

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра «Электротехника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

_____ В. Н. Тимофеев

подпись инициалы, фамилия

«_____» _____ 2021 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**

в форме бакалаврской работы

Студенту Полелей Игорю Геннадьевичу

фамилия, имя, отчество

Группа ФЭ17-06Б Направление (специальность) 13.03.02 (13.03.02.10)

номер

код

Электроэнергетика и электротехника (Электропривод и автоматика)

наименование

Тема выпускной квалификационной работы Автоматизация электроприводов портального крана грузоподъемностью 16 тонн

Утверждена приказом по университету № 45/с от 12.01.2021

Руководитель ВКР К. С. Федий, к.т.н., доцент кафедры «ЭТ»

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: Технические характеристики портального крана грузоподъемностью 16 тонн - «КПП 16/20».

Перечень разделов ВКР: 1. Введение. 2. Общие сведения. 3. Расчетная часть. 4. Модернизация системы автоматизации портального крана. 5. Заключение. 6. Список использованных источников.

Перечень графического материала: 1. Общий вид портального крана 2. Статическая нагрузочная диаграмма механизма. 3. Нагрузочная и скоростная диаграммы электродвигателя механизма подъема портального крана. 4. Естественная механическая характеристика 5. Пусковая диаграмма АД. 6. – Модель асинхронного двигателя с фазным ротором. 7. Модель частотно – управляемого электропривода. 8. Модель системы ПЧ – АД с векторным управлением с обратной связью по скорости. 9. Функциональная схема системы регулирования скорости АД с прямой ориентацией по полю. 10. Структурная схема блока векторного управления. 11. Настройка блоков системы векторного управления. 12. Переходные характеристики ЭП.

Руководитель ВКР

подпись

К. С. Федий

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

И. Г. Полелей

инициалы и фамилия

25 апреля 2021 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК

выполнения этапов ВКР

Наименование и содержание этапа	Срок выполнения
1 Получение задания на дипломное проектирование	25.04.2021
2 Изучение собранной литературы и технической документации	26.04.2021-30.04.2021
3 Выбор электрооборудования	31.04.2021-03.05.2021
4 Составление программы управления	04.05.2021-10.05.2021
5 Оформление пояснительной записки	16.05.2021-30.05.2021
6 Оформление графической части проекта	01.06.2021-05.06.2021
7 Срок сдачи студентом законченного проекта	11.06.2021

Руководитель ВКР

подпись, дата

К. С. Федий

инициалы и фамилия

Студент

подпись, дата

И. Г. Полелей

инициалы и фамилия

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа «Автоматизация электроприводов портального крана грузоподъемностью 16 тонн» содержит 67 страниц текстового документа, 20 иллюстраций, 15 использованных источников, 16 таблиц.

ПОРТАЛЬНЫЙ КРАН, MATLAB & SIMULINK, ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД, СКАЛЯРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ВЕКТОРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ, ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ.

Объект проекта – портальный крана грузоподъемностью 16 тонн - «КПП 16/20». Основной задачей проекта является модернизация электропривода механизма подъема портального крана (как наиболее нагруженного механизма), а также выполняется моделирование проектируемой и базовой систем электроприводов в программе Matlab & Simulink.

Цели проекта:

- Выполнить расчёт и оценку базовой системы, с указанием на необходимость ее модернизации;
- Выбрать двигатель для модернизируемой системы, а также систему управления для заданного электродвигателя;
- Выполнить исследование базовой и модернизированной систем;
- Произвести сравнение базовой и модернизированной систем на основе полученных характеристик.

В пояснительной записке к проекту описаны технологический процесс, проанализированы технические требования к крану, выбран электродвигатель для базовой системы, выполнено исследование базовой системы и переходных процессов скорости и момента для режима пуска, произведено обоснование принципа модернизации, выбран электродвигатель для системы ПЧ-АД, выполнено исследование системы ПЧ-АД и переходных процессов скорости и момента для режима пуска, произведено сравнение

модернизированной и исходной систем.

БР–13.03.02.10 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		И.Г.Полелей			Автоматизация электроприводов портального крана грузоподъемностью 16	Лит.	Лист	Листов
Провер.		К.С.Федий					5	
Реценз.						Кафедра ЭТ		
Н. контр.								
Утверд.								

СОДЕРЖАНИЕ

РЕФЕРАТ	5
ВВЕДЕНИЕ	7
1 Общая информация о кранах	10
1.1 Классификация грузоподъемных кранов	10
1.2 Применение портального крана «КПП 16/20»	10
1.3 Устройство и работа портального крана	11
1.4 Технические характеристики портального крана	14
2 Расчетная часть	17
2.1 Расчет статической нагрузочной диаграммы механизма подъема. Предварительный выбор двигателя по мощности	17
2.2 Расчет и построение динамической диаграммы механизма. Проверка выбранного двигателя по мощности	25
2.3 Проверочный расчет электродвигателя по мощности	31
2.4 Расчет и построение механических характеристик	34
2.5 Расчет и построение пусковой диаграммы.....	36
2.6 Торможение механизма подъема портального крана	38
2.7 Расчет переходного процесса пуска двигателя	39
2.8 Моделирование базовой системы в среде Matlab Simulink	45
2.9 Оценка показателей качества базовой системы	46
3 Модернизация системы автоматизации портального крана	49
3.1 Обоснование принципа модернизации.....	49
3.2 Выбор электродвигателя	52
3.3 Моделирование частотно – управляемого электропривода в среде Matlab Simulink.	57
3.4 Моделирование электропривода с векторным управлением в среде Matlab Simulink. Сравнение векторного и скалярного управления	59
3.5 Выбор системы управления модернизированного электропривода на основе оценки показателей качества	64
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	68

	Подп. и дата
	Име. № дубл.
	Взам. инв. №
	Подп. и дата
	Име. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

6

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день для наиболее полного и своевременного удовлетворения потребностей промышленности и населения в транспорте, повышения эффективности и качества транспортной системы необходимо повышение уровня использования и надежности в работе технических средств. В особенности выделяется необходимость в завершении реконструкции и увеличении пропускной способности речных портов, за счет оснащения их высокопроизводительной техникой для обработки грузов и строительства новых механизированных причалов.

Постоянный рост производительности труда и повышение качества продукции – важнейшие задачи, имеющие решающее значение в укреплении экономического потенциала страны и создании материально-технической базы.

Решение данных проблем невозможно без совершенствования техники, повышения производительности, а также надежности машин. Все это в первую очередь связано с совершенствованием электропривода данных машин.

Современные электроприводы определяют уровень силовой электрооборудования труда и в силу своих преимуществ по сравнению с другими типами приводов являются основным средством автоматизации рабочих машин и производственных процессов. Развитие технологий и повсеместное внедрение автоматики предъявляют все более высокие требования к электроприводу и приводят к значительному расширению области применения управляемого электропривода.

Широкое развитие транспортных автоматизированных систем выдвигает следующий ряд требований:

- достижение точности остановки;
- достижение плавности пуска и торможения;
- возможность перераспределения нагрузок между двигателями в многодвигательных системах и т.д.

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

7

Целью данного дипломного проекта является совершенствование электрооборудования порталного крана, для более полного выполнения технологических требований перегрузочного процесса и обеспечения экономного использования электроэнергии для улучшения эксплуатационных характеристик, повышения производительности труда и снижения затрат.

Электрооборудование кранов – одно из главных средств комплексной механизации отраслей народного хозяйства. На большом количестве грузоподъемных машин, выпускаемых на отечественном производстве, установлен электропривод основных рабочих механизмов. Исходя из этого, работа данных машин в большей степени зависит от качества показателей используемого кранового оборудования.

Повышение объемов грузоперевозок, пополнение судоходных компаний современными большегрузными судами, необходимость повышения производительности труда при погрузочно-разгрузочных работах потребовали не только модернизации системы порталных кранов, но и учет их эксплуатационных и технических параметров.

Электропривод большого количества грузоподъемных машин характеризуется прерывистой работой с высокой частотой включения, широким диапазоном регулирования скорости и постоянно возникающими значительными перегрузками при разгоне и торможении механизмов. Особые условия использования электропривода в грузоподъемных машинах послужили основой для создания специальных серий электродвигателей и крановых устройств.

Электрооборудование кранов содержит:

- ряд крановых электродвигателей постоянного и электродвигателей переменного тока;
- ряд силовых и магнитных контроллеров, концевых выключателей, командных контроллеров, постов кнопочных, тормозных электромагнитов и электрогидравлических толкателей, пускотормозных резисторов и серию других устройств, комплектующих различные электроприводы кранов.

Име. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Име. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

8

Исходя из назначения крана разрабатываются обязательные требования, определяющие как основные параметры (грузоподъемность крана, вылет стрелы, грейферный или крюковой режим работы, скорость механизмов, и т. д.), но также и конструкцию.

В данной работе необходимо создать современную автоматизированную систему электропривода для механизмов портального крана (КПП) «Кировец 16/20». В основе управляемого электропривода лежит система векторного управления скоростью асинхронного электродвигателя.

Все решаемые в данной работе задачи по обновлению электрооборудования направлены на повышение КПД, увеличение долговечности и простоты обслуживания электромеханических систем.

Инв. № подл.	Подп. и дата				Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лист
	Взам. инв. №									
Инв. № дубл.				БР - 13.03.02.10 ПЗ						
Подп. и дата										
Подп. и дата										

1 Общая информация о кранах

1.1 Классификация грузоподъемных кранов

По конструкции порталные краны разделяют следующим образом:

Краны порталные перегрузочные.

Краны перегрузочные используются в речных и морских портах, на промышленных объектах для работы с сыпучими грузами в грейферном режиме, для перемещения контейнеров и штучных грузов, а также для обработки металлопроката и металлолома (посредством подъемных электромагнитов).

Краны порталные монтажные.

В первую очередь применяются при работе крупнотоннажными грузами. В конструкции таких кранов для более эффективного использования возможно изменять допустимую грузоподъемность изменением вылета;

Краны порталные кенгуровые.

Устройством таких кранов предусмотрена установка на портале бункера. Производительность данных кранов увеличена за счет исключения ращения из цикла работы.

Портальные краны имеют механизмы подъема, изменения вылета стрелы, поворота и перемещения. Привод механизмов, обычно, электрический, но также может быть установлен и ручной привод. Управление может производиться из кабины крана, с пола или дистанционно.

1.2 Применение portalного крана «КПП 16/20»

Краны «Кировец» существуют на рынке подъемно-транспортного оборудования более 50 лет. По своим техническим параметрам они наиболее близки к таким импортным аналогам, как «Ganz» и «Сокол». Эти марки были разработаны и освоены производством в период с 1950 по 1970 годы.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Причем проектирование выполнялось по единому техническому заданию, утвержденному министерством СССР в рамках СЭВ (Совета экономической взаимопомощи), а разработка всех кранов велась под руководством ведущих конструкторов предприятия по проектированию грузоподъемного оборудования – «Завода ПТО им. С.М.Кирова». На сегодняшний день в России в эксплуатации находится более 2500 единиц модели «Кировец».

По своей конструкции настоящий кран предназначен для:

- выполнения погрузочно-разгрузочных работ в морских и речных портах;
- для механизации ряда трудоемких работ на небольших гидротехнических стройках, а также в других отраслях промышленности.

1.3 Устройство и работа портального крана

Кран «Кировец» состоит из портала, ходовой части и поворотной части. Портал в свою очередь устанавливается на тележках ходовой части (в количестве 4-х штук). Ширина колеи портала – 10,5 м. Тележки имеют собственный электропривод и оборудованы рельсовыми захватами (для предотвращения угона крана ветром вдоль рельсового пути). Пара тележек оборудованы устройствами, которые в свою предотвращают столкновение нескольких кранов или столкновение с тупиковым упором.

Верхняя часть портала устанавливается на поворотной части крана. Поворотная часть состоит из колонны, машинного отделения, кабины управления, стреловой системы. С помощью реечного механизма изменяется вылет стрелы.

Вращение поворотной части реализовано посредством двух электроприводов, установленных в нижней части колонны. Опорно-поворотное устройство в свою очередь состоит из опоры (нижняя часть устройства), а также поворотных катков. Катки опираются на кольцо, закрепленное на портале, в верхней его части.

Ине. № подл.	Ине. № дубл.	Взам. инв. №	Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

11

Механизм подъема изготовлен в виде двухбарабанной лебедки и необходим при работе с крюком или грейфером. Чтобы не допустить перегрузок, на механизме подъема установлен ограничитель грузоподъемности. Концевые выключатели предназначены для ограничения высоты при подъеме и опускании грузов.

Подача тока к отводу осуществляется гибким шланговым кабелем от токоприемной колонки. Длина троса позволяет крану перемещаться в обе стороны от колонны на 50 м. Для обеспечения наматывания и разматывания кабеля при движении крана по рельсовым путям на портале установлен кабельный барабан.

Кран предназначен для работы с грузами до 16 тонн при вылете стрелы от 10 до 32 м. при высоте подъема до 30 м.

Основу конструкции порталных кранов «Кировец» составляет сталь 09Г2С 14 и 15 категорий. Технология сварки отечественных хладостойких сталей является типовой для отечественных ремонтных организаций.

Кран «Кировец» может эксплуатироваться при температуре до -45°C , что является существенным показателем для конкретного места установки крана. Ремонтопригодность металлоконструкций крана технологически обеспечена во всем диапазоне рабочих температур.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

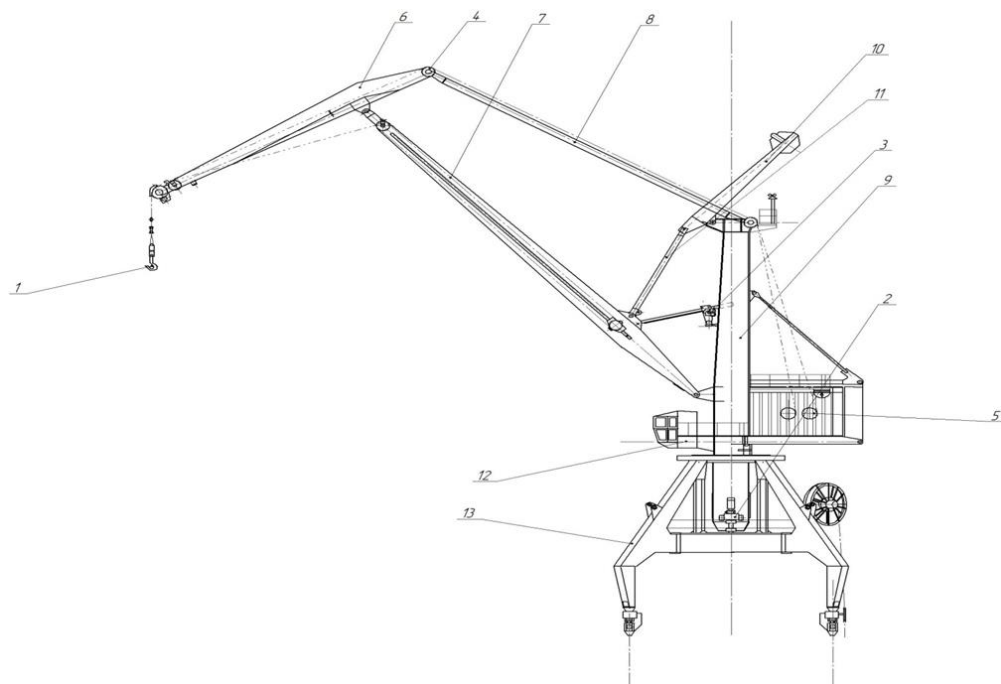


Рисунок 1.1 – Общий вид портального крана

- 1) Подвеска крюковая;
- 2) механизм поворота;
- 3) механизм изменения вылета стрелы;
- 4) система канатных блоков;
- 5) механизм подъёма;
- 6) хобот;
- 7) стрела;
- 8) оттяжка;
- 9) колонна;
- 10) подвижный противовес;
- 11) коромысло;
- 12) кабина;
- 13) портал.

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

13

1.4 Технические характеристики портального крана

Портальный кран «Кировец 16/20» имеет максимальный вылет стрелы: для грузоподъемности 16 тонн вылет стрелы 32 метра; для 20 тонн вылет 16 метров. Кран предназначен для переработки контейнеров, тарно-штучных и сыпучих грузов в крюковом и грейферном режиме.

Под понятием «высота подъема» и «глубина опускания» понимается возможность движения от головки рельса до нижней кромки крюка или грейфера.

Далее в табл. 1.1 – 1.6 приведены технические характеристики крана «Кировец 16/20».

Таблица 1.1 – Грузоподъемность крана «Кировец 16/20»

Грузоподъемность, т:	
в крюковом режиме	16 и 20
в грейферном режиме	16
Вылет стрелы, м:	
в крюковом режиме при грузоподъемности 16 тонн	10-32
грузоподъемности 20 тонн	10-20
в грейферном режиме при грузоподъемности 16 тонн	10-32
Высота подъема, м:	
в крюковом режиме при грузоподъемности 16 тонн	30
грузоподъемности 20 тонн	14
в грейферном режиме при грузоподъемности 16 тонн	28
Глубина опускания, м	
в крюковом режиме при грузоподъемности 16 тонн	15
грузоподъемности 20 тонн	8
в грейферном режиме при грузоподъемности 16 тонн	15
Колея портала, м	10,5

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	Дата

Таблица 1.2 – Весовые данные крана «Кировец 16/20»

Конструкционный вес крана с крюковой подвеской, т	240
Противовес стрелы (бетон-железо), т	13,8
Противовес поворотной части (бетон-железо), т	34
Противовес кабельного барабана (бетон-железо), т	1,8
Кран в комплекте, с крюковой подвеской, т	270

Таблица 1.3 – Механизм подъема крана «Кировец 16/20»
(режим работы «ВТ»)

Электродвигатель поддерживающего барабана: кол-во, шт. мощность, кВт частота вращения, об/мин продолжительность включения (ПВ), %	1 100 590 65
Электродвигатель замыкающего барабана: кол-во, шт. мощность, кВт частота вращения, об/мин продолжительность включения (ПВ), %	1 100 590 65
Скорость подъема груза, м/мин	66
Диаметр канатного барабана, мм	1000
Диаметр подъемно-грейферного каната, мм	25,5

Таблица 1.4 – Механизм поворота крана «Кировец 16/20»
(режим работы «ВТ»)

Электродвигатель: кол-во, шт. мощность, кВт частота вращения, об/мин продолжительность включения (ПВ), %	1 23,5 965 60
Скорость поворота, об/мин	1,5

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Таблица 1.5 – Механизм изменения вылета стрелы крана «Кировец 16/20»
(режим работы «Т»)

Электродвигатель:	
кол-во, шт.	1
мощность, кВт	18,5
частота вращения, об/мин	960
продолжительность включения (ПВ), %	40
Скорость изменения вылета стрелы, м/мин	50

Таблица 1.6 – Механизм передвижения крана «Кировец 16/20»
(режим работы «Л»)

Электродвигатель: 4 шт.	
мощность, кВт	9,7
частота вращения, об/мин	945
продолжительность включения (ПВ), %	40
Скорость передвижения, м/мин	32

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

16

2 Расчетная часть

2.1 Расчет статической нагрузочной диаграммы механизма подъема. Предварительный выбор двигателя по мощности

Данные для расчета механизма подъема приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные для расчета механизма подъема

Наименование	Условное обозначение	Значения
Диаметр грузового барабана	D_{σ}	1,0 м
Номинальное значение скорости	$v_{н}$	1,1 м/с
Номинальное значение КПД механизма	η	0,85
Передаточное число механизма	i	28,06
Рабочий путь Подъёма (спуска)	H	15 м
Число приводных электродвигателей	K_{Σ}	2
Номинальная грузоподъемность	$Q_{н}$	16,0 т
Маховый момент муфты с тормозным шкивом	$J_{м}$	1,2 кг · м ²
Тип двигателя	АД	–
Способ торможения	Противовключение	–
Кратность полиспаста	–	2

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

17

Нагрузочная диаграмма работы механизма подъема для предварительно принятого режима включает в себя операции:

- 1) Подъем груза массой Q_n на высоту H за время t_{p1} .
- 2) Остановка механизма за время t_0 перемещения груза по цеху.
- 3) Спуск груза массой Q_n с высоты H за время $t_{p2} = t_{p1}$.
- 4) Остановка механизма за время t_0 нагрузки.
- 5) Подъем крюковой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$.
- 6) Остановка механизма на время t_0 за время $t_{p3} = t_{p2} = t_{p1}$.
- 7) Спуск крюковой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ за время $t_{p4} = t_{p3} = t_{p2} = t_{p1}$.
- 8) Остановка механизма на время t_0 нагрузки.
- 9) Подъем груза $0,75 \cdot Q_n$ на высоту H за время $t_{p5} = t_{p1}$.
- 10) Остановка механизма на время t_0 перемещения груза по цеху.
- 11) Спуск груза массой $0,75 \cdot Q_n$ с высоты H за время $t_{p6} = t_{p1}$.
- 12) Остановка механизма на время t_0 разгрузки.
- 13) Подъем крюковой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ на высоту H за время $t_{p7} = t_{p1}$.
- 15) Спуск крюковой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ с высоты H за время $t_{p8} = t_{p1}$.
- 16) Остановка привода механизма на время t_0 погрузки.
- 17) Подъем груза массой Q_n на высоту H за время $t_{p9} = t_{p1}$.
- 18) Остановка привода механизма на время t_0 перемещения по цеху.
- 19) Спуск груза Q_n с высоты H за время $t_{p10} = t_{p1}$.
- 20) Остановка привода механизма на время t_0 разгрузки.
- 21) Подъем крюковой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ на высоту H за время $t_{p11} = t_{p1}$.

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

22) Остановка электропривода механизма на время t_0 перемещения по цеху.

23) Спуск крановой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ с высоты Н за время $t_{p12} = t_{p1}$.

24) Остановка электропривода механизма на время t_0 погрузки.

25) Подъем груза $0,5 \cdot Q_n$ на высоту Н за время $t_{p13} = t_{p1}$.

26) Остановка электропривода механизма на время t_0 перемещения по цеху.

27) Спуск груза $0,5 \cdot Q_n$ с высоты Н за время $t_{p14} = t_{p1}$.

28) Остановка электропривода на время t_0 разгрузки.

29) Подъем крюковой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ на высоту Н за время $t_{p15} = t_{p1}$.

30) Остановка электропривода механизма на время t_0 перемещения по цеху.

31) Спуск крановой подвески массой $0,2 \cdot Q_n$ с высоты Н за время $t_{p16} = t_{p1}$.

По завершении последовательность операций 1...31 повторяется.

Скорость подъема и опускания принимается неизменной (электродвигатель имеет достаточно жесткую характеристику), время подъема и опускания в статическом режиме:

$$t_{p1} = t_{p2} = \dots t_{pi} = \frac{H}{v_n} = \frac{15}{1,1} = 13,636 \text{ с}$$

Остановка механизма подъема за время t_0 :

$$t_0 = t_p$$

Продолжительность цикла, с:

$$t_u = \sum_{i \in 4} t_{pi} + \sum_{i \in 4} t_{0i} = t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4} + 4 \cdot t_0;$$

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. име. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$t_u = 13,636 + 13,636 + 13,636 + 13,636 + 4 \cdot 13,636 = 109,088 \text{ с.}$$

Продолжительность включения механизма без учета динамических режимов, %,

$$ПВ = \frac{\sum t_{pi}}{t_u} \cdot 100\% = \frac{218,176}{422,716} \cdot 100\% = 51,613\%.$$

Статический момент на валу электродвигателя при подъеме, *Нм*,

$$M_{ci}^n = \frac{K_z \cdot Q_n \cdot R_{\sigma} \cdot 9,81}{2 \cdot i \cdot \eta},$$

где K_z – коэффициент загрузки;

i – общее передаточное число механизма;

η – КПД механизма.

$$K_z = \frac{Q}{Q_n} = \frac{16}{16} = 1,$$

$$K_z = \frac{0,75 \cdot 16}{16} = 0,75,$$

$$K_z = \frac{0,5 \cdot 16}{16} = 0,5,$$

$$K_z = \frac{0,2 \cdot 16}{16} = 0,2.$$

При $K_z = 1,0$

$$M_{c1}^n = \frac{1,0 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81}{2 \cdot 28,06 \cdot 0,85} = 1645,214 \text{ Нм}$$

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ

При $K_3 = 0,75$

$$M_{c2}^n = \frac{0,75 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81}{2 \cdot 28,06 \cdot 0,85} = 1233,911 \text{ Нм}$$

При $K_3 = 0,5$

$$M_{c3}^n = \frac{0,5 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81}{2 \cdot 28,06 \cdot 0,85} = 822,607 \text{ Нм}$$

При $K_3 = 0,2$

$$M_{c4}^n = \frac{0,2 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81}{2 \cdot 28,06 \cdot 0,85} = 329,0428 \text{ Нм}$$

Статический момент на валу электродвигателя при спуске грузов, различных по массе, H_m ,

$$M_{ci}^c = \frac{K_3 \cdot Q_n \cdot R_0 \cdot 9,81 \cdot \eta'}{2 \cdot i},$$

где $\eta' = 2 - \frac{1}{\eta} = 2 - \frac{1}{0,85} = 0,824$.

При $K_3 = 1,0$

$$M_{c1}^c = \frac{1,0 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81 \cdot 0,824}{2 \cdot 28,06} = 1152,3079 \text{ Нм}$$

При $K_3 = 0,75$

$$M_{c2}^c = \frac{0,75 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81 \cdot 0,824}{2 \cdot 28,06} = 864,231 \text{ Нм}$$

Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

21

При $K_s = 0,5$

$$M_{c3}^c = \frac{0,5 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81 \cdot 0,824}{2 \cdot 28,06} = 576,154 \text{ Нм}$$

При $K_s = 0,2$

$$M_{c4}^c = \frac{0,2 \cdot 16000 \cdot 0,5 \cdot 9,81 \cdot 0,85}{2 \cdot 28,06} = 230,462 \text{ Нм}$$

Ниже в соответствующем масштабе строится статическая нагрузочная диаграмма механизма.

Статическая нагрузочная диаграмма представлена на рисунке 2.1.

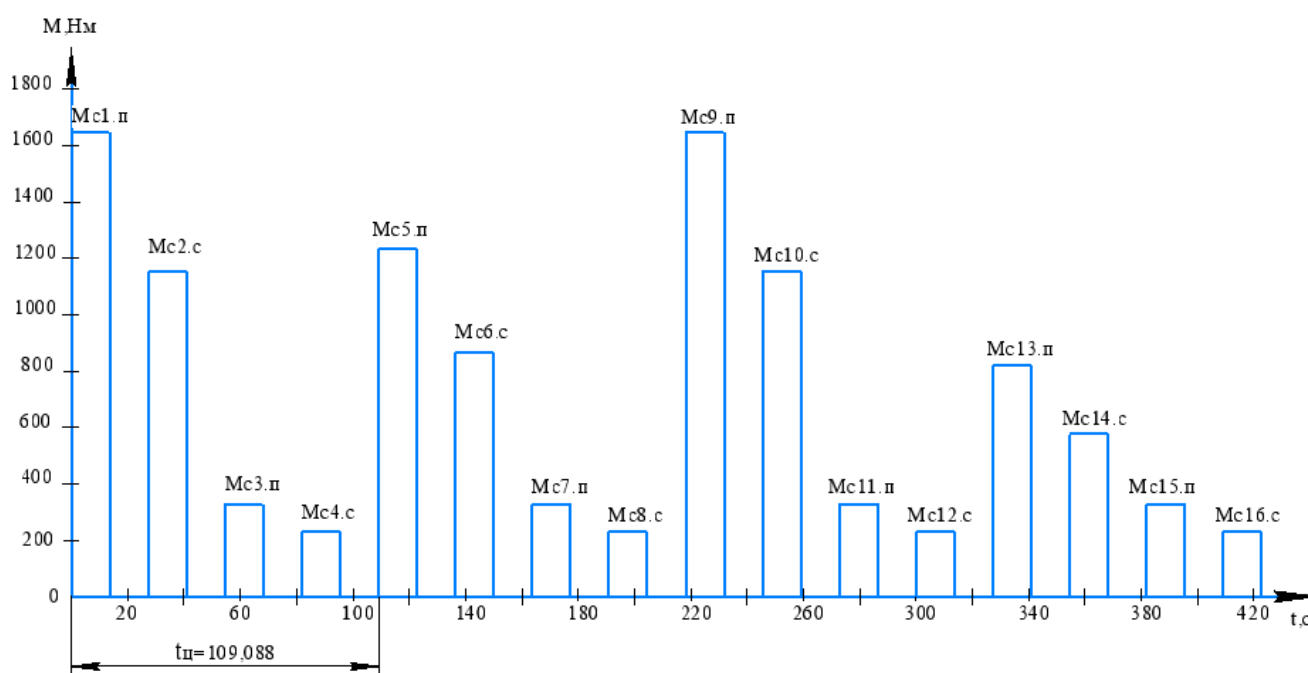


Рисунок 2.1 – Статическая нагрузочная диаграмма механизма подъема

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Мощность электродвигателя с ближайшей стандартной продолжительностью включения ПВ_{ст} выбирается на условии подъема номинального груза по расчетной мощности:

$$P_{расч} = \frac{Q_n \cdot v_n \cdot 10^3}{2 \cdot 102 \cdot \eta} \cdot 1,2 = \frac{16 \cdot 1,1 \cdot 10^3}{2 \cdot 102 \cdot 0,85} \cdot 1,2 = 121,799 \text{ кВт},$$

где Q_n – номинальная грузоподъемность, т;

v_n – скорость подъема, м / с;

1,2 – коэффициент запаса;

2 – число электродвигателей грузовой лебедки.

$$P'_{расч} = P_{расч} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{ст}}} = 121,799 \cdot \sqrt{\frac{51,613}{60}} = 112,966 \text{ кВт}.$$

Условие предварительного выбора двигателя по расчетной мощности с соответствующей ПВ_{ст}:

$$P_n \geq P'_{расч},$$

$$125 \geq 112,966.$$

Предварительно проверяется двигатель по перегрузочной способности

Проверка на перегрузочную способность производится в соответствии с условием:

$$M_{max} \geq 1,25 \cdot M_{сmax},$$

$$7310 \geq 1,25 \cdot 1645,214,$$

$$7310 \geq 2056,518.$$

Где M_{max} – максимальный момент выбранного двигателя, Нм;

$M_{сmax}$ – максимальный статический момент, Нм;

1,25 – коэффициент, учитывающий возможность снижения напряжения питающей сети на 10%.

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

23

Номинальная частота вращения вала двигателя:

$$n_n \geq n_p = \frac{9,55 \cdot v_n \cdot i}{R_\sigma} = \frac{9,55 \cdot 1,1 \cdot 28,06}{0,5} = 589,5406 \text{ об / мин,}$$

$$590 \geq 589,5406.$$

По каталогу выбираем электродвигатель ближайшей большей к $P'_{расч}$ мощности при принятом $ПВ = 60\%$.

Выбираем электродвигатель МТН 713-10. Каталожные данные сводим в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Каталожные данные электродвигателя МТН 713-10

$P_{дв.н}$	Мощность на валу при ПВ=60%	кВт	125
$n_{дв.н}$	Скорость вращения	об/мин	590
$U_{дв.н}$	Номинальное напряжение	В	380
$\cos \varphi_n$		-	0,78
$\eta_{дв.н}$	КПД	%	90,3
$I_{2н}$	Ток ротора	А	242
$U_{2н}$	Напряжение ротора	В	408
M_{max}	Максимальный момент	Нм	7310
$J_{дв}$	Момент инерции ротора	$кг \cdot м^2$	15,0
M_{max} / M_n	Кратность максимального момента	-	2,8
s_k	Критическое скольжение	%	10
$s_{дв.н}$	Номинальное скольжение	%	2

Рассчитаем параметры электродвигателя:

Сопротивление фазы, Ом,

$$Z_\phi = \frac{U_{\phi н}}{I_{1н}},$$

где $I_{1дв.н}$ - номинальный фазный ток статора, А,

Име. № подл.	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

24

$$I_{1\text{дв.н}} \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{\text{фн}} \cdot \eta_{\text{дв.н}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}}} = \frac{125000}{3 \cdot 220 \cdot 0,903 \cdot 0,78} = 268,896 \text{ A.}$$

$$Z_{\phi} = \frac{220}{268,896} = 0,818 \text{ Ом.}$$

$$X_{\mu} = X'_{\mu} \cdot Z_{\phi} = 2,3 \cdot 0,818 = 1,881 \text{ Ом};$$

$$R_1 = R_1^* \cdot Z_{\phi} = 0,036 \cdot 0,818 = 0,0295 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_1^* \cdot Z_{\phi} = 0,14 \cdot 0,818 = 0,115 \text{ Ом};$$

$$R_2' = R_2^* \cdot Z_{\phi} = 0,035 \cdot 0,818 = 0,0286 \text{ Ом};$$

$$X_2' = X_1^* \cdot Z_{\phi} = 0,17 \cdot 0,818 = 0,139 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания, Ом,

$$X_{\kappa} = X_1 + X_2' = 0,115 + 0,139 = 0,254 \text{ Ом.}$$

2.2 Расчет и построение динамической диаграммы механизма.

Проверка выбранного двигателя по мощности

Динамический момент при многоступенчатом пуске электродвигателя изменяется от максимального M_1 до минимального M_2 по следующему закону:

$$M_{\text{д}} = M - M_c = J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt}$$

В расчетах динамический момент при пуске двигателя принимают равным усреднённому:

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2},$$

где $M_1 = \psi_1 \cdot M_n$ – максимальный пусковой момент, Нм;

ψ_1 – кратность максимального пускового момента;

Име. № подл.	Подп. и дата								
Взам.име. №	Име. № дубл.								
Подп. и дата									
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ				Лист
									25

M_n – номинальный момент, $Нм$,

$$M_n = \frac{P_n}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{125 \cdot 10^3}{2 \cdot \pi \cdot 590} = 2023,156 \text{ Нм},$$

где $M_2 = \psi_2 \cdot M_n$ – минимальный пусковой момент (момент переключения), $Нм$;

ψ_2 – кратность минимального пускового момента: $\psi_2 = 1,1 - 1,4$.

$\psi_1 = 2,0$.

Таблица 2.3 – Значение кратности пускового момента

Режим работы	(Л) 1М,2М	(С) 3М,4М	(Т) 5М	(ВТ) 6М
ψ_1	1,25	1,6	2,0	2,5

$$M_1 = \psi_1 \cdot M_n = 2,5 \cdot 2023,156 = 5057,89 \text{ Нм},$$

$$M_2 = \psi_2 \cdot M_n = 1,4 \cdot 2023,156 = 2832,418 \text{ Нм},$$

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{5057,89 + 2832,418}{2} = 3945,154 \text{ Нм}.$$

Суммарный приведенный момент инерции, $кг \cdot м^2$,

$$J_{\Sigma} = k_j \cdot (J_{\delta} + J_M) + \frac{Q_{\delta} \cdot R_{\delta}^2}{4 \cdot i^2 \cdot \eta} + \frac{91 \cdot Q_n \cdot v_n^2}{n_{\deltaв.н}^2 \cdot \eta} =$$

$$= 1,2 \cdot (15 + 1,2) + \frac{16 \cdot 10^3 \cdot 0,5^2}{4 \cdot 28,06^2 \cdot 0,85} + \frac{91 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 1,1^2}{590^2 \cdot 0,85} = 26,888 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

26

Где k_j – коэффициент, учитывающий влияние вращающихся масс барабана и редуктора, $k_j = 1, 2 - 1, 3$;

J_∂ – момент инерции ротора двигателя;

J_m – момент инерции муфты;

$n_{\partialв.н}$ – рабочая частота вращения вала двигателя, *об / мин*;

Q_n – масса груза, *кг*.

Время t_n пуска привода при подъёме, *с*,

$$t_{ni}^n = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_{\partialв.н}}{M_n - M_{ci}}$$

где $\omega_{\partialв.н} = \frac{\pi \cdot n_{\partialв.н}}{30} = \frac{\pi \cdot 590}{30} = 61,785 \text{ рад / с}$.

$$t_{n1}^n = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 - 1645,214} = 0,722 \text{ с,}$$

$$t_{n2}^n = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 - 1233,911} = 0,613 \text{ с,}$$

$$t_{n3}^n = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 - 822,607} = 0,532 \text{ с,}$$

$$t_{n4}^n = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 - 329,0428} = 0,459 \text{ с.}$$

Время t_n пуска привода при спуске груза, *с*,

$$t_{ni}^c = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_{\partialв.н}}{M_n + M_{ci}}$$

Ине. № подл.	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

$$t_{n1}^c = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 + 1152,3079} = 0,326 \text{ с},$$

$$t_{n2}^c = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 + 864,231} = 0,345 \text{ с},$$

$$t_{n3}^n = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 + 576,154} = 0,367 \text{ с},$$

$$t_{n4}^n = \frac{26,888 \cdot 61,785}{3945,154 + 230,462} = 0,398 \text{ с}.$$

Торможения механизма подъема за время t_m , с,

$$t_m = \frac{J_{m\Sigma} \cdot \omega_{ов.н}}{M_m \pm M_{ci}}.$$

Знак "–" соответствует пуску при опускании груза.

"+" – подъем груза.

$J_{m\Sigma}$ – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции при торможении, $кг \cdot м^2$,

$$J_{m\Sigma} = k_j \cdot (J_o + J_m) + \frac{Q_o \cdot R_o^2 \cdot \eta}{4 \cdot i^2} + \frac{91 \cdot Q_n \cdot v_n^2 \cdot \eta}{n_{ов.н}^2} =$$

$$= 1,2 \cdot (15 + 1,2) + \frac{16 \cdot 10^3 \cdot 0,5^2 \cdot 0,85}{4 \cdot 28,06^2} + \frac{91 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 1,1^2 \cdot 0,85}{590^2} = 24,821 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Тормозной момент, Нм,

$$M_m = k_m \cdot M_n,$$

где k_m – коэффициент запаса торможения, принимаемый в зависимости от режима работы.

Инв. № подл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата	<p>БР - 13.03.02.10 ПЗ</p>	Лист
										28	

Значения данного коэффициента приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4 – Значение коэффициента k_m

Режим работы	(Л) 1М,2М	(С) 3М,4М	(Т) 5М	(ВТ) 6М
k_m	1,5	1,75	2,0	2,5

$$M_m = k_m \cdot M_n = 2,5 \cdot 2023,156 = 5057,5 \text{ Нм.}$$

Время электрического торможения механизма при подъёме, с,

$$t_{mi} = \frac{J_{m\Sigma} \cdot \omega_{дв.н}}{M_m + M_{ci}}$$

$$t_{m1}^n = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 + 1645,214} = 0,229 \text{ с,}$$

$$t_{m2}^n = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 + 1233,911} = 0,244 \text{ с,}$$

$$t_{m3}^n = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 + 822,607} = 0,261 \text{ с,}$$

$$t_{m4}^n = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 + 329,0428} = 0,285 \text{ с.}$$

Время электрического торможения механизма при спуске, с,

$$t_{mi} = \frac{J_{m\Sigma} \cdot \omega_{дв.н}}{M_m - M_{ci}}$$

Подп. и дата	
Инв. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Инв. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$t_{m1}^c = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 - 1152,3079} = 0,393 \text{ с},$$

$$t_{m2}^c = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 - 864,231} = 0,366 \text{ с},$$

$$t_{m3}^c = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 - 576,154} = 0,342 \text{ с},$$

$$t_{m4}^c = \frac{24,821 \cdot 61,785}{5057,5 - 230,462} = 0,318 \text{ с}.$$

Уточняем значение $PВ, \%$:

$$PВ_p = \frac{\sum(t_{pi} + t_{ni} + t_m)}{t_y} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{218,176 + 0,722 + 0,613 + 0,532 + 0,459 + 0,326 + 0,345 + 0,367 + 0,398}{204,54 + 224,725} +$$

$$+ \frac{0,229 + 0,244 + 0,261 + 0,285 + 0,393 + 0,366 + 0,342 + 0,318}{204,54 + 224,725} = \frac{224,725}{429,265} = 52,235\%$$

Число циклов в час:

$$N = \frac{3600}{t_y} = \frac{3600}{429,265} = 8.$$

Динамическая диаграмма для участка времени $t_y = 109,088 \text{ с}$ представлена на рисунке 2.2.

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ					Лист
										30
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

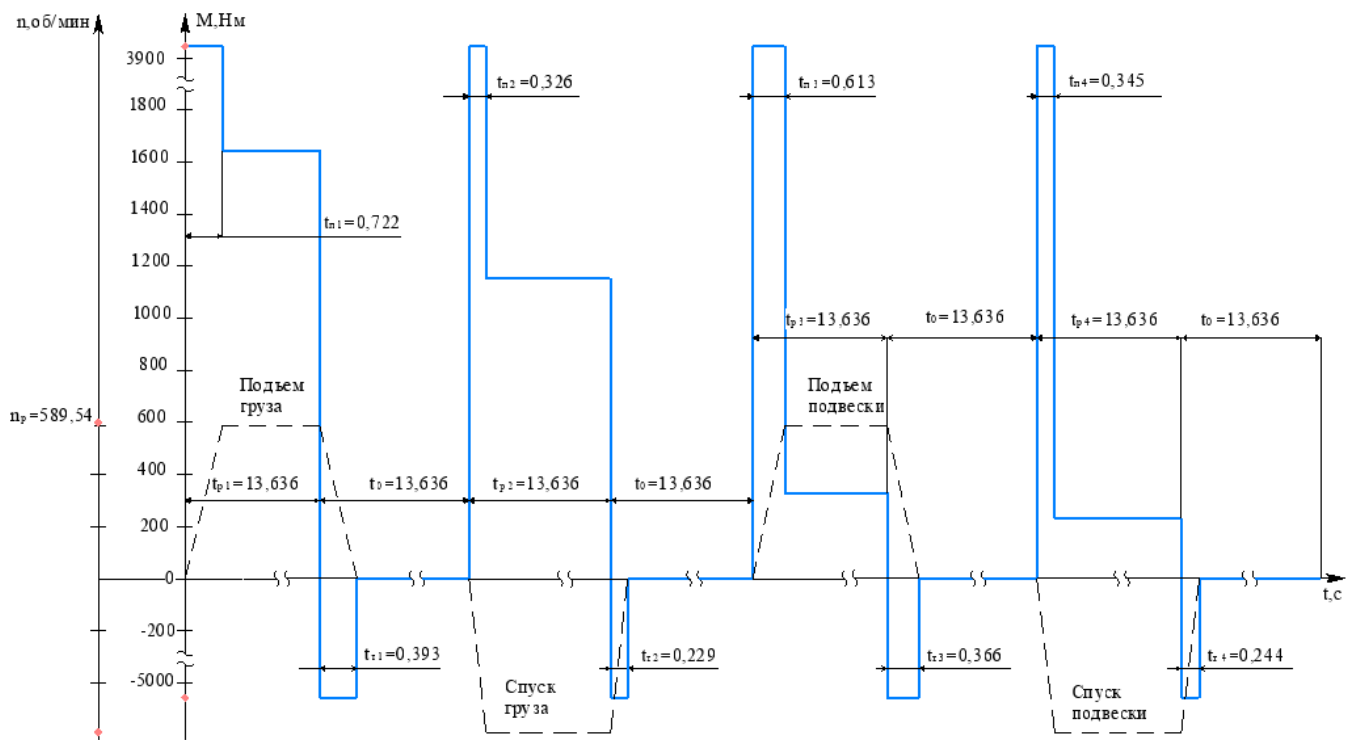


Рисунок 2.2 – Нагрузочная и скоростная диаграммы электродвигателя механизма подъема портального крана на первом участке ($t_y = 109,088$ с)

2.3 Проверочный расчет электродвигателя по мощности

Проверочный расчет электродвигателя по мощности основывается на расчете его нагрева. Для всех видов электродвигателей существует допустимая температура нагрева, зависящая от класса изоляции обмоток и остальных токоведущих частей.

Точный тепловой расчет электрических машин, работающих в нестационарных режимах с изменяющимися условиями охлаждения, крайне затруднен. Поэтому в инженерной практике используются более простые методы расчета. К таким методам относят методы: эквивалентного (действующего) тока (момента), эквивалентной мощности и т.д. При наличии динамической нагрузочной диаграммы и небольшом изменении скорости вращения вала двигателя в статических режимах удобнее использовать метод эквивалентного момента.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

По данным динамической нагрузочной диаграммы определяется эквивалентный момент за полный цикл работы, $M_{\text{э}}$,

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{\sum M_{ni}^2 \cdot t_{ni} + \sum M_{ci}^2 \cdot t_{pi} + \sum M_{mi}^2 \cdot t_{mi}}{\alpha_n \cdot \sum t_{ni} + \sum t_{pi} + \alpha_m \cdot \sum t_{mi}}},$$

где M_{ci} – момент сопротивления на валу двигателя на i – интервале, $H\text{м}$;

t_{ni}, t_{mi} – продолжительность пуска (торможения) на i – интервале, с;

t_{pi} – продолжительность работы на i – интервале, с;

α_n, α_m – коэффициенты, учитывающие ухудшение условий охлаждения двигателя при пусках и торможениях, $\alpha_n = \alpha_m = 0,7$.

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{3945,154^2 \cdot (0,722 + 0,613 + 0,532 + 0,459 + 0,326 + 0,345 + 0,367 + 0,398) + 1645,214^2 \cdot 13,636 + 1233,911^2 \cdot 13,636 + 822,607^2 \cdot 13,636 + 329,0428^2 \cdot 13,636 + 1152,3079^2 \cdot 13,636 + 864,231^2 \cdot 13,636 + 576,154^2 \cdot 13,636 + 236,462^2 \cdot 13,636 + 5057,5^2 \cdot (0,229 + 0,244 + 0,261 + 0,285 + 0,393 + 0,366 + 0,342 + 0,318)}{0,7 \cdot (0,722 + 0,613 + 0,532 + 0,459 + 0,326 + 0,345 + 0,367 + 0,398) + 218,176 + 0,7 \cdot (0,229 + 0,244 + 0,261 + 0,285 + 0,393 + 0,366 + 0,342 + 0,318)}} = 1020,0729 \text{ Нм}$$

Приводим значение $M_{\text{э}}$ к принятому стандартному значению $ПВ = 60\%$.

$$M_{\text{э}}(ПВ = 60\%) = M_{\text{э}}(ПВ = 52,235\%) \cdot \sqrt{\frac{52,235}{60}} = 1020,0729 \cdot \sqrt{\frac{52,235}{60}} = 951,78 \text{ Нм.}$$

Условие правильного выбора двигателя по нагреву:

$$M_{\text{э}} \leq M_n,$$

$$951,78 \leq 2023,156.$$

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам.име. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

32

Эквивалентная мощность, соответствующая $M_{\text{э}}$ и расчетной ПВ, кВт,

$$P_{\text{э}} = \frac{M_{\text{э}} \cdot n_{\text{дв.н}}}{9550} = \frac{951,78 \cdot 590}{9550} = 58,8 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{дв.н}} \geq P_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{см}}}},$$

$$125 \geq 58,8 \cdot \sqrt{\frac{52,235}{60}},$$

$$125 \geq 54,863.$$

Выбранный по мощности двигатель также проверяется по перегрузочной способности с учетом максимально возможных динамических моментов.

Условие проверки по перегрузочной способности:

$$k_v \cdot M_{\text{max}} \geq M_{\text{с. max}} + M_{\text{д}},$$

где k_v – коэффициент, учитывающий снижение напряжение питающей сети. При снижении U на 10% от U_n – номинального для асинхронных двигателей.

$$k_v = 0,9.$$

M_{max} – максимально допустимый момент, Нм;

$M_{\text{с. max}}$ – максимальный статический момент сопротивления на валу двигателя, Нм;

$$a_{\text{вр}} = \frac{n_{\text{дв.н}}}{v_n} \cdot a = \frac{590}{1,1} \cdot 0,2 = 107,273 \text{ м / с}^2,$$

a – допустимое линейное ускорение, м / с^2 ,

Динамический момент, Нм,

Име. № подл.	Подп. и дата				БР - 13.03.02.10 ПЗ	Лист
Име. № дубл.	Подп. и дата					33
Взам. име. №	Име. № дубл.	Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

$$M_{\delta} = \frac{J_{\Sigma} \cdot a_{ep}}{9,55} = \frac{26,888 \cdot 107,273}{9,55} = 302,0269 \text{ Нм.}$$

$$0,9 \cdot 7310 \geq 1645,214 + 302,0269,$$

$$6579 \geq 1947,241.$$

Условие запуска двигателя при подъеме наибольшего груза:

$$k_v \cdot M_{\max} \geq M_1 \geq M_{c.\max} + M_{\delta},$$

$$6579 \geq 5057,89 \geq 1947,241.$$

2.4 Расчет и построение механических характеристик

Для построения механических характеристик воспользуемся следующими формулами.

Формула Клосса:

$$M = \frac{2 \cdot M_{\kappa} \cdot (1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2 \cdot a \cdot s_{\kappa}}.$$

Формула Чекунова:

$$M = \frac{M_{\kappa} \cdot (2 + (s^2 - s_{\kappa}^2) \cdot K_3)}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}},$$

где $M_{\kappa} = \lambda_m \cdot M_n = 2,8 \cdot 2023,156 = 5664,837 \text{ Нм,}$

$$s_{\kappa} = s_n \cdot \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right) = 0,02 \cdot \left(2,8 + \sqrt{2,8^2 - 1} \right) = 0,10831.$$

$$a = \frac{R_1}{R_2} = \frac{0,0295}{0,0286} = 1,0315,$$

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам.име. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	Дата

$$K_3 = \frac{\frac{\lambda_n}{\lambda_m} \cdot \left(\frac{1}{s_k} + s_k \right) - 2}{1 - s_k^2} = \frac{1,9 \cdot \left(\frac{1}{0,10831} + 0,10831 \right) - 2}{1 - 0,10831^2} = 4,39.$$

Формулой Клосса пользуемся только для скольжений $s < s_k$. В области скольжений $1 \geq s > s_k$ используем формулу Чекунова.

График естественной механической характеристики представлен на рисунке 2.3.

Полный код программы в среде Matlab Simulink:

```

for s=-1:0.003:1
if s<0.1
m=s/0.1+0.1/s+0.39;
w=61.785*(1-s);
M=12595.445/m;
plot(M ,w);
grid on;
hold on
else
w=61.785*(1-s);
M=5664.837*(2+(s^2-0.1^2)*4.39)/( s/0.1+0.1/s);
plot(M,w);
grid on;
hold on
xlabel('M, Hm');
ylabel('w, 1/c');
end
w=w
M=M
end

```

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

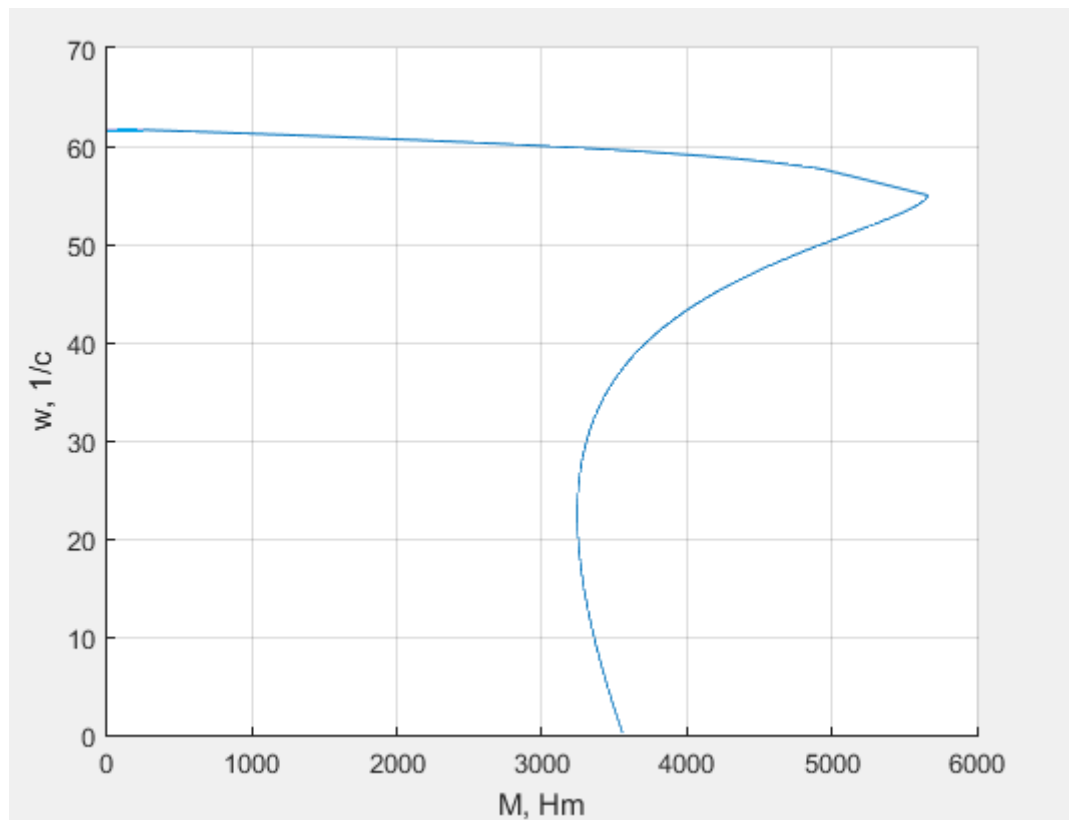


Рисунок 2.3 – Естественная механическая характеристика

2.5 Расчет и построение пусковой диаграммы

Число ступеней пускового сопротивления:

$$Z = \left| \frac{\lg \frac{S_p \cdot M_1}{M_n}}{\lg \lambda} \right| = \left| \frac{\lg \frac{0,02 \cdot 5057,89}{2023,156}}{\lg(1,786)} \right| = \left| \frac{-1,301}{0,252} \right| = 5,16.$$

$$\lambda = \frac{M_1}{M_2} = \frac{5057,89}{2832,4184} = 1,786$$

Принимаем число ступеней – 5 (при контакторном управлении).

Пусковая диаграмма, при $Z = 5$ приведена на рисунке 2.4.

Ине. № подл.	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

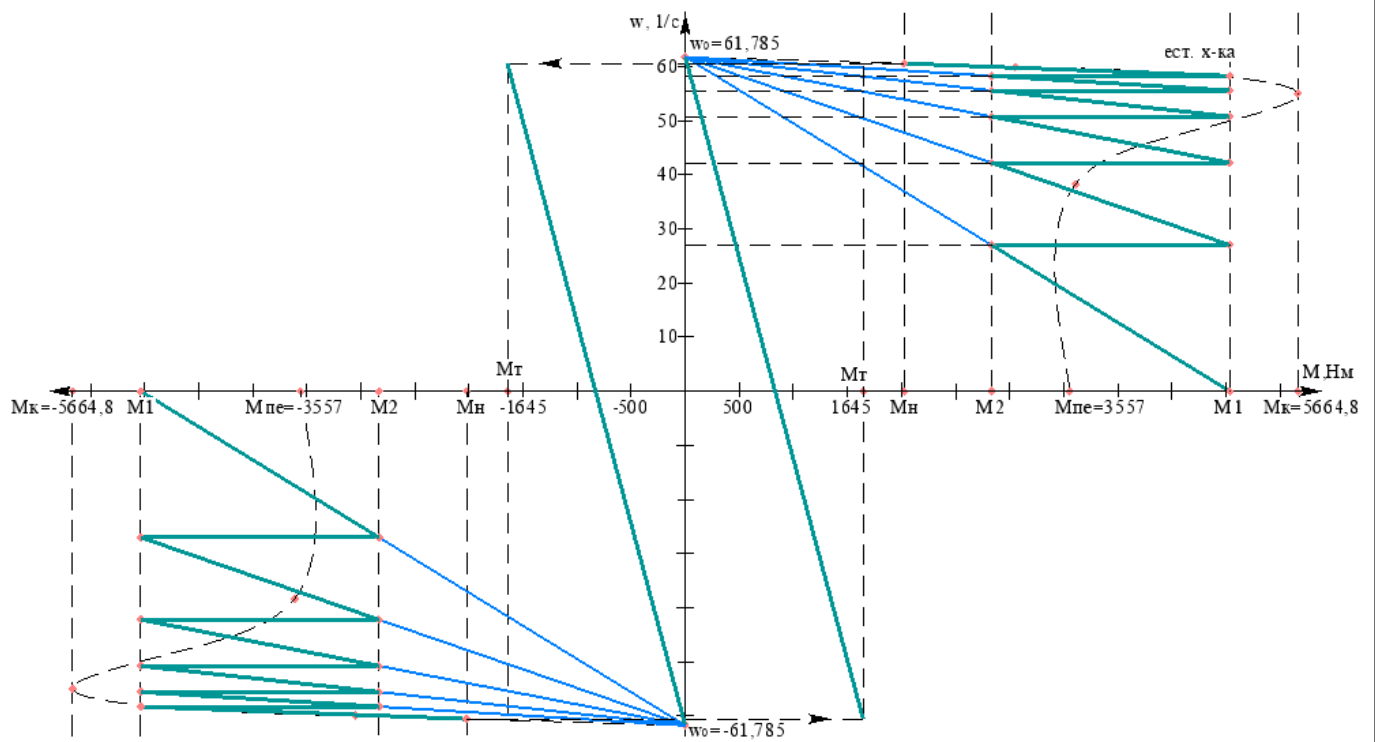


Рисунок 2.4 – Пусковая диаграмма АД

Номинальное сопротивление фазы ротора, Ом,

$$r_{2н} = \frac{E_{2н}}{\sqrt{3} \cdot I_{2н}} = \frac{408}{\sqrt{3} \cdot 242} = 0,973 \text{ Ом};$$

Сопротивление фазы обмотки ротора, Ом,

$$r_a = \frac{s_n \cdot r_{2н}}{100} = \frac{2 \cdot 0,973}{100} = 0,01946 \text{ Ом},$$

где $E_{2н}$ - номинальное напряжение ротора, В,

$I_{2н}$ - номинальный ток ротора, А.

Сопротивления пусковых ступеней двигателя, Ом,

$$R_5 = (r_a + r_p) \cdot \lambda = (0,01946 + 0,01946) \cdot 1,786 = 0,0695 \text{ Ом};$$

$$R_4 = R_5 \cdot \lambda = 0,0695 \cdot 1,786 = 0,124 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_4 \cdot \lambda = 0,124 \cdot 1,786 = 0,221 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R_3 \cdot \lambda = 0,221 \cdot 1,786 = 0,395 \text{ Ом};$$

Подп. и дата	
Ине. № дубл.	
Взам. инв. №	
Подп. и дата	
Ине. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

37

$$R_1 = R_2 \cdot \lambda = 0,395 \cdot 1,786 = 0,705 \text{ Ом.}$$

Сопротивления секций реостата, Ом;

$$r_5 = R_5 - r_a - r_p = 0,0695 - 0,01946 - 0,01946 = 0,03058 \text{ Ом;}$$

$$r_4 = R_4 - R_5 = 0,124 - 0,0695 = 0,0545 \text{ Ом;}$$

$$r_3 = R_3 - R_4 = 0,221 - 0,124 = 0,097 \text{ Ом;}$$

$$r_2 = R_2 - R_3 = 0,395 - 0,221 = 0,174 \text{ Ом;}$$

$$r_1 = R_1 - R_2 = 0,705 - 0,395 = 0,31 \text{ Ом.}$$

2.6 Торможение механизма подъема portalного крана

Торможение подъемного механизма крана электродвигателем в режиме противовключения позволяет снизить износ тормозных колодок механических тормозов, а значит, и повысить надежность крана в целом.

Торможение противовключением асинхронного двигателя осуществляется путем изменения порядка чередования фаз. Для ограничения тока в момент переключения двух фаз обмотки статора, а также для получения заданной скорости торможения в цепь обмотки ротора вводим сопротивление R_1 , состоящее из пускового сопротивления R_1 и ступени r_{np} .

$$R_T = r_a \cdot \frac{2 \cdot (1 - s_p)}{s_H} = 0,01946 \cdot \frac{2 \cdot (1 - 0,02)}{0,02} = 1,9071 \text{ Ом.}$$

$$r_{np} = R_T - R_1 = 1,9071 - 0,705 = 1,2021 \text{ Ом.}$$

Величина начального момента M_T , Нм,

$$M_T = M_c \cdot (k_m - 1) = 1645,214 \cdot (2 - 1) = 1645,214 \text{ Нм.}$$

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. име. №	Име. № дубл.	Подп. и дата	Име. № подл.	БР - 13.03.02.10 ПЗ				Лист
										38
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

2.7 Расчет переходного процесса пуска двигателя

1-я ступень реостата.

Жесткость механической характеристики:

$$\beta_1 = \left| \frac{M_1 - M_2}{\omega_2 - \omega_1} \right| = \left| \frac{5057,89 - 2832,418}{27,03 - 0} \right| = 82,333.$$

Постоянная времени:

$$T_{M1} = \frac{J_{\Sigma}}{|\beta_1|} = \frac{26,888}{82,333} = 0,327 \text{ с.}$$

Время переходного процесса:

$$t_{n1} = T_{M1} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} \right) = 0,327 \cdot \ln \left(\frac{5057,89 - 1645,214}{2832,418 - 1645,214} \right) = 0,345 \text{ с.}$$

Уравнения переходных процессов по скорости и моменту соответственно:

$$\omega_1 = \omega_{уст1} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{M1}}} \right) + \omega_{нач1} \cdot e^{\frac{-t}{T_{M1}}} = 27,03 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{0,327}} \right) + 0 \cdot e^{\frac{-t}{0,327}};$$

$$M_{1(t)} = M_c \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{M1}}} \right) + M_1 \cdot e^{\frac{-t}{T_{M1}}} = 1645,214 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{0,327}} \right) + 5057,89 \cdot e^{\frac{-t}{0,327}}.$$

Расчет п.п. на первой ступени приведен в таблице 2.5.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

Таблица 2.5 – Результаты расчетов переходных процессов на первой ступени

t, с	0	0,05	0,1	0,2	0,3	0,345
M, Нм	5057,89	4574,01	4158,74	3496,492	3008,729	2833,427
ω , рад/с	0	3,165	5,962	10,617	14,25	15,525

2-я ступень реостата.

Жесткость механической характеристики:

$$\beta_2 = \left| \frac{M_1 - M_2}{\omega_2 - \omega_1} \right| = \left| \frac{5057,89 - 2832,418}{42,235 - 27,03} \right| = 146,364.$$

Постоянная времени:

$$T_{M2} = \frac{J_{\Sigma}}{|\beta_2|} = \frac{26,888}{146,364} = 0,184 \text{ с.}$$

Время переходного процесса:

$$t_{n2} = T_{M2} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} \right) = 0,184 \cdot \ln \left(\frac{5057,89 - 1645,214}{2832,418 - 1645,214} \right) = 0,194 \text{ с.}$$

Уравнения переходных процессов по скорости и моменту соответственно:

$$\omega_2 = \omega_{ycm2} \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{M2}}} \right) + \omega_{нач2} \cdot e^{\frac{-t}{T_{M2}}} = 42,235 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{0,184}} \right) + 27,03 \cdot e^{\frac{-t}{0,184}};$$

$$M_{2(t)} = M_c \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{T_{M2}}} \right) + M_1 \cdot e^{\frac{-t}{T_{M2}}} = 1645,214 \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{0,184}} \right) + 5057,89 \cdot e^{\frac{-t}{0,184}}.$$

Расчет п.п. на второй ступени приведен в таблице 2.6.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам.име. №	Име.№ дубл.	Подп. и дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ					Лист
										40
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата						

Таблица 2.6 – Результаты расчетов переходных процессов на второй ступени

t, с	0	0,05	0,1	0,15	0,18	0,194
M, Нм	5057,89	4245,854	3627,04	3155,47	2928,259	2834,257
ω, рад/с	27,03	30,648	33,405	35,506	36,519	36,937

3-я ступень реостата.

Жесткость механической характеристики:

$$\beta_3 = \left| \frac{M_1 - M_2}{\omega_2 - \omega_1} \right| = \left| \frac{5057,89 - 2832,418}{50,788 - 42,235} \right| = 260,198.$$

Постоянная времени:

$$T_{M3} = \frac{J_{\Sigma}}{|\beta_3|} = \frac{26,888}{260,198} = 0,1033 \text{ с.}$$

Время переходного процесса:

$$t_{n3} = T_{M3} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} \right) = 0,1033 \cdot \ln \left(\frac{5057,89 - 1645,214}{2832,418 - 1645,214} \right) = 0,1091 \text{ с.}$$

Уравнения переходных процессов по скорости и моменту соответственно:

$$\omega_3 = \omega_{уст3} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M3}}} \right) + \omega_{нач3} \cdot e^{-\frac{t}{T_{M3}}} = 50,788 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,1033}} \right) + 42,235 \cdot e^{-\frac{t}{0,1033}};$$

$$M_{3(t)} = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M3}}} \right) + M_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{M3}}} = 1645,214 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,1033}} \right) + 5057,89 \cdot e^{-\frac{t}{0,1033}}.$$

Расчет п.п. на третьей ступени приведен в таблице 2.7.

Подп. и дата	
Име. № дубл.	
Взам. име. №	
Подп. и дата	
Име. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Таблица 2.7 – Результаты расчетов переходных процессов на третьей ступени

t, с	0	0,01	0,05	0,1	0,1091
M, Нм	5057,89	4743,0113	3748,434	2941,421	2832,12
ω , рад/с	42,235	43,0242	45,517	47,539	47,813

4-я ступень реостата.

Жесткость механической характеристики:

$$\beta_4 = \left| \frac{M_1 - M_2}{\omega_2 - \omega_1} \right| = \left| \frac{5057,89 - 2832,4183}{55,598 - 50,788} \right| = 462,676.$$

Постоянная времени:

$$T_{M4} = \frac{J_{\Sigma}}{|\beta_4|} = \frac{26,888}{462,676} = 0,0581 \text{ с.}$$

Время переходного процесса:

$$t_{n4} = T_{M4} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} \right) = 0,0581 \cdot \ln \left(\frac{5057,89 - 1645,214}{2832,418 - 1645,214} \right) = 0,0613 \text{ с.}$$

Уравнения переходных процессов по скорости и моменту соответственно:

$$\omega_4 = \omega_{уст4} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M4}}} \right) + \omega_{нач4} \cdot e^{-\frac{t}{T_{M4}}} = 55,598 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,0581}} \right) + 50,788 \cdot e^{-\frac{t}{0,0581}};$$

$$M_{4(t)} = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M4}}} \right) + M_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{M4}}} = 1645,214 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,0581}} \right) + 5057,89 \cdot e^{-\frac{t}{0,0581}}.$$

Расчет п.п. на четвертой ступени приведен в таблице 2.8.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам.име. №	Име. № дубл.	Подп. и дата	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ

Таблица 2.8 – Результаты расчетов переходных процессов на четвертой ступени

t, с	0	0,01	0,02	0,04	0,05	0,0613
M, Нм	5057,89	4518,28	4063,99	3359,555	3088,484	2833,39
ω, рад/с	50,788	51,549	52,189	53,182	53,564	53,923

5-я ступень реостата.

Жесткость механической характеристики:

$$\beta_5 = \left| \frac{M_1 - M_2}{\omega_2 - \omega_1} \right| = \left| \frac{5057,89 - 2832,418}{58,3 - 55,598} \right| = 823,639$$

Постоянная времени:

$$T_{M5} = \frac{J_{\Sigma}}{|\beta_5|} = \frac{26,888}{823,639} = 0,0326 \text{ с.}$$

Время переходного процесса:

$$t_{n5} = T_{M5} \cdot \ln \left(\frac{M_1 - M_c}{M_2 - M_c} \right) = 0,0326 \cdot \ln \left(\frac{5057,89 - 1645,214}{2832,418 - 1645,214} \right) = 0,0344 \text{ с.}$$

Уравнения переходных процессов по скорости и моменту соответственно:

$$\omega_5 = \omega_{уст5} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M5}}} \right) + \omega_{нач5} \cdot e^{-\frac{t}{T_{M5}}} = 58,3 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,0326}} \right) + 55,598 \cdot e^{-\frac{t}{0,0326}};$$

$$M_{5(t)} = M_c \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{M5}}} \right) + M_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_{M5}}} = 1645,214 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{0,0326}} \right) + 5057,89 \cdot e^{-\frac{t}{0,0326}}.$$

Расчет п.п. на пятой ступени приведен в таблице 2.9.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Име. № дубл.	Подп. и дата	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ

Таблица 2.9 – Результаты расчетов переходных процессов на пятой ступени

t, с	0	0,01	0,015	0,02	0,025	0,0344
M, Нм	5057,89	4156,383	3799,32	3493,022	3230,279	2833,227
ω , рад/с	55,598	56,312	56,595	56,837	57,045	57,359

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам.име. №	Име.№ дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

44

2.8 Моделирование базовой системы в среде Matlab Simulink

На рисунке 2.5 представлена модель асинхронного двигателя с фазным ротором в среде Matlab Simulink.

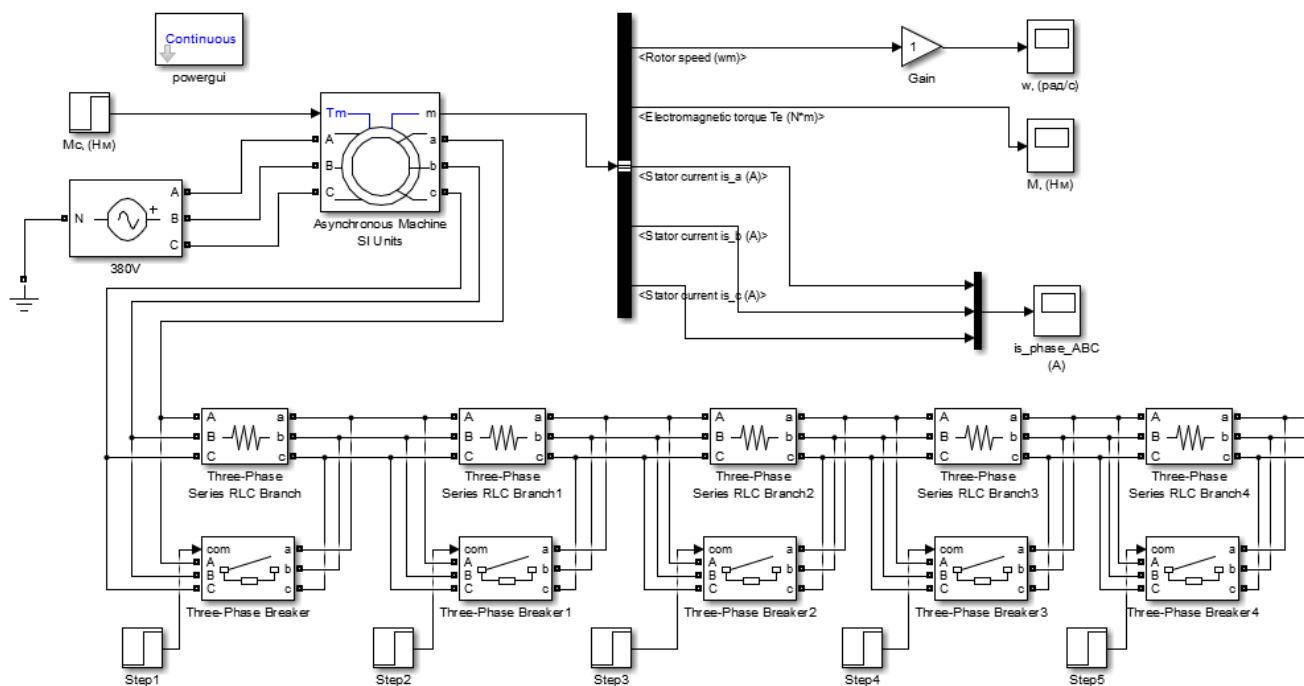


Рисунок 2.5 – Модель асинхронного двигателя с фазным ротором

Осуществим моделирование и получим графики переходных процессов, представленных на рисунке: 2.6.

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	

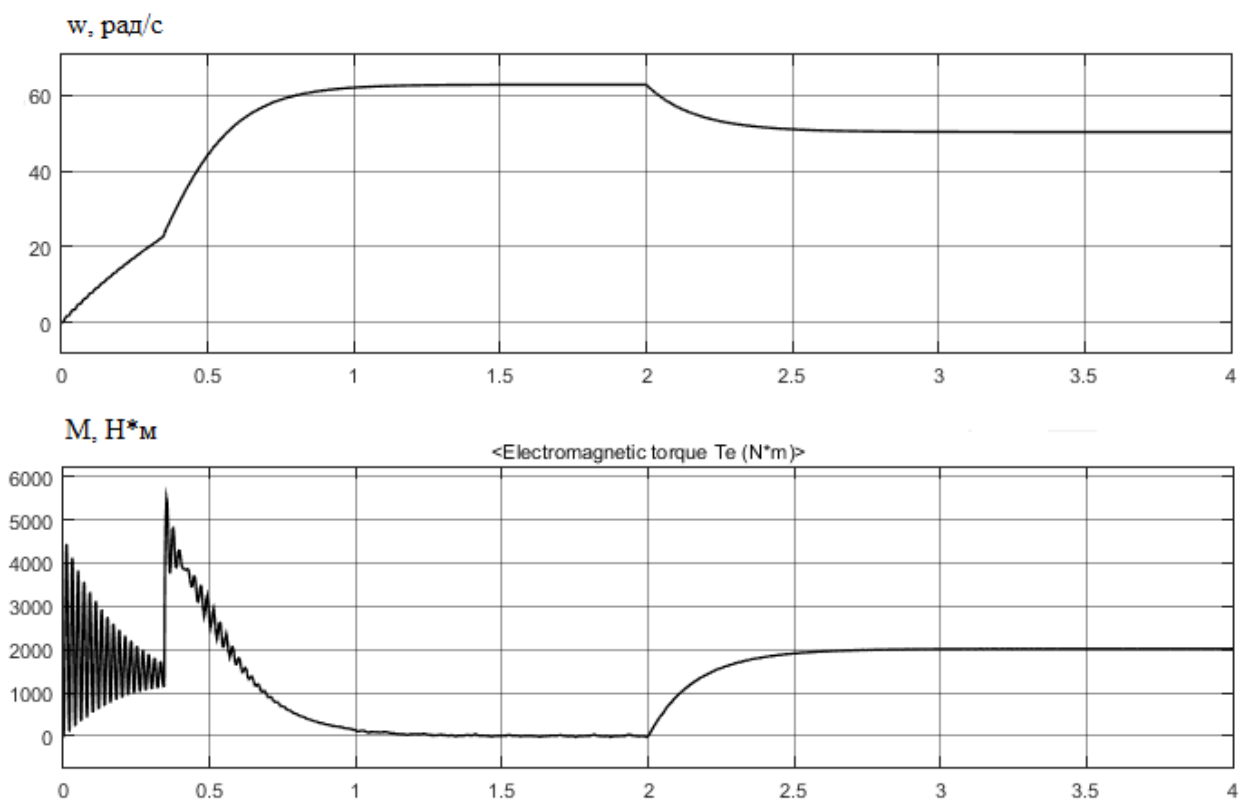


Рисунок 2.6 – Переходные процессы скорости и момента для АД с фазным ротором

2.9 Оценка показателей качества базовой системы

Проведем анализ переходного процесса угловой скорости вращения (рис. 2.6).

- Максимальное значение угловой скорости 62,81 с⁻¹;
- установившееся значение угловой скорости 50,38 с⁻¹;
- динамическая ошибка угловой скорости 14 с⁻¹;
- статическая ошибка угловой скорости

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{\omega_{зад} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{61,785 - 50,38}{50,38} \cdot 100\% = 22,6\%;$$

- перерегулирование скорости

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{62,81 - 50,38}{50,38} \cdot 100\% = 24,67\%;$$

- время регулирования скорости $t_p = 3 \text{ с}$;
- колебательность скорости

$$\mu = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{уст}} = \frac{62,81}{50,38} = 1,247.$$

Проанализируем переходной процесс момента на валу двигателя (рисунок 2.6).

- Максимальное значение момента на валу двигателя 5504 с^{-1} ;
- установившееся значение момента на валу двигателя 2014 с^{-1} ;
- динамическая ошибка момента на валу двигателя 4746 с^{-1} ;
- статическая ошибка момента на валу двигателя

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{M_{зад} - M_{уст}}{M_{уст}} \cdot 100\% = \frac{2023,156 - 2014}{2014} \cdot 100\% = 0,45\%;$$

- перерегулирование

$$\sigma = \frac{M_{\max} - M_{уст}}{M_{уст}} \cdot 100\% = \frac{5504 - 2014}{2014} \cdot 100\% = 173,3\%;$$

- время регулирования скорости $t_p = 3 \text{ с}$;
- колебательность момента на валу двигателя

$$\mu = \frac{M_{\max}}{M_{уст}} = \frac{5504}{2014} = 2,733.$$

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Для полного выполнения рабочего процесса, электропривод портального крана должен соответствовать следующим требованиям:

- кратность перегрузки до $\lambda = 3$;
- перерегулирования в $\sigma = 3\%$;
- время регулирования в $t_p = 1$ с;
- статическая просадка по скорости $\Delta\omega_{ст} = 3\%$;
- динамическая просадка по скорости $\Delta\omega_{д} = 7\%$.

Расчитанные показатели качества указывают на то, что система не удовлетворяет необходимым требованиям. Следовательно, необходима модернизация данной системы.

Ине. № подл.	
Подп. и дата	
Взам. инв. №	
Ине. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

3 Модернизация системы автоматизации порталного крана

3.1 Обоснование принципа модернизации

На существующем кране «Кировец 16/20» в настоящее время на установленных механизмах используются приводные асинхронные электродвигатели с реостатным регулированием скорости, а работа оборудования реализована на релейно-контакторных элементах.

К недостаткам базового электрооборудования относится:

- тяжёлый режим работы контакторов в цепи ротора, в связи с чем, уменьшается срок их работы. Это является причиной простоев крана и больших затрат на запчасти;
- большой объём применяемой низковольтной коммутационной аппаратуры и частые простои из-за её ненадёжности;
- чувствительность системы к просадкам напряжения, зачастую имеющим место в портовых сетях;
- громоздкие резисторы и необходимость отвода выделяемого ими тепла;
- невозможность плавного регулирования скорости в широком диапазоне и связанные с этим повышенные динамические нагрузки на металлоконструкцию крана, а также износ механического оборудования (редукторов и др.);
- отсутствие системы сбора статистических данных о возникающих отказах, их количестве и причинах.

Исходя из вышеперечисленных недостатков, принимаем решение о замене базовой системы на асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и преобразователем частоты.

Применение частотно – регулируемого асинхронного электропривода в механизмах подъемно – транспортного оборудования, является эффективным методом повышения технологичности производства.

Использование таких приводов позволяет:

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

- значительно до (40%) снизить энергопотребление крана, что особенно актуально при постоянно растущих тарифах на энергоносители;
- осуществить разгон и торможение двигателя плавно с варьированием времени разгона, и торможения от долей секунды до десятков минут;
- повысить комфортные показатели при движении крана и долговечность механического оборудования, благодаря плавности переходных процессов;
- защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, от обрывов в цепях питания двигателей;
- изменять скорости и ускорения движения механизмов крана, применительно к конкретным технологическим задачам.

В современных электроприводах, для управления моментом и частотой вращения применяются два основных метода управления:

- скалярное управление;
- векторное управление.

При скалярном управлении, в качестве независимого воздействия выступает частота, а напряжение на определенной частоте определяется типом механических характеристик, а также значениями критического и пускового моментов. Скалярное управление обеспечивает постоянную перегрузочную способность асинхронного двигателя независимо от частоты напряжения. Этот метод предусматривает возможность одновременного управления группой электродвигателей. Скалярный метод управления позволяет осуществлять легкую регулировку, даже при использовании заводских настроек.

Скалярное управление асинхронным двигателем довольно просто реализовать, но имеется ряд существенных недостатков.

- если на валу не установлен скорости, то невозможно регулировать значение частоты вращения вала, так как она зависит от нагрузки, действующей на привод. (этот недостаток решается установкой датчика скорости);
- отсутствие возможности регулирования значения момента на валу двигателя.

Име. № подл.	
Подп. и дата	
Взам.име. №	
Име.№ дубл.	
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Векторное управление используется, когда во время работы нагрузка может изменяться с одной и той же частотой, т.е. нет четкой зависимости между моментом нагрузки и скоростью вращения, а также в случаях, когда необходимо получить расширенный диапазон регулирования частоты при номинальных моментах, например, 0...50 Гц для крутящего момента 100% или даже временно 150 – 200% $M_{ном}$, это позволяет значительно увеличить диапазон регулирования, точность регулирования, а также увеличить скорость работы электропривода. Этот метод обеспечивает непосредственное управление вращающим моментом электродвигателя. Вращающий момент определяется током статора, который создает возбуждающее магнитное поле. При прямом управлении крутящим моментом необходимо изменить, помимо амплитуды и фазу тока статора, т.е. вектор тока. Отсюда и термин «векторное управление». Векторный метод управления преобразователем частоты позволяет осуществлять гораздо более качественное управление электродвигателем, чем скалярный.

Векторный метод реализуется посредством сложных вычислений в реальном времени, выполняемых процессором преобразователя на основе информации о выходном токе, частоте и напряжении.

Далее производим выбор двигателя для модернизированной системы, построение моделей частотно – управляемого электропривода (для сравнительного анализа переходных процессов) с определением наиболее подходящей системы.

Име. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

3.2 Выбор электродвигателя

Для модернизированной системы выбираем асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором фирмы siemens. Данное решение было сделано на основании выбора системы управления ПЧ – АД.

Данная система требует электродвигателя с короткозамкнутым ротором, который менее требователен к условиям работы, проще в исполнении, дешевле в изготовлении.

Исходные данные двигателя представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Каталожные данные электродвигателя 1LG4315

$P_{дв.н}$	Номинальная мощность	кВт	160
$n_{дв.н}$	Скорость вращения	об / мин	739
$U_{дв.н}$	Номинальное напряжение	В	380
$\cos \varphi_n$		-	0,82
$\eta_{дв.н}$	КПД	%	94,9
$I_{2н}$	Ток ротора	А	296
I_n / I_n	Кратность пускового тока	-	6,0
$J_{дв}$	Момент инерции ротора	кг · м ²	6,0
M_{max} / M_n	Кратность максимального момента	-	2,3
M_n / M_n	Кратность пускового момента	-	2,1
$s_{дв.н}$	Номинальное скольжение	%	1,5

Условие предварительности выбора двигателя по мощности с соответствующей ПВ_{ст}:

$$P_n \geq P'_{расч},$$

$$160 \geq 112,966.$$

Предварительно проверяется двигатель по перегрузочной способности

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	
Име. № дубл.	
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

52

Проверка на перегрузочную способность производится в соответствии с условием:

$$M_{\max} \geq 1,25 \cdot M_{c \max},$$

$$4700 \geq 1,25 \cdot 1645,214,$$

$$4700 \geq 2056,518.$$

Где M_{\max} – максимальный момент выбранного двигателя, *Нм*;

$M_{c \max}$ – максимальный статический момент, *Нм*;

1,25 – коэффициент, учитывающий возможность снижения напряжения питающей сети на 10%.

Номинальная частота вращения вала двигателя выбирается из условия:

$$n_n \geq n_p = \frac{9,55 \cdot v_n \cdot i}{R_o} = \frac{9,55 \cdot 1,1 \cdot 28,06}{0,5} = 589,5406 \text{ об / мин},$$

$$739 \geq 589,5406.$$

Номинальный момент, *Нм*,

$$M_n = \frac{P_n}{\frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}} = \frac{160 \cdot 10^3}{\frac{2 \cdot \pi \cdot 739}{60}} = 2067,5067 \text{ Нм},$$

$$M_1 = \psi_1 \cdot M_n = 2,5 \cdot 2067,5067 = 5168,767 \text{ Нм},$$

$$M_2 = \psi_2 \cdot M_{c \max} = 1,4 \cdot 2067,5067 = 2894,5094 \text{ Нм},$$

$$M_n = \frac{M_1 + M_2}{2} = \frac{5168,767 + 2894,5094}{2} = 4031,638 \text{ Нм}.$$

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. име. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

53

Суммарный приведенный момент инерции, $кг \cdot м^2$,

$$J_{\Sigma} = k_j \cdot (J_{\partial} + J_{м}) + \frac{Q_{\partial} \cdot R_{\partial}^2}{4 \cdot i^2 \cdot \eta} + \frac{91 \cdot Q_{н} \cdot v_{н}^2}{n_{об.н}^2 \cdot \eta} =$$

$$= 1,2 \cdot (6 + 1,2) + \frac{16 \cdot 10^3 \cdot 0,5^2}{4 \cdot 28,06^2 \cdot 0,85} + \frac{91 \cdot 16 \cdot 10^3 \cdot 1,1^2}{739^2 \cdot 0,85} = 13,929 \text{ кг} \cdot м^2.$$

Где k_j – коэффициент, учитывающий влияние вращающихся масс барабана и редуктора, $k_j = 1,2 - 1,3$;

J_{∂} – момент инерции ротора двигателя;

$J_{м}$ – момент инерции муфты;

$n_{об.н}$ – рабочая частота вращения вала двигателя, *об / мин*;

$Q_{н}$ – масса груза, *кг*.

Тормозной момент, *Нм*,

$$M_m = k_m \cdot M_n = 2,5 \cdot 2067,5067 = 5168,767 \text{ Нм}.$$

$$M_{\partial} = \sqrt{\frac{\sum M_{ni}^2 \cdot t_{ni} + \sum M_{ci}^2 \cdot t_{pi} + \sum M_{mi}^2 \cdot t_{mi}}{\alpha_n \cdot \sum t_{ni} + \sum t_{pi} + \alpha_m \cdot \sum t_{mi}}},$$

$$M_{\partial} = \sqrt{\frac{4031,638^2 \cdot (0,722 + 0,613 + 0,532 + 0,459 + 0,326 + 0,345 + 0,367 + 0,398) +$$

$$+ 1645,214^2 \cdot 13,636 + 1233,911^2 \cdot 13,636 + 822,607^2 \cdot 13,636 + 329,0428^2 \cdot 13,636 +$$

$$+ 1152,3079^2 \cdot 13,636 + 864,231^2 \cdot 13,636 + 576,154^2 \cdot 13,636 + 236,462^2 \cdot 13,636 +$$

$$+ 5168,767^2 \cdot (0,229 + 0,244 + 0,261 + 0,285 + 0,393 + 0,366 + 0,342 + 0,318)}{0,7 \cdot (0,722 + 0,613 + 0,532 + 0,459 + 0,326 + 0,345 + 0,367 + 0,398) +$$

$$+ 218,176 + 0,7 \cdot (0,229 + 0,244 + 0,261 + 0,285 + 0,393 + 0,366 + 0,342 + 0,318)} = 1032,684 \text{ Нм}$$

Приводим значение M_{∂} к принятому стандартному значению $ПВ = 60\%$.

Ине. № подл.	Подп. и дата				
Взам. ине. №	Ине. № дубл.				
Подп. и дата					
Ине. № подл.					
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	
БР - 13.03.02.10 ПЗ					Лист
					54

$$M_{\text{э}}(ПВ = 60\%) = M_{\text{э}}(ПВ = 52,235\%) \cdot \sqrt{\frac{52,235}{60}} = 1032,684 \cdot \sqrt{\frac{52,235}{60}} = 963,546 \text{ Нм.}$$

Условие правильного выбора двигателя по нагреву:

$$M_{\text{э}} \leq M_{\text{н}},$$

$$963,546 \leq 2067,5067.$$

Эквивалентная мощность, соответствующая $M_{\text{э}}$ и расчетной ПВ, кВт,,

$$P_{\text{э}} = \frac{M_{\text{э}} \cdot n_{\text{дв.н}}}{9550} = \frac{963,546 \cdot 739}{9550} = 74,561 \text{ кВт.}$$

$$P_{\text{дв.н}} \geq P_{\text{э}} \cdot \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ст}}}},$$

$$160 \geq 74,561 \cdot \sqrt{\frac{52,235}{60}},$$

$$160 \geq 69,569,$$

Условие проверки по перегрузочной способности:

$$k_{\text{в}} \cdot M_{\text{max}} \geq M_{\text{с. max}} + M_{\text{д}},$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент, учитывающий снижение напряжение питающей сети. При снижении U на 10% от $U_{\text{н}}$ – номинального для асинхронных двигателей.

$$k_{\text{в}} = 0,9.$$

M_{max} – максимально допустимый момент, Нм;

$M_{\text{с. max}}$ – максимальный статический момент сопротивления на валу двигателя, Нм;

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист
55

$$a_{\text{вп}} = \frac{n_{\text{дв.н.}}}{v_{\text{н}}} \cdot a = \frac{739}{1,1} \cdot 0,2 = 134,364 \text{ м / с}^2,$$

a - допустимое линейное ускорение, м / с^2 .

Динамический момент, Нм ,

$$M_{\text{д}} = \frac{J_{\Sigma} \cdot a_{\text{вп}}}{9,55} = \frac{13,929 \cdot 134,364}{9,55} = 195,974 \text{ Нм.}$$

$$0,9 \cdot 7310 \geq 1645,214 + 195,974,$$

$$6579 \geq 1841,188.$$

Условие успешного запуска двигателя при Подъёме наибольшего груза:

$$k_v \cdot M_{\text{max}} \geq M_1 \geq M_{\text{с. max}} + M_{\text{д}},$$

$$6579 \geq 5168,767 \geq 1841,188.$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

56

3.3 Моделирование частотно – управляемого электропривода в среде Matlab Simulink

На рис. 3.1 представлена модель системы ПЧ – АД с $U / f = const$ управлением.

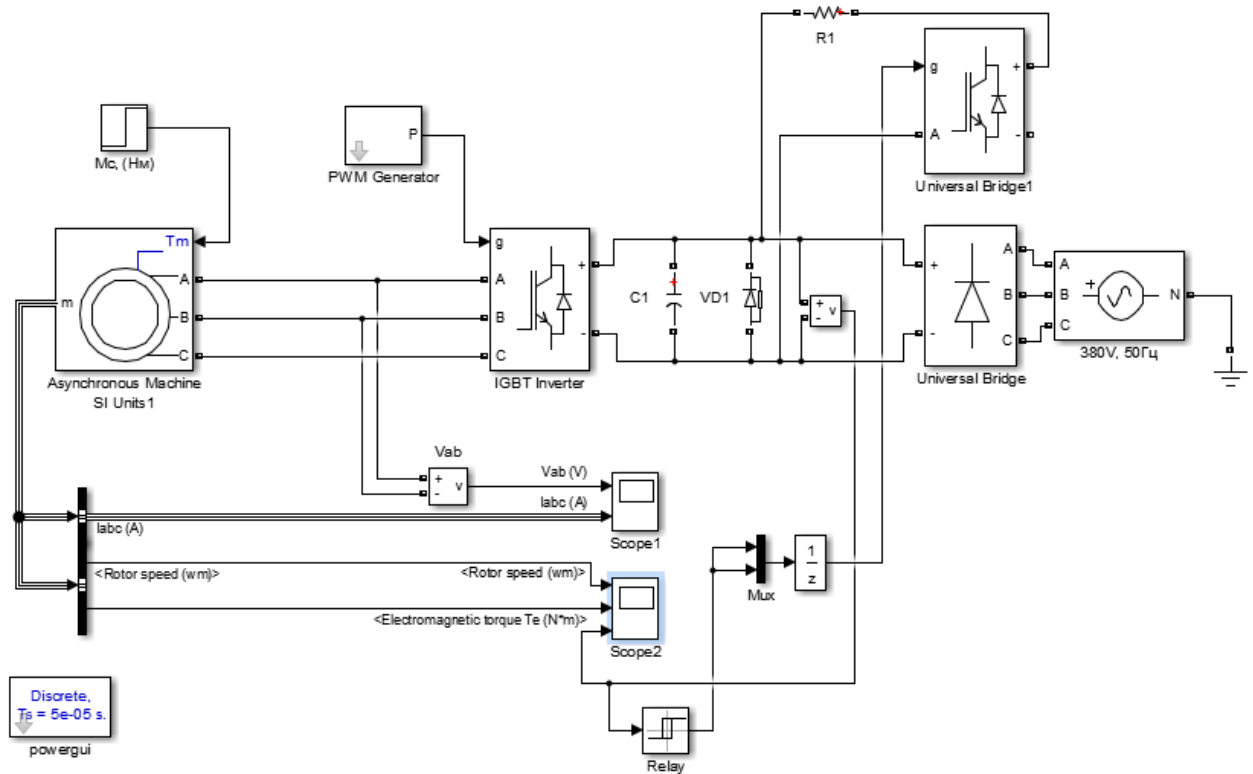


Рисунок 3.1 – Модель системы ПЧ – АД с $U / f = const$ управлением

Данная модель содержит следующие основные блоки:

- 1) Неуправляемый полупроводниковый усилитель (Universal Bridge);
- 2) силовая часть преобразователя частоты (IGBT Inverter);
- 3) система управления ПЧ (PWM Generator);
- 4) АД с короткозамкнутым ротором (Asynchronous Machine);
- 5) нагрузка АД с короткозамкнутым ротором, M_c (блок Step);
- 6) измерительные приборы для измерения угловой скорости, момента, напряжения на статоре АД (блоки Scope);
- 7) блок Machines Measurement Demux применяется для выделения измеряемых переменных АД из вектора m .

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Расчетные параметры, необходимые для моделирования АД:

$$R_1 = 0,013 \text{ Ом}; R_2' = 0,0534 \text{ Ом};$$

$$L_1 = L_2' = 0,0006 \text{ Гн}; L_m = L_1' - L_1 = 0,0112 \text{ Гн};$$

$$L_1' = L_m + L_1 = \frac{U_{\text{дн}} / \sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_n \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{4 \cdot \pi \cdot f \cdot M_{\kappa} \cdot s_n}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{лн}} \cdot p \cdot s_{\text{кр}}}} =$$

$$= \frac{380 / 1,732}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 312,365 \cdot \sqrt{1 - 0,82^2} - \frac{4 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4962 \cdot 0,015}{1,723 \cdot 380 \cdot 4 \cdot 0,0656}} = 0,0117 \text{ Гн}.$$

Результаты моделирования переходных процессов скорости и электромагнитного момента представлены на рис. 3.2.

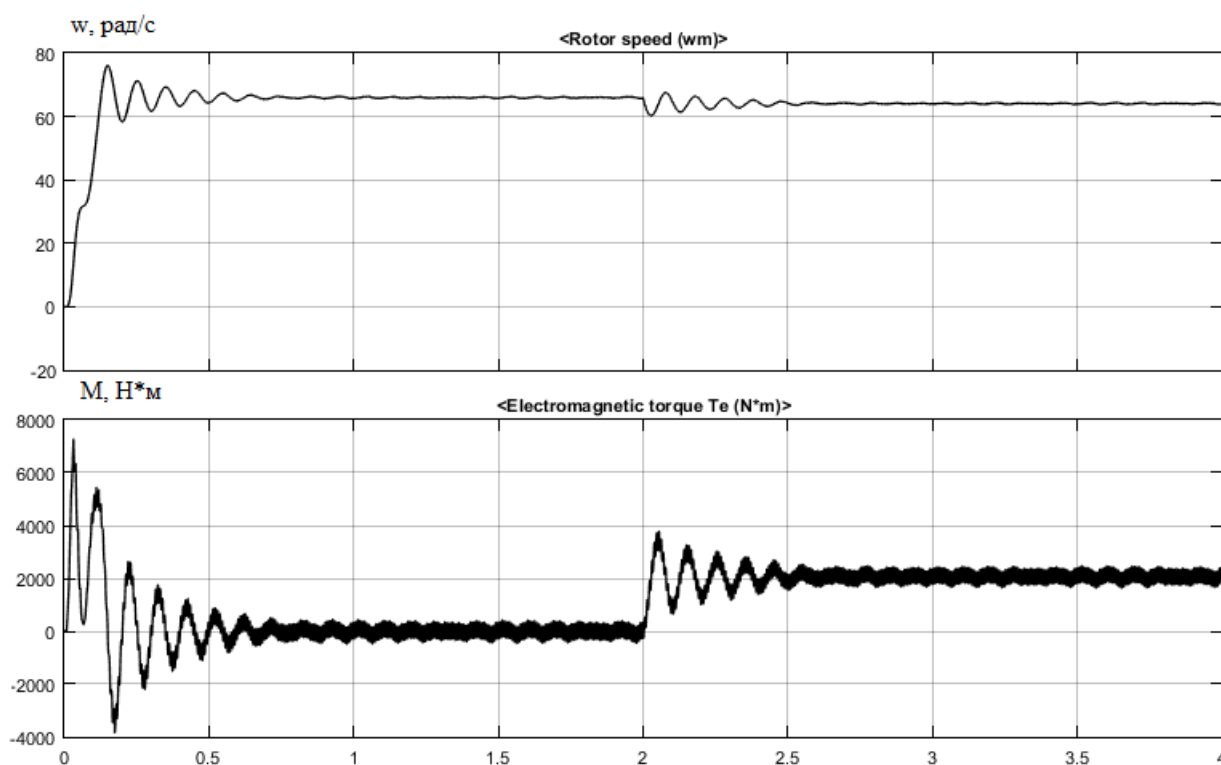


Рисунок 3.2 – Переходные процессы скорости и момента при скалярном управлении

Подп. и дата
Име. № дубл.
Взам. име. №
Подп. и дата
Име. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

3.4 Моделирование электропривода с векторным управлением в среде Matlab Simulink. Сравнение векторного и скалярного управления

На рис. 3.3 представлена модель системы ПЧ – АД с векторным управлением.

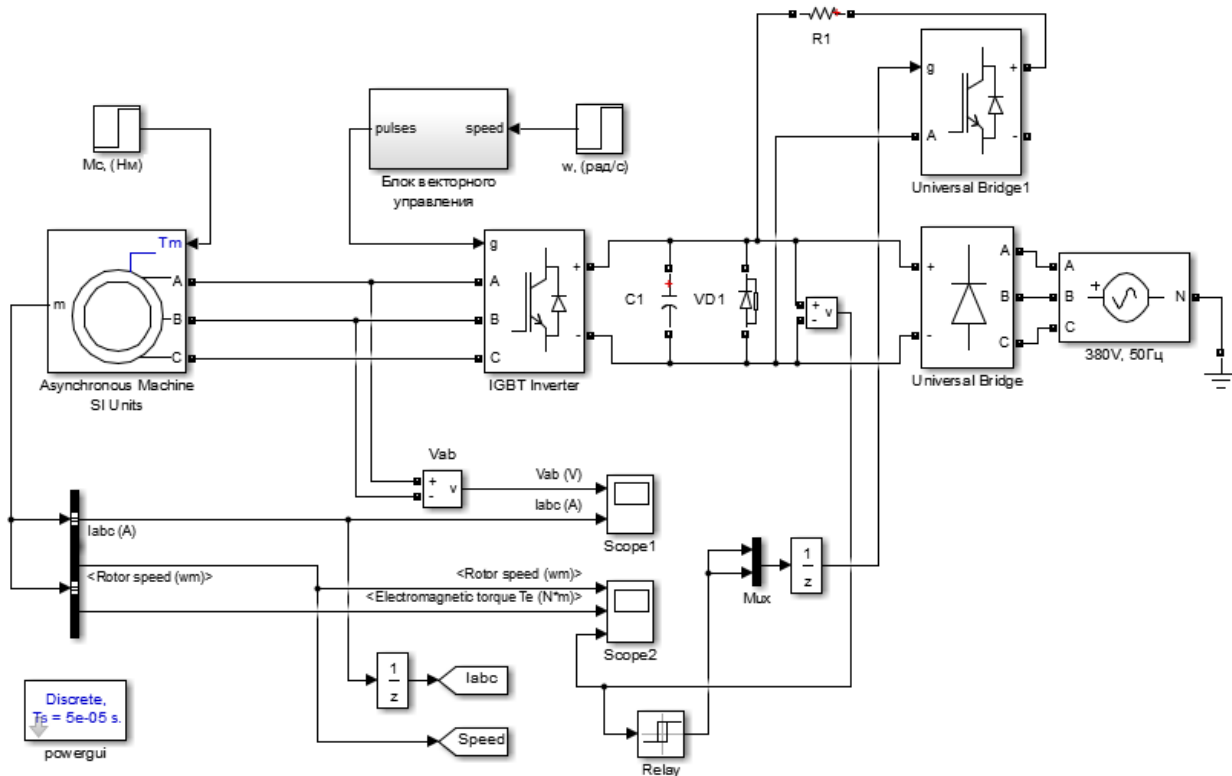


Рисунок 3.3 – Модель системы ПЧ – АД с векторным управлением с обратной связью по скорости

Данная модель строится на основе модели с $U / f = const$ управлением, рис. 3.1. Заменяем блок управления ПЧ (PWM Generator) на подсистему (блок векторного управления), рис. 3.5.

Данная система строится на основе функциональной схемы, рис.3.4.

Имя. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	
Ине. № дубл.	

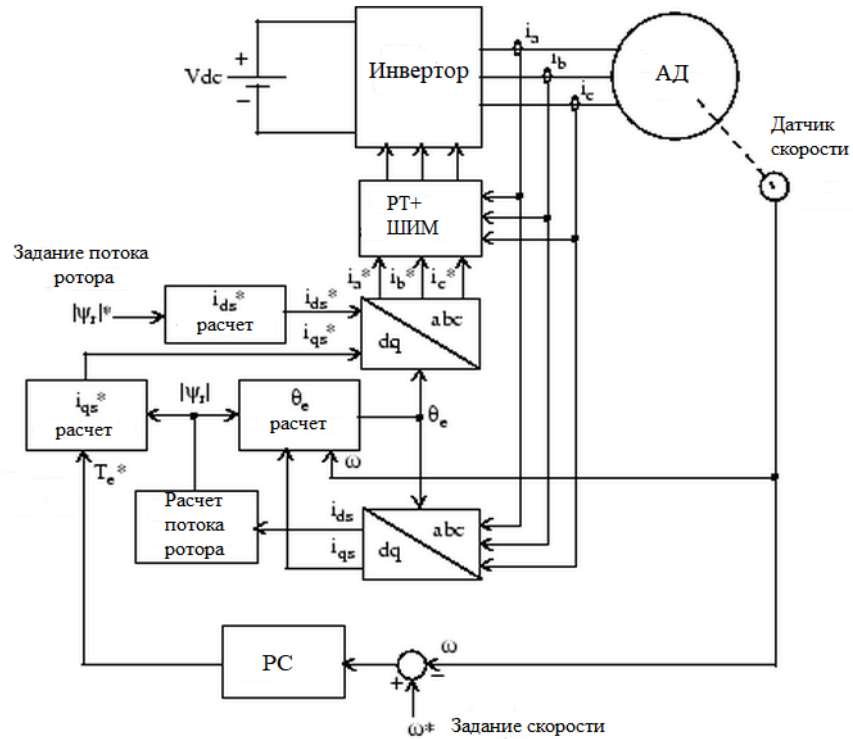


Рисунок 3.4 – Функциональная схема системы регулирования скорости АД с прямой ориентацией по полю

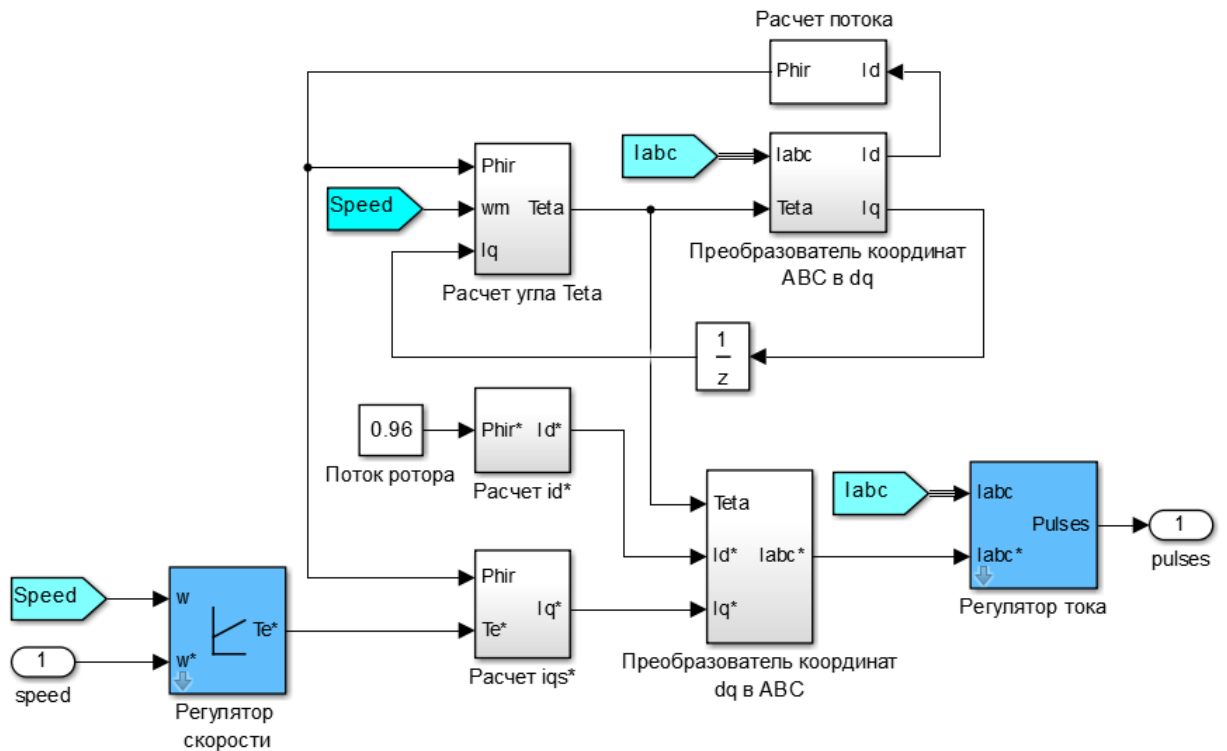


Рисунок 3.5 – Структурная схема блока векторного управления

Име. № подл.	Подп. и дата
Взаим. име. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

Рассмотрим настройку блока векторного управления более подробно, ниже приведены блоки входящие в его состав.

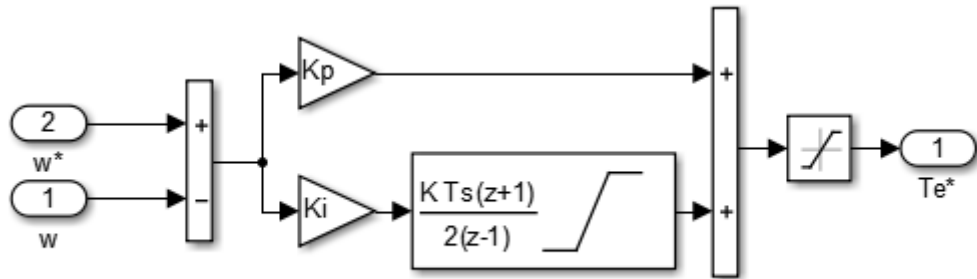


Рисунок 3.6 – Регулятор скорости

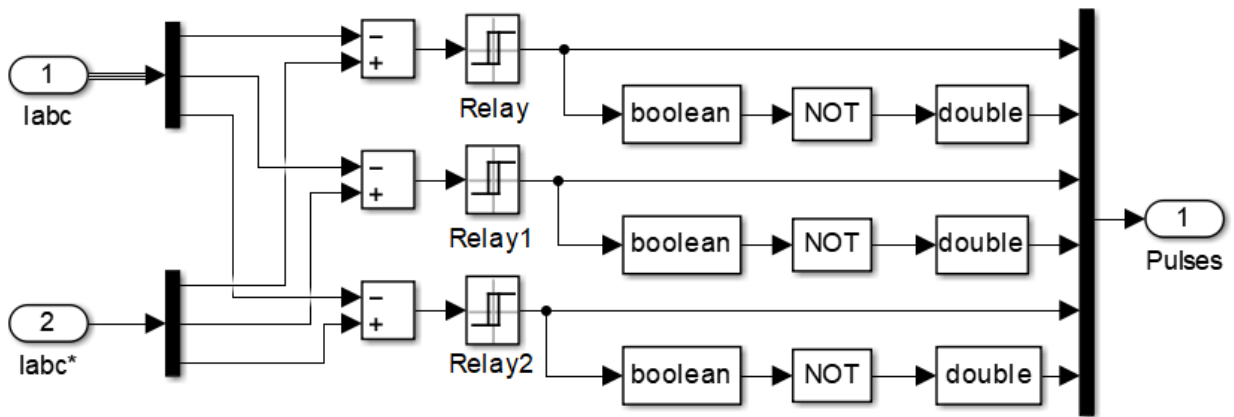
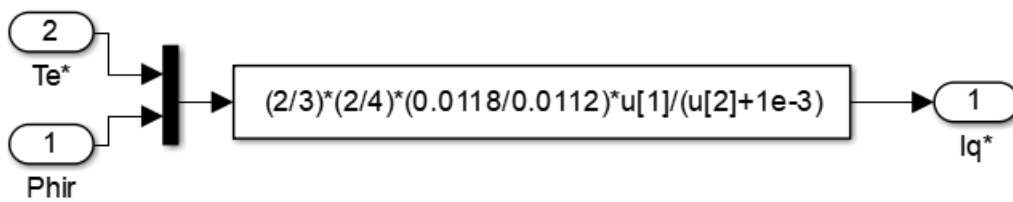


Рисунок 3.7 – Регулятор тока



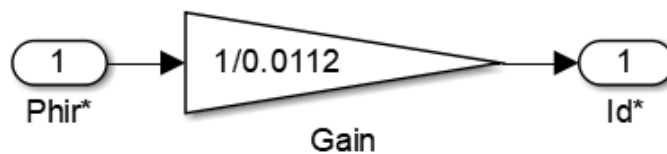
$$I_q = (2/3) * (2/p) * (L_r/L_m) * (T_e / \Phi_{ir})$$

$$L_m = 0.0112 \text{ Гн}$$

$$L_r = L_l'r + L_m = 0.0006 + 0.0112 = 0.0118 \text{ Гн}$$

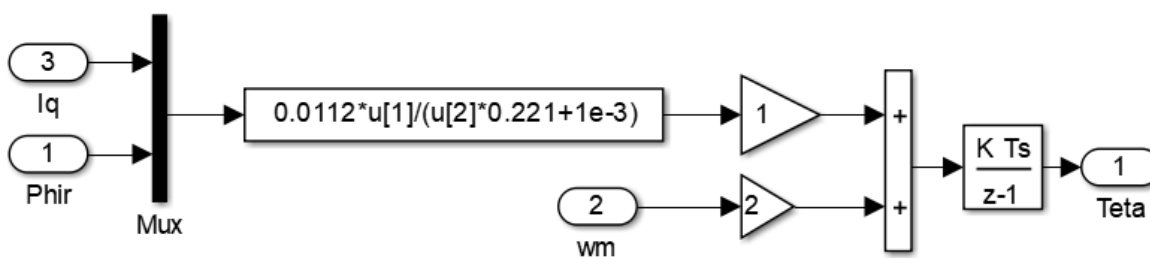
Рисунок 3.8 – Расчет тока i_{qs}^*

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам.име. №	
Име.№ дубл.	
Подп. и дата	
Изм.	Лист
№ докум.	Подп.
Дата	



$$I_d^* = \psi_r^* / L_m \quad L_m = 0.0112 \text{ Гн}$$

Рисунок 3.9 – Расчет тока i_d^*



$$L_m = 0.0112 \text{ Гн}$$

$$L_r = L_l' + L_m = 0.0006 + 0.0112 = 0.0118 \text{ Гн}$$

$$R_r = 0.0534 \text{ Ом}$$

$$T_r = L_r / R_r = 0.0118 / 0.0534 = 0.221 \text{ с}$$

Рисунок 3.10 – Расчет угла положения θ

$$\theta = \int (\omega + \omega_{ск}) dt.$$

$$\text{Где, } \omega = \frac{L_m \cdot i_{qs}^*}{\left(\frac{L_r}{R_r} \cdot \psi_r \right)} = \frac{0.0112 \cdot i_{qs}^*}{\left(\frac{0.0118}{0.0139} \cdot \psi_r \right)}$$

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	
Ине. № подл.	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

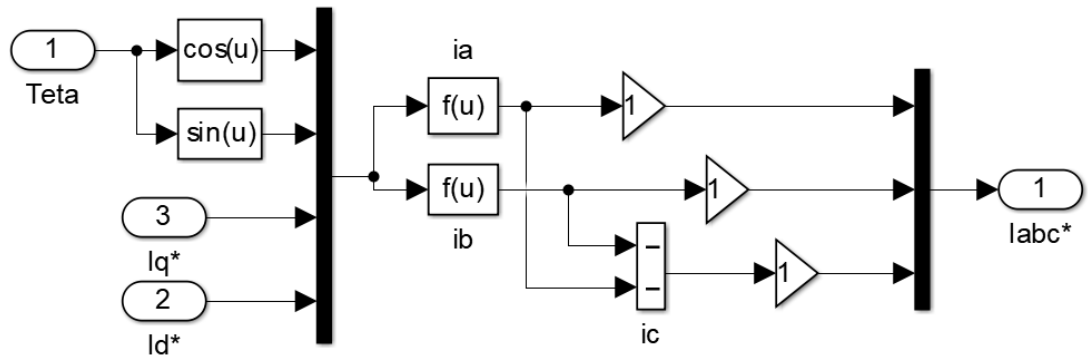


Рисунок 3.11 – Преобразователь координат $dq \rightarrow ABC$

В блоке i_a задается следующее выражение:

$$-u[3] \cdot u[2] + u[4] \cdot u[1].$$

В блоке i_b :

$$(-u[1] + 1.7320508 \cdot u[2]) \cdot u[4] \cdot 0.5 + (u[2] + 1.7320508 \cdot u[1]) \cdot u[3] \cdot 0.5.$$

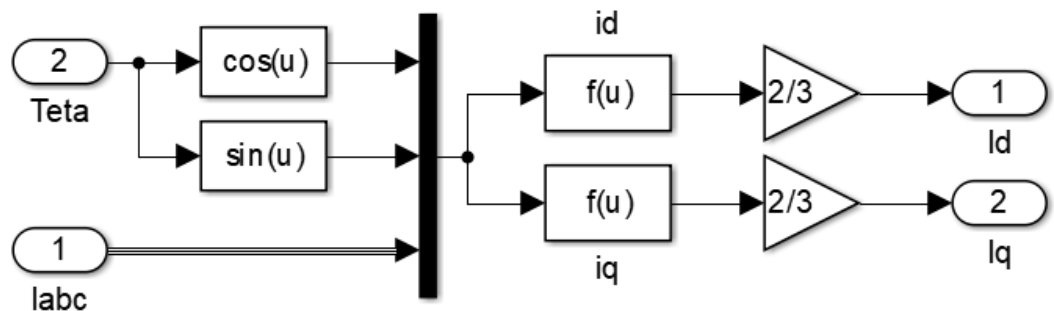


Рисунок 3.12 – Преобразователь координат $ABC \rightarrow dq$

В блоке i_d задается следующее выражение:

$$u[1] \cdot u[3] + (1.7320508 \cdot u[2] - u[1]) \cdot u[4] \cdot 0.5 + (-u[1] - 1.7320508 \cdot u[2]) \cdot u[5] \cdot 0.5.$$

В блоке i_q :

$$-u[2] \cdot u[3] + (u[2] + 1.7320508 \cdot u[1]) \cdot u[4] \cdot 0.5 + (u[2] - 1.7320508 \cdot u[1]) \cdot u[5] \cdot 0.5.$$

Име. № подл.						БР - 13.03.02.10 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата			63
Име. № инв.	Име. № дубл.	Подп. и дата	Подп. и дата	Подп. и дата			

Результаты моделирования переходных процессов скорости и электромагнитного момента представлены на рис. 3.13.

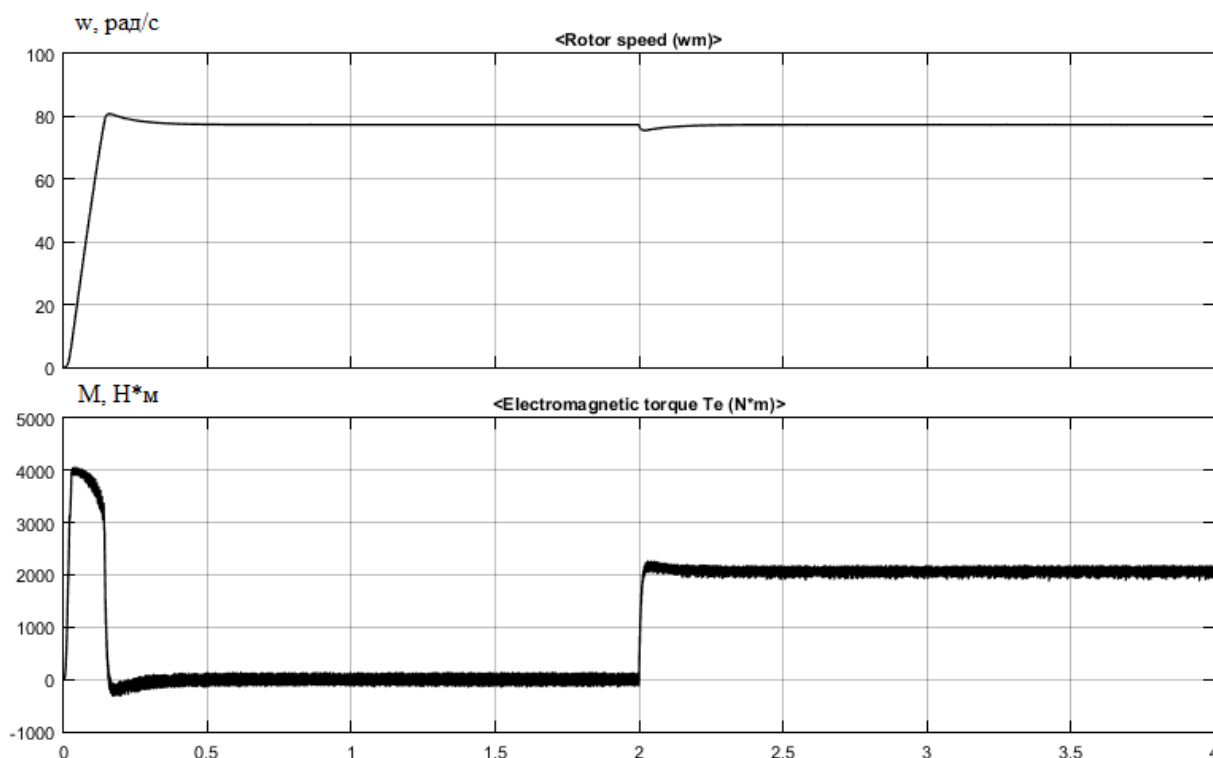


Рисунок 3.13 – Переходные процессы скорости и момента при векторном управлении

3.5 Выбор системы управления модернизированного электропривода на основе оценки показателей качества

Проанализируем переходной процесс угловой скорости вращения для системы ПЧ – АД с $U / f = const$ управлением (рис. 3.2).

- Максимальное значение угловой скорости 76,07 с⁻¹;
- установившееся значение угловой скорости 66,75 с⁻¹;
- статическая ошибка угловой скорости

$$\Delta\omega_{ст} = \frac{\omega_{зад} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{77,349 - 66,75}{66,75} \cdot 100\% = 15,8\%;$$

- перерегулирование скорости

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{76,07 - 66,75}{66,75} \cdot 100\% = 13,9\%.$$

Проанализируем переходной процесс угловой скорости вращения для системы ПЧ – АД с векторным управлением (рисунок 3.13).

- Максимальное значение угловой скорости 79,69 с⁻¹;
- установившееся значение угловой скорости 77,34 с⁻¹;
- перерегулирование скорости

$$\sigma = \frac{\omega_{\max} - \omega_{уст}}{\omega_{уст}} \cdot 100\% = \frac{79,69 - 77,34}{77,34} \cdot 100\% = 3,039\%.$$

Таким образом, из рисунков 3.2 и 3.13 видно, что время переходного процесса и перерегулирование значительно больше для скалярного управления, чем для векторного. При скалярном управлении перерегулирование скорости составляет 13,9%, для векторного – всего 3%. Данный показатель достигается путем настройки ПИ-регулятора скорости.

Переходный процесс для скалярного управления заканчивается только после наброса нагрузки, при t=4 с. Для векторного управления время переходного процесса составляет 0,2 с.

При набросе нагрузки (2 с.) для скалярного управления мы можем наблюдать колебания и снижение скорости на 4%. Скорость при векторном управлении возвращается к номинальной и не сопровождается колебаниями.

При увеличении момента, скорость при скалярном управлении значительно снижается. При векторном управлении скорость остается постоянной, даже при моменте близкому к критическому.

Таким образом, исходя из вышперечисленного, для модернизированной системы ПЧ-АД выбираем векторное управление.

Рассчитанные показатели качества также указывают на то, что система удовлетворяет необходимым требованиям. Следовательно модернизация проведена успешно.

Име. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Име. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ	Лист
						65

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с заданием в данной выпускной квалификационной работе выполнено проектирование электроприводов портального крана грузоподъемностью 16 тонн.

В процессе проектирования был выполнен ряд разделов, указанных в задании.

В первом разделе был произведен анализ технологического процесса, выбран соответствующий портальный кран «КПП 16/20», а также приведены технические характеристики, соответствующие выбранному крану.

Во втором разделе был произведен подробный расчёт базовой системы управления электроприводом механизма подъема. Были построены нагрузочные диаграммы механизма и электропривода, выбран асинхронный двигатель с фазным ротором МТН 713-10, произведена его проверка.

Также в данном разделе представлена модель асинхронного двигателя с фазным ротором в среде Matlab Simulink. Были получены переходные процессы скорости и момента при пуске АД с фазным ротором. При оценке показателей качества базовой системы был сделан вывод о необходимости модернизации данной системы.

Обоснование принципа модернизации с последующей ее реализацией было выполнено в разделе 3.

В данном разделе приведены недостатки применяемого базового оборудования, на основании которых было принято решение о замене базовой системы на модернизированную систему управления ПЧ – АД. Выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 1LG4315, фирмы siemens, произведена его проверка.

Далее в 3 разделе представлена модель модернизированной системы ПЧ – АД с $U / f = const$ управлением, а также модель системы ПЧ – АД с векторным управлением с обратной связью по скорости. Приведены сравнительные результаты, реализованных методов регулирования,

Подп. и дата
Име. № дубл.
Взам. име. №
Подп. и дата
Име. № подл.

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	

БР - 13.03.02.10 ПЗ

отражающие преимущества и недостатки выбранных способов регулирования.

При оценке показателей качества, из двух способов управления для модернизированной системы было выбрано векторное управление.

В целом, доказано, что показатели спроектированной системы соответствуют допустимым требованиям, а применение разработанной системы целесообразно ввиду удобства управления и удовлетворительных технических показателей.

Ине. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Ине. № дубл.	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

БР - 13.03.02.10 ПЗ

Лист

67

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ключев, В. И. Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
2. Ильинский, Н.Ф. Основы электропривода: учеб. пособие для вузов / Н.Ф. Ильинский. – М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 224.
3. Пахомов, А. Н. Теория электропривода. Переходные процессы: метод. указания к практическим занятиям / А. Н. Пахомов. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 55 с.
4. Пахомов, А. Н. Переходные процессы в электромеханических системах: учебно-методическое пособие [Электронный ресурс]: для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» / сост. А. Н. Пахомов. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. – 54 с.
5. Теория электропривода: учеб. пособие по курсовому проектированию / А.Н. Пахомов, М.В. Кривенков. – Красноярск: ИПК СФУ, 2009. – 148 с.
6. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.; Питер, 2008. – 288 с.
7. Шрейнер, Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
8. Брауде, В. И., Гохберг, М. М., Звягин, И. Е. и др. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 1. Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций / Под общ. ред. проф. Гохберга М. – М.: Машиностроение, 1988. – 536 с.: ил.
9. Александров, М. П., Гохберг, М. М., Ковин, А. А. и др. Справочник по кранам: в 2 т. Т. 2. Крановые механизмы и узлы. Техническая эксплуатация

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

БР - 13.03.02.10 ПЗ

кранов / Под общ. ред. проф. Гохберга М. – М.: Машиностроение, 1988. – 559 с.: ил.

10. Кузьмин, А. В., Марон, Ф. Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. – Минск: «Вышэйшая школа», 1983.

11. Simscape Power Systems [Электронный ресурс] // MathWorks – Режим доступа:
<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ug/building-your-own-drive.html>.

12. Асинхронные электродвигатели общего назначения фирмы Siemens [Электронный ресурс] // – Режим доступа:
https://portal.tpu.ru/SHARED/k/KOJAIN/Student/Tab2/induction_motors_Siemens.pdf

13. Герман-Галкин, С. Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. / С. Г. Герман-Галкин – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.

14. Герман-Галкин, С. Г. Виртуальные лаборатории полупроводниковых систем в среде Matlab-Simulink.: Учебник. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. — 448 с.: ил.

15. Терехин, В. Б. Моделирование систем электропривода в Simulink (Matlab 7.0.1): учебное пособие / В. Б. Терехин; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

Ине. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ине. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	БР - 13.03.02.10 ПЗ	Лист
						69

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра «Электротехника»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В. Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия

«17» 06 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника

«Автоматизация электроприводов порталного крана
грузоподъемностью 16 тонн»

Пояснительная записка

Руководитель

К. С. Федий 17.06.21
подпись, дата

К. Т. Н. Доцент
должность, учетная степень

К. С. Федий
инициалы, фамилия

Выпускник

И. Г. Полелей 17.06.21
подпись, дата

И. Г. Полелей
инициалы, фамилия

Красноярск 2021