DL06 в уже существующие промышленные сети - два коммуникационных порта RS232 и RS232/422/485 с поддержкой протоколов Modbus RTU, ASCII, DirectNET, K-Sequence, дополнительные коммутационные модули Ethernet (100Мбит/с), DeviceNet, Profibus.

Опциональный LCD-дисплей с 2 строками по 16 символов, 7 функциональными клавишами может применяться как интерфейс оператора или для поиска неисправностей. Конкурентоспособные цены DL06 позволяют, комбинируя аналоговые, дискретные модули ввода/вывода, получить недорогое решение для реализации практически любых алгоритмов управления.

В настоящее время актуальной задачей является оснащение башенных кранов специальными электронными устройствами, обеспечивающими:

- хранение информации о параметрах работающего крана: общей наработки, наработки по циклам включения, перемещениях груза, нарушения правил работы, климатических условий;
- слежение за работой машиниста крана и выдача рекомендательной информации;
- ограничение действий машиниста крана в случае нарушения условий работы;

										13.03.02.2021.117 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							40

- выдача информации об износе крана в целом и отдельных его механизмов;
- предупреждение о необходимости проведения технического и сезонного обслуживания крана.

Информация, регистрируемая для выявления технических причин аварии, должна включать: дату и время выполнения рабочего цикла, значения параметров крана, которые не рекомендуется превышать, режим регистрации.

Аппаратные программные средства контроллера позволяют обеспечить выполнение всех типовых информационных и управляющих функций: сбор технологической информации, контроль и регулирование в соответствии с техническим заданием, изображение и передачу информации. Выбираем контроллер из расчета, что он должен управлять не только механизмом передвижения тележки, но и механизмами подъема и передвижения моста. В таблице 7.1 приведены основные характеристики выбранной модели.

Таблица 7.1 – Характеристика контроллера Direct LOGIC D006DR

Параметр	Характеристика
Общая память	14,8 К _{слов}
Емкость памяти данных	128К слов (память данных: 32К слов, доп. память: 32К слов x 3 банка памяти)
Скорость выполнения команды LD	0,02 мкс
Встроенные порты	2: RS232C. Второй порт поддерживает RS232C/RS422/RS485, DirectNET , MODBUS RTU и ASCII .
Дополнительные устройства	Карты памяти
Количество входов	20
Количество выходов	16

7.2 Логические уравнения

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

- включение двигателя крана вверх;
- включение двигателя крана вниз;

Необходимо также задействовать выходные сигналы на индикацию и сигнализацию состояния системы, для удобства эксплуатации и устранения в системе неполадок.

На пульт оператора будут выводиться следующие сигналы:

- сигнал о готовности схемы;
- сигнал о готовности тележки;

- сигнал аварии.

Для управления механизмом введен пульт управления на котором располагается джойстик. С его помощью оператор осуществляет работу механизмов и может задавать следующие выходные сигналы:

- включение двигателя тележки вперед;
- включение двигателя тележки назад.

Для автоматизации работы системы необходимо иметь информацию о состоянии объекта или его положении. Поэтому необходимо иметь следующие датчики:

- датчики о закрытии калиток выхода на подкрановые пути;
- датчик о закрытии калитки на посадочной
- датчик о поднятии лестницы;
- датчик о том, что закрыты двери электропомещения;
- датчик о закрытии люка кабины машиниста.

Кроме этого необходимо иметь информацию о состоянии:

- преобразователя частоты;
- термистора;
- блока управления тормозами;
- тормозного резистора.

Ниже представлена расшифровка обозначений принятых переменных и логические функции для выходных и промежуточных переменных, а также логические уравнения.

«Подкр. путь 1, подкр. путь 2» - сигнал датчиков о закрытии калиток выходана подкрановые пути;

«Калитка на посад» - сигнал датчика о закрытии калитки на посадочной;

«Люк кабины» - сигнал датчика о закрытии люка кабины машиниста;

«Лестница» - сигнал датчика о поднятии лестницы;

«Двери» - сигнал датчика о том, что закрыты двери электропомещения.

Разрешение работы (РР):

РР=Подкр.путь1 Подкр.путь2·Калитканапосад. ·Люк кабины·Лестница ·Двери

Разрешение контакторов (РК):

РК=РР (Сб.Сх+РК) Ав.Стоп

Сборка схемы (Сб. Сх.):

Сб.Сх=БЗП ·ГотБУТ КМ1

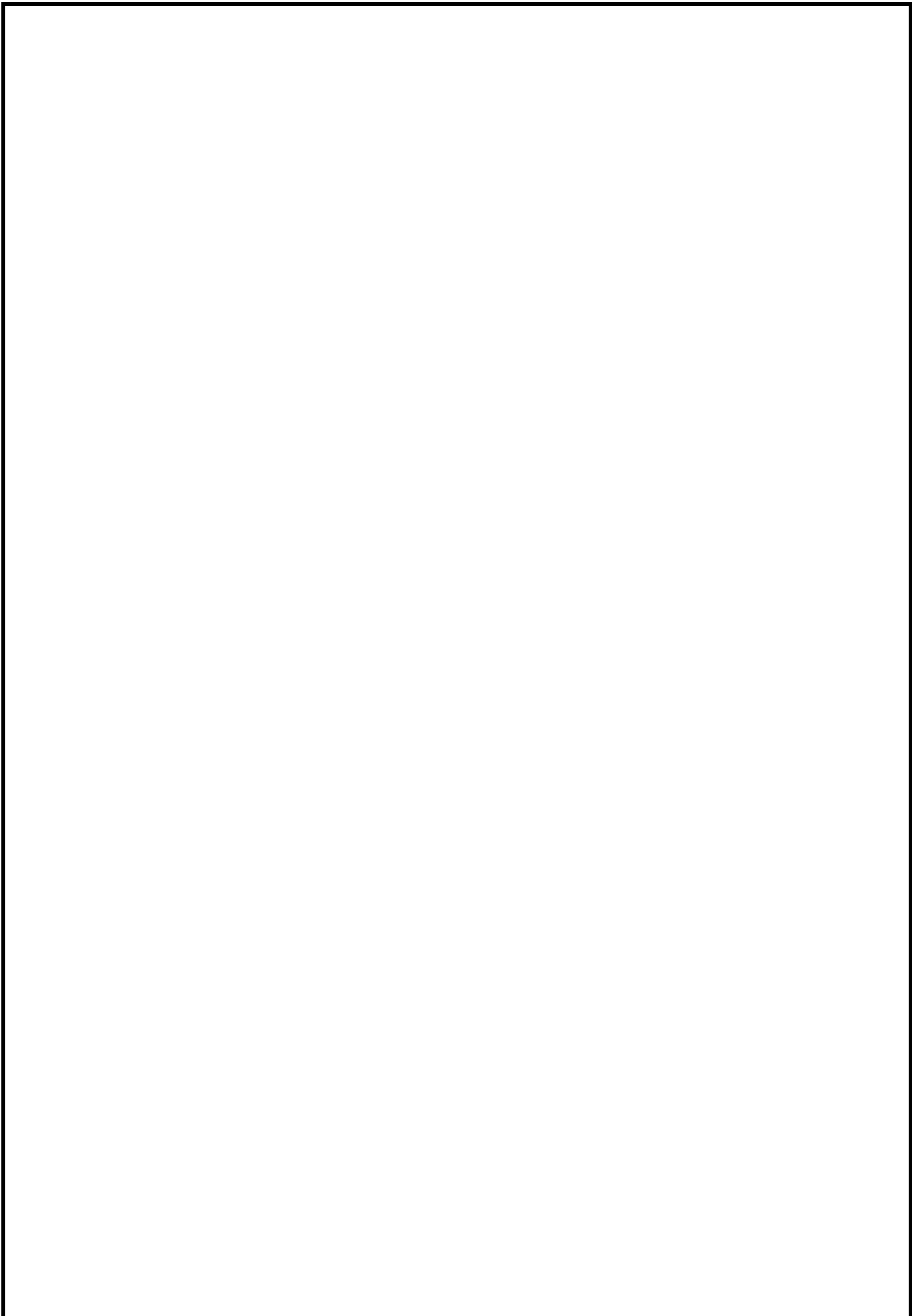
Проверка работы ПЧ (Раб. ПЧ):

Раб ПЧ=Сб.Сх. Гот.ПЧ ·Торм. рез.·РР

Готовность (Гот):

										Лист
										42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

13.03.02.2021.117 ПЗ



									<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	13.03.02.2021.117 ПЗ				44

Окончание таблицы 7.2

Адрес	Наименование сигнала\команды
1.04	Сигнал аварии при движении Вниз
1.05	Сигнал с джойстика вниз
1.06	Сигнал с джойстика верх
1.07	Готовность БУТ
10.00	Разрешение на включение контактора
10.01	Разрешение на работу
10.02	Готовность
10.03	Лампа «Готовность»
10.04	Разрешение на движение
10.05	Движение вверх
10.06	Движение вниз
10.07	Сборка схемы
10.08	Работа ПЧ

Рисунок 7.1 – Программа управления подъемным краном

									<i>Лист</i>
									46
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>					

13.03.02.2021.117 ПЗ

Рисунок 8.1 – Электрическая схема преобразователя частоты

									<i>Лист</i>
									48
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>					

13.03.02.2021.117 ПЗ

Преобразователь состоит из следующих элементов:

QF1– Быстродействующие плавкие предохранители предназначены для защиты вентиляльных преобразователей от внешних коротких замыканий.

Фильтр входного напряжения, на схеме L1. Фильтр входного напряжения - это дроссель переменного тока. Применяется при дисбалансе напряжения фаз сети в 3% и более, а также когда мощность питающей сети 500 кВА или больше и происходят быстрые изменения ее мощности. Дроссель переменного тока фильтрует также высокочастотные помехи, приходящие из сети в преобразователь частоты и генерируемые преобразователем частоты в сеть. Кроме того, он улучшает форму кривой тока, подаваемого на преобразователь частоты.

Цепь KM1, KM2 и R1 служит для ограничения тока зарядки конденсаторов промежуточного контура.

Выпрямитель с возможностью рекуперации энергии в питающую сеть представляет из себя инверторный трехфазный транзисторный мост на IGBT транзисторах.

Двигатель получает питание от трехфазного автономного инвертора на IGBT транзисторах.

L2 – дроссель двигателя снижает нагрузку по напряжению на обмотки двигателя. Одновременно снижаются и емкостные токи перезаряда, оказывающие дополнительную нагрузку на силовую часть при использовании длинных кабелей двигателя.

										Лист
										49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.117 ПЗ					

9 ВЫБОР ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ СХЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

На основе описания технологического процесса, содержательного описания автоматизируемого объекта, определенных входных и выходных команд, с учетом выбора программируемого контроллера составлена схема электрическая функциональная, представлена на рисунке.

В соответствии с указанными обозначениями:

A1 – пульт оператора;

A2 – программируемый логический контроллер DirectLOGIC D0 06DR; G1 – блок питания;

M1 – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;

БУТ – блок управления тормозами;

ПЧ – преобразователь частоты Unidrive SP.

Система автоматизации состоит из следующих элементов:

- пульт управления;
- программируемый контроллер DirectLOGIC D0 06DR;
- блок питания датчиков и входных цепей контроллера;
- датчики технологической информации (индуктивные и оптические);
- система управления двигателями передвижения тележки (преобразователь частоты Unidrive SP);
- асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором M1;
- блок управления тормозами.

На пульте управления расположены следующие элементы:

- кнопка «Аварийный стоп»;
- лампа «Готовность схемы» ;
- лампа «Авария»;
- джойстик для дискретного задания скорости;
- лампа готовности механизма передвижения тележки.

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

									Лист
									50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

13.03.02.2021.117 ПЗ

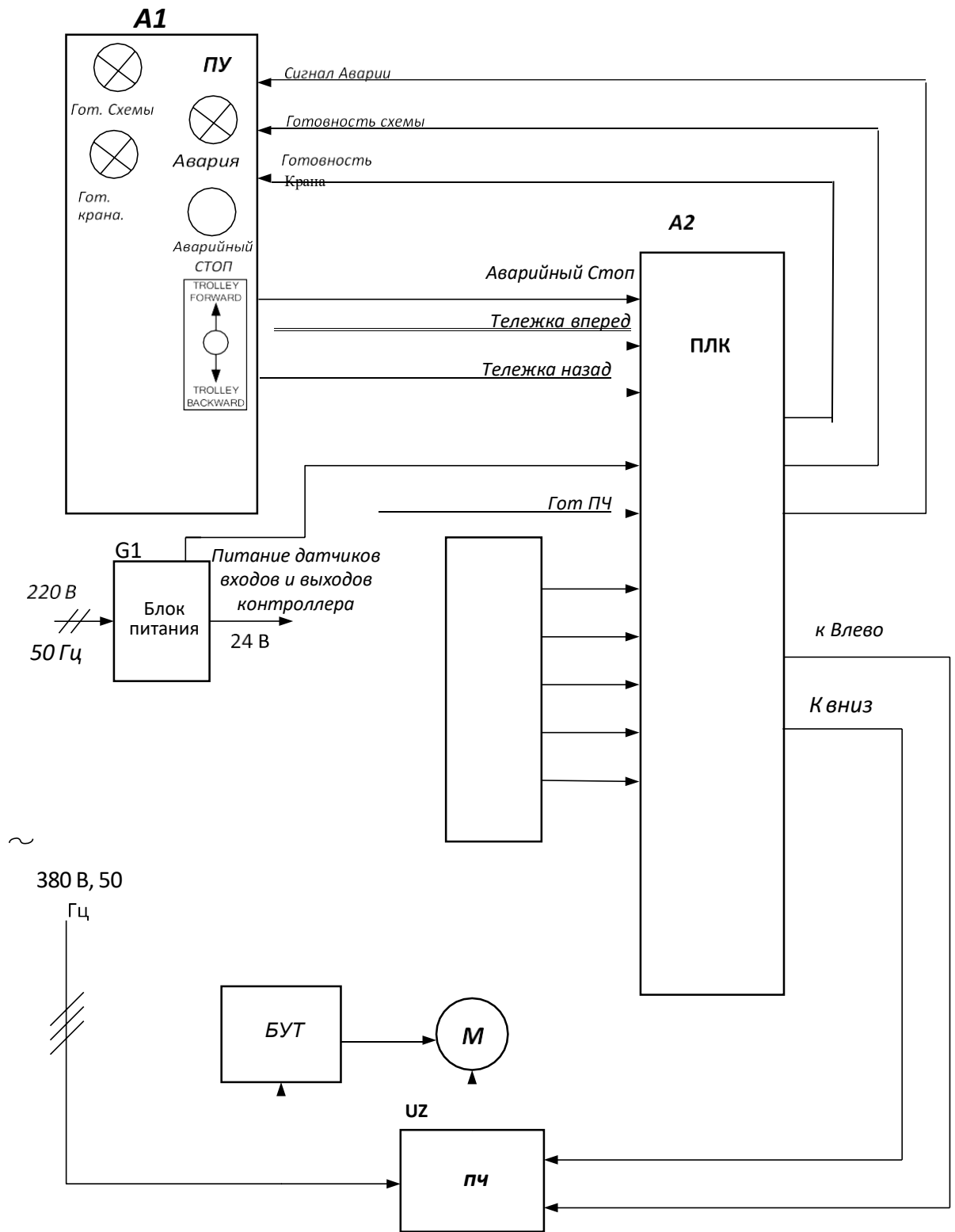


Рисунок 9.1 – Функциональная схема механизма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе была разработана система электропривода механизма главного подъема мостового крана №102 г. п. 80 т ЭСПЦ - 2 ПАО «Ашинский металлургический завод».

На основе анализа технологических режимов работы мостового крана №102 были сформулированы требования к электроприводу главного подъема. Проведен выбор и проверка двигателя по нагреву и перегрузке. В ходе выполнения работы был выбран трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором и принудительным охлаждением фирмы VEM K21F315L8 со следующими данными: номинальная мощность $P_n=132$ кВт; номинальный ток $I_n=242$ А; номинальная скорость $n_n=740$ об/м; коэффициент мощности $\cos\varphi=0,83$.

Для питания двигателя выбран частотный преобразователь Sinamics G120 фирмы Siemens. Также были рассчитаны уставки защитных устройств.

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

В качестве системы автоматизации применяется программируемый логический контроллер Direct LOGIC D006DR. Для него составлена программа, с помощью которой реализуется требуемый алгоритм работы. Произведен выбор элементов схемы автоматизации. Применение данного программируемого контроллера позволяет контролировать процесс работы и сократить время на поиск неисправностей, регистрировать рабочие параметры.

									Лист
									52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	13.03.02.2021.117 ПЗ				

