

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

**ОТЗЫВ НАУЧНОГО РУКОВОДИТЕЛЯ**

на дипломную работу

**Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот»**

**Мендыгали Нурбола Нурлановича**

**6В07101 – «Энергетика»**

Дипломная работа студента Мендыгали Нурбола посвящена проектированию автоматизированного электропривода откатных ворот, что является актуальным направлением в сфере малой автоматизации и технического обеспечения безопасности объектов различного назначения.

В процессе выполнения дипломной работы студент проявил умение работать с нормативной документацией, справочными источниками, техническими каталогами и программным обеспечением. Проект охватывает все основные этапы инженерной разработки: от анализа объекта и расчёта нагрузок до выбора и обоснования технических решений, включая подбор двигателя, частотного преобразователя, редуктора и системы управления.

Студент использовал программную среду MATLAB/Simulink, в которой были смоделированы переходные процессы пуска и торможения электропривода. Это позволило оценить динамические характеристики системы и убедиться в корректности выбранных параметров. Также в работе уделено внимание вопросам безопасности, надёжности и энергосбережения, что подчёркивает комплексный подход к решению поставленной задачи.

В целом, дипломная работа Мендыгали Н.Н. соответствует требованиям, предъявляемым к дипломным работам и заслуживает оценки «отлично» А- (90 баллов), а её автор – присвоения академической степени бакалавра по образовательной программе 6В07101 - «Энергетика».

**Научный руководитель**

PhD, ассоциированный профессор  
кафедры «Энергетика»

 С.А. Минажова

(подпись)

« 10 » 06 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

**РЕЦЕНЗИЯ**

**на дипломную работу**  
(наименование вида работы)

**Мендыгали Нурбола Нурлановича**  
(Ф.И.О. обучающегося)

**6В07101 - Энергетика**  
(шифр и наименование специальности)

На тему: «**Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот**»

Дипломная работа посвящена разработке автоматизированного электропривода для откатных ворот, что является актуальной задачей в условиях широкого применения интеллектуальных систем в жилых и промышленных зданиях. Проект охватывает все стадии инженерного проектирования – от анализа конструкции ворот до моделирования переходных процессов и оценки экономической эффективности.

В работе грамотно сформулированы цель и задачи, чётко прослеживается логическая структура. На первом этапе рассмотрены конструктивные особенности различных типов ворот, а также выделены преимущества откатных систем. Далее обоснован выбор электродвигателя, произведены расчёты моментов сопротивления, мощности, приведённых моментов и энергетических параметров привода. Особое внимание уделено выбору преобразователя частоты, обеспечивающего плавный пуск, торможение и надёжную эксплуатацию системы. Использование среды Matlab Simulink для моделирования переходных процессов усиливает прикладной и научный уровень работы.

В экономической части выполнена оценка энергопотребления и произведено сравнение стоимости различных конфигураций привода.

**Замечания к работе**

К незначительным замечаниям можно отнести стилистические и редакционные недочёты, а также тот факт, что некоторые графические материалы могли бы быть более визуально проработаны. Тем не менее, это не снижает общей технической и методической ценности представленного материала.

**Оценка работы**

В целом, дипломная работа соответствует предъявляемым требованиям и заслуживает оценки «хорошо» В+ (85 баллов), а её автор – присвоения академической степени бакалавра техники и технологии по образовательной программе 6В07101 – «Энергетика».

**Рецензент**

к.т.н., ассистент профессор  
заведующая кафедры «Энергетика»  
АО «АЛТУ» Университет  
им. М.Тынышпаева»

Н.А.Т. Егзекова

Н.А.Т. Егзекова

2025 г.

Кафедра 704-24. Рецензия

**ПОДПИСЬ ЗАВЕРЯЮ**

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Мендыгали Нурбол Нурланович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот.

Научный руководитель: Саулеш Минажова

Коэффициент Подобия 1: 2.2

Коэффициент Подобия 2: 0.8

Микропробелы: 5

Знаки из других алфавитов: 23

Интервалы: 10

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование: *допускает к защите*

Дата  
10.06.2025 *Минажова С.А.*

проверяющий эксперт

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Мендыгали Нурбол Нурланович

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот.

Научный руководитель: Саулеш Минажова

Коэффициент Подобия 1: 2.2

Коэффициент Подобия 2: 0.8

Микропробелы: 5

Знаки из здругих алфавитов: 23

Интервалы: 10

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

- Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.
- Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.
- Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.
- Обоснование:

Дата 10.06.2025

Заведующий кафедрой Энергетики  
Сарсенбаев Е.А.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН  
Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева» Институт энергетики и машиностроения	ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ Заведующий кафедрой «Энергетика» PhD, ассоциированный профессор Е.А. Сарсенбаев «16» 06 2025г.
---	---

### ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

На тему: Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот

6B07101 – Энергетика

Выполнил:

Мендыгали Н.Н.

Рецензент  
к.т.н., заведующая каф.  
«Энергетика»  
А.Т. Егзекова  
«17» 06 2025 г.

Научный руководитель  
PhD, ассоциированный  
профессор  
С.А. Минажова  
«03» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им. А. Буркитбаева

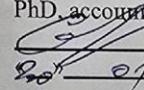
Кафедра «Энергетика»

6B07101 – Энергетика

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой «Энергетика»

PhD, ассоциированный профессор

 Е.А. Сарсенбаев

2025г.

### ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломной работы

Обучающемуся Мендыгали Нурбол Нурланович

Тема: Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26 П/О от 29 января 2025г.

Срок сдачи законченной работы «19» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Масса ворот – 110кг, диаметр реечной шестерни – 0,1 м, коэффициент трения – 0,02, коэффициент скольжения ворот – 0,2, момент инерции – 18 кгм<sup>2</sup>, длина перемещения – 4,2м, скорость рабочего хода – 0,2м/с, допустимое ускорение – 1,0 м/с<sup>2</sup>, напряжение питания электропривода трёхфазное, 380 В, 50 Гц.

Краткое содержание дипломной работы: Аналитическая часть, выбор электродвигателя, расчет параметров электродвигателя, выбор редуктора, выбор преобразователя, составление структурной схемы, исследование переходных процессов в MatLab, экономическая часть.

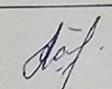
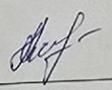
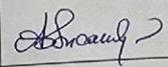
Графические материалы дипломной работы представлены в 10 слайдах.

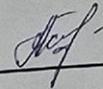
**ГРАФИК**  
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Аналитическая часть	10.02 - 19.03.2025г	-
Основная расчетная часть	10.03 - 21.04.2025г	-
Экономическая часть	07.04 - 30.04.2025г	-

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчетная часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор	21.04.2025	
Экономическая часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор	30.04.2025г	
Нормаконтроль	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	09.06.2025	

Научный руководитель  С.А. Минажова

Задание принял к исполнению обучающийся  Н.Н. Мендыгалиев

Дата

" 19 " мая 2025г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Мендыгали Нурбол Нурланович

Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

6B07101– Энергетика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Заведующий кафедрой «Энергетика»  
PhD, ассоциированный профессор  
\_\_\_\_\_ Е.А. Сарсенбаев  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025г.

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот

6B07101– Энергетика

Выполнил:

Мендыгали Н.Н.

Рецензент  
к.т.н., заведующая каф.  
«Энергетика»  
\_\_\_\_\_ А.Т. Егзекова  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Научный руководитель  
PhD, ассоциированный  
профессор  
\_\_\_\_\_ С.А. Минажова  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский  
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения им.А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

6B07101– Энергетика

**УТВЕРЖДАЮ**

Заведующий кафедрой «Энергетика»

PhD, ассоциированный профессор

\_\_\_\_\_ Е.А. Сарсенбаев

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение дипломной работы**

Обучающемуся Мендыгали Нурбол Нурланович

Тема: Проектирование автоматизированного электропривода откатных ворот

Утверждена приказом Проректора по академическим вопросам №26 П/О от 29 января 2025г.

Срок сдачи законченной работы «19» мая 2025г.

Исходные данные к дипломной работе: Масса ворот – 110кг, диаметр реечной шестерни - 0,1 м, коэффициент трения – 0,02, коэффициент скольжения ворот - 0,2, момент инерции - 18 кгм<sup>2</sup>, длина перемещения – 4,2м, скорость рабочего хода – 0,2м/с, допустимое ускорение – 1,0 м/с<sup>2</sup>, напряжение питания электропривода трёхфазное, 380 В, 50 Гц.

Краткое содержание дипломной работы: Аналитическая часть, выбор электродвигателя, расчет параметров электродвигателя, выбор редуктора, выбор преобразователя, составление структурной схемы, исследование переходных процессов а MatLab, экономическая часть.

Графические материалы дипломной работы представлены в 10 слайдах.

**ГРАФИК**  
подготовки дипломной работы

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Аналитическая часть		
Основная расчетная часть		
Экономическая часть		

**Подписи**

консультантов и нормоконтролера на законченную дипломную работу с указанием относящихся к ним разделов работы

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Расчетная часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор		
Экономическая часть	С.А. Минажова, PhD, ассоциированный профессор		
Нормаконтроль	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель		

Научный руководитель \_\_\_\_\_ С.А. Минажова

Задание принял к исполнению обучающийся \_\_\_\_\_ Н.Н. Мендыгалиев

Дата " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025г.

## **АННОТАЦИЯ**

В дипломной работе был разработан и автоматизирован электропривод для управления воротами гаража. В процессе проектирования был произведён расчёт среднеквадратичного момента нагрузки, а также учтён коэффициент повторного включения, на основе чего был подобран электродвигатель. Затем осуществлён выбор редуктора и преобразователя частоты. Проведена проверка нагрева электродвигателя, а также рассчитаны энергетические параметры электропривода, чтобы подтвердить правильность выбора оборудования и эффективное использование его возможностей. Кроме того, был выполнен анализ переходных процессов.

## **АҢДАТПА**

Дипломдық жұмыста гараж қақпасын басқаруға арналған электржетек жобаланып, автоматтандырылды. Жобалау барысында жүктеме моментінің орташа квадраттық мәні есептеліп, қайта қосылу коэффициенті ескеріліп, соның негізінде электрқозғалтқыш таңдалды. Одан кейін редуктор мен жиілік түрлендіргіш таңдалып алынды. Электрқозғалтқыштың қызуы тексеріліп, электржетектің энергетикалық параметрлері есептелді. Бұл жабдықты дұрыс таңдауды және оның мүмкіндіктерін тиімді пайдалануды дәлелдеу үшін жасалды. Сонымен қатар өтпелі процестерді талдау да жүргізілді.

## **ANNOTATION**

In this thesis, an electric drive for controlling the garage door was designed and automated. During the design process, the root mean square torque of the load was calculated, and the duty cycle factor was considered to select the electric motor. Subsequently, a gearbox and frequency converter were chosen. The heating of the electric motor was checked, and the energy parameters of the electric drive were calculated to confirm the correct choice of equipment and the effective use of its capabilities. Additionally, an analysis of transient processes was performed.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Ведение	7
1	Описание технологического процесса	8
1.1	Виды гаражных ворот	8
1.2	Описание конструкции ворот и задачи проектирования	12
2	Выбор элементов конструкции и электродвигателей	13
2.1	Выбор начальных данных для расчёта	13
2.2	Расчет моментов статических сопротивлений и предварительный расчет мощности электродвигателя	14
2.3	Выбор типа двигателя	19
2.4	Выбор редуктора	20
2.5	Приведение моментов к валу двигателя	21
2.6	Предварительная проверка электродвигателя по производительности и нагреву	24
2.7	Выбор основных элементов силовой цепи	27
2.8	Расчет статических характеристик электропривода	29
2.9	Расчет параметров схемы подключения для обеспечения запуска и торможения двигателя	33
2.10	Расчет переходных процессов электропривода	34
2.11	Расчёт энергетических показателей электропривода	35
2.12	Принципиальная схема электропривода	36
3	Экономическая часть	37
3.1	Расчет годовое энергопотребления	37
3.2	Определение стоимости основного оборудования автоматизированного электропривода пассажирского лифта	37
	Заключение	39
	Список использованной литературы	40

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время автоматизация играет ключевую роль в развитии современных технологий и значительно упрощает выполнение повседневных задач. Сложно представить производство и сферу услуг без применения автоматизированных систем. Автоматизация позволяет повысить точность управления, уменьшить затраты времени и трудозатраты, а также улучшить общую производительность оборудования. Вместе с тем автоматизация постепенно входит и в бытовую сферу, позволяя человеку облегчить выполнение рутинных операций и повысить уровень комфорта в повседневной жизни. Одним из ярких примеров является автоматизация управления воротами гаража.

Автоматизация электропривода управления гаражными воротами даёт возможность дистанционного открытия и закрытия ворот с помощью пульта управления. Это решение способствует не только упрощению процедуры эксплуатации, но и значительно повышает безопасность, поскольку пользователь может управлять воротами, находясь на безопасном расстоянии.

Использование автоматизированного электропривода для гаражных ворот представляет собой современное техническое решение, которое сочетает в себе надежность, эргономичность и энергоэффективность. Автоматизированные системы управления воротами позволяют обеспечить плавность и стабильность их работы, минимизируя риск поломок и снижая износ механизмов. Применение частотно-регулируемых электроприводов также позволяет более точно управлять скоростью движения ворот, а это снижает нагрузку на элементы конструкции и увеличивает срок их эксплуатации.

Кроме того, автоматизированные системы управления воротами могут быть интегрированы в интеллектуальные системы «умного дома», что открывает широкие возможности для оптимизации энергопотребления и повышения безопасности. Автоматизированный электропривод гаражных ворот является важным элементом современной системы управления зданием, обеспечивая пользователю удобство, функциональность и надежность. Его применение отвечает актуальным требованиям энергоэффективности, безопасности и комфортной эксплуатации, способствуя созданию более технологичных и умных жилых и коммерческих объектов.

Цель данной дипломной работы - проектирование и автоматизация электропривода для управления гаражными воротами.

Задачи дипломной работы:

- теоретический обзор технологического процесса;
- расчет статических сопротивлений;
- выбор типа электродвигателя и основных элементов силовой цепи;
- расчет статических характеристик электропривода;
- расчет параметров схемы подключения и анализ переходных процессов
- технико-экономический анализ.

## 1 Описание технологического процесса

### 1.1 Виды гаражных ворот

Наиболее традиционными являются распашные ворота (см.рисунок 1.1), которые применяются на протяжении длительного времени. Однако их эксплуатация сопряжена с определёнными неудобствами, в частности, в зимний период требуется регулярная очистка снега перед воротами для возможности их открытия. Несмотря на данные ограничения, распашные ворота продолжают пользоваться спросом благодаря их доступной стоимости, обусловленной простотой изготовления, а также высоким уровнем защиты от несанкционированного доступа. Как правило, такие ворота изготавливаются двухстворчатыми, однако встречаются и одностворчатые модели, применяемые реже. Конструктивно створки представляют собой прямоугольные рамы из металлического профиля, обшитые листовой сталью [1].



Рисунок 1.1 – Распашные ворота гаража

Следующий тип ворот – секционные (см.рисунок 1.2). Их название связано с тем, что конструкция состоит из горизонтально ориентированных секций, соединённых между собой шарнирными элементами. Количество секций обычно варьируется от 4 до 6, при ширине от 35 до 61 см и длине до 7 м. Секции могут быть утеплёнными, с использованием теплоизоляционного материала в виде плитного утеплителя, защищённого с обеих сторон отделочным слоем. Это обуславливает увеличение толщины секции до 42 мм. Обязательным элементом является эластичный уплотнитель, устанавливаемый по периметру каждой секции [1].

Важным требованием к теплоизоляционному материалу является минимальное водопоглощение, в связи с чем преимущественно применяется

пенополиуретан, а в редких случаях – пенополистирол. Для изготовления секций используются оцинкованные стальные листы толщиной до 1 мм, алюминиевые сплавы, а также древесина (в случае более дорогостоящих моделей).



Рисунок 1.2 – Секционные ворота гаража

Конструктивно секционные ворота оснащены роликами, которые обеспечивают перемещение створок по направляющим элементам, состоящим из вертикальной и горизонтальной частей, соединённых между собой изогнутым сегментом. В процессе открытия секции поднимаются вверх и располагаются в горизонтальной плоскости под потолком гаража. Данная модификация предполагает использование электродвигателя, установленного под потолком и обеспечивающего движение конструкции посредством цепного или тросового механизма. При отсутствии электропитания предусмотрен ручной режим открытия.

Секционные ворота характеризуются универсальностью применения: они могут устанавливаться в проёмы различной формы и размеров, гармонично сочетаясь с архитектурой зданий. Варианты отделки разнообразны: окрашивание, облицовка пластиком, алюминиевыми элементами или древесиной. Некоторые модели комплектуются калитками, что повышает функциональность, несмотря на более высокую стоимость.

К преимуществам секционных ворот относят рациональное использование пространства внутри и снаружи гаража, высокие тепло- и звукоизоляционные характеристики (для утеплённых моделей), а также возможность изготовления конструкций значительных размеров – до 7 м по ширине и 6 м по высоте. Основные недостатки: сравнительно высокая стоимость, сложность конструкции, затрудняющая ремонт, а также низкий уровень защиты от взлома [1].

Следует отметить, что помимо вертикальных вариантов существуют модели секционных ворот с боковым открытием. Для их установки внутри гаража монтируются две направляющие: одна на полу, вторая – на стене, что обеспечивает движение полотна вдоль стены помещения.

Третьим типом гаражных ворот являются подъемно-поворотные конструкции (см.рисунок 1.3). Из их названия очевидно, что в процессе открытия осуществляется одновременное движение полотна вверх и его поворот, в результате чего оно располагается под потолком. Эти ворота представляют собой монолитное полотно, которое при закрытии плотно перекрывает проём. С целью обеспечения герметичности в нижней части устанавливается порожек высотой около 3 см, а по бокам – внешняя рама, в которую задвигается полотно [1].



Рисунок 1.3 – Подъемно-поворотные ворота гаража

Движение полотна обеспечивается с помощью шарнирно-рычажного механизма, при этом возможны как автоматическое, так и ручное управление. Существенным недостатком является то, что при открытии нижняя часть полотна выступает наружу примерно на 1 м, ограничивая возможность парковки автомобиля вплотную к воротам.

Размерный ряд таких ворот более ограничен: максимальная ширина составляет 6 м, а высота – 2,2 м. В то же время, существует широкий спектр вариантов отделки, включая возможность установки окон или калиток.

К достоинствам подъемно-поворотных ворот относятся простота конструкции, относительно невысокая стоимость, компактность, отсутствие необходимости убирать снег перед гаражом, а также возможность оснащения автоматикой. К недостаткам относятся ограничение применения только для прямоугольных проёмов, невозможность частичного ремонта (только замена

всего полотна), средний уровень защиты от взлома и ограничение парковки автомобиля у ворот.

Четвёртый тип – рулонные ворота, название которых обусловлено тем, что при открытии полотно, состоящее из узких ламелей шириной 1,5–2 см, сворачивается в рулон, размещённый на валу в верхней части конструкции и закрытый коробом (см.рисунок 1.4). Ламели соединяются шарнирами и в большинстве случаев изготавливаются с утеплителем, однако их толщина не превышает 2,5 см во избежание увеличения диаметра рулона [1].



Рисунок 1.4 – Рулонные ворота гаража

Рулонные ворота поднимаются вертикально и не требуют дополнительного пространства ни внутри, ни снаружи гаража. Управление осуществляется либо вручную, либо с помощью привода, установленного на валу. Максимальная ширина проёма для таких ворот – до 3 м, а высота – до 3,5 м.

Преимущества рулонных ворот: удобство эксплуатации, малый вес конструкции, разнообразие вариантов отделки, минимальные требования к пространству, возможность автоматизации. Недостатки: сравнительно высокая стоимость, низкие тепло- и звукоизоляционные показатели, а также невысокая степень защиты от взлома.

Отметим, что рулонные ворота могут устанавливаться на внутреннюю, наружную поверхность стены или непосредственно в проём, что в последнем случае уменьшает его высоту на размер рулона.

Пятый тип – откатные ворота (см.рисунок 1.5). Данные конструкции представляют собой единое полотно, выполненное из металлического каркаса, обшитого листовым или плитным материалом. Возможны три варианта установки: с опорой на нижнюю направляющую, верхнюю или с использованием консольного подвеса. Независимо от способа монтажа, в конструкции

присутствуют ролики и направляющие, по которым осуществляется движение полотна вдоль стены. Управление воротами может быть как ручным, так и автоматизированным [1].



Рисунок 1.5 – Откатные ворота гаража

Основные преимущества откатных ворот: отсутствие потребности в дополнительном пространстве внутри гаража, возможность автоматизации, более низкая стоимость по сравнению с другими видами ворот, высокая устойчивость к взлому, а также отсутствие необходимости в регулярной очистке снега. К недостаткам относятся необходимость бетонирования элементов конструкции, увеличивающая стоимость, требование свободного пространства вдоль стены и невозможность установки калитки.

## 1.2 Принцип работы откатных ворот

В рамках данного дипломного проекта рассматривается автоматизация системы управления откатными воротами гаража. Конструкция таких ворот включает основание, на котором установлен каркас с подвижной створкой. Движение створки в сторону открытия или закрытия осуществляется с помощью зубчатой рейки, приводимой в действие электродвигателем.

Контроль положения ворот – открытого или закрытого – осуществляется индуктивными датчиками. В системе также предусмотрен фотоэлектрический датчик, предназначенный для обнаружения препятствий в проёме ворот при их закрытии.

Открытие и закрытие ворот осуществляется нажатием кнопки управления. В исходном положении ворота находятся в закрытом состоянии. При

кратковременном нажатии кнопки начинается процесс открытия ворот, сопровождающийся световой и звуковой сигнализацией. До момента полного открытия ворот система блокирует повторные нажатия кнопки.

Для закрытия ворот используется та же кнопка управления. Движение створки сопровождается световыми и звуковыми сигналами. При обнаружении препятствия в проёме ворот система автоматически включает режим реверса, и ворота открываются. После устранения препятствия инициируется автоматическая команда на закрытие ворот. Когда ворота полностью закрыты, световая и звуковая индикация отключаются [2].

В системе также можно предусмотреть возможность подключения пульта дистанционного управления, что повышает удобство эксплуатации. При необходимости возможна интеграция с системой видеонаблюдения или контроля доступа. В таком случае управляющий контроллер обрабатывает сигналы от всех датчиков и подаёт команды на привод. Электродвигатель снабжается редуктором, обеспечивающим плавность и надёжность движения створки.

## 2 Выбор элементов конструкции и электродвигателей

### 2.1 Выбор начальных данных для расчёта

На начальной стадии проектирования электропривода любого технологического объекта основное внимание уделяется выбору электродвигателя, который будет выполнять заданную технологическую функцию. В настоящем проекте предполагается использование одного электродвигателя, соединённого с редуктором, а на выходном валу редуктора будет установлена зубчатая шестерня.

Учитывая, что ворота в проекте являются откатными и имеют относительно небольшие размеры, выбор электродвигателя осуществляется в пользу модели с малой мощностью.

Исходные данные для проектирования представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Исходные данные

Наименование показателя	Обозначение	Размерность	Величина
Масса ворот гаража	$m_B$	кг	110
Диаметр реечной шестерни	$D$	м	0,1
Момент инерции вала	$J_p$	кгм <sup>2</sup>	18
Коэффициент трения скольжение в подшипниках	$\mu_n$	-	0,02
Коэффициент трения скольжения ворот	$\mu_c$	-	0,2
Длина перемещения	$L$	м	4,2
Скорость рабочегохода	$V_p$	м/с	0,2
Допустимое ускорение	$a_{доп}$	м/с <sup>2</sup>	1
Диаметр шейки ролика	$d_{ш}$	м	0,25D
Скорость возвратного движения	$V_b$	м/с	0,2

### 2.2 Расчёт статических моментов сопротивления и мощности электродвигателя

Рассчитаем время на каждом участке работы ворот.

Время пуска и торможения  $t_n$ ,  $t_T$  до заданной скорости движения гаражных ворот при рабочем ходе:

$$t_n = t_T = \frac{V_p}{a_{доп}} \quad (2.1)$$

$$t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = \frac{0,2}{1} = 0,2 \text{ с}$$

Путь, проходимый рабочей машиной за время пуска и торможения:

$$L_{\text{п}} = L_{\text{т}} = \frac{V_p^2}{2 \cdot a_{\text{доп}}} \quad (2.2)$$

$$L_{\text{п}} = L_{\text{т}} = \frac{0,2^2}{2 \cdot 1} = 0,02 \text{ м}$$

Время установившегося режима движения:

$$t_y = \frac{L - 2 \cdot L_{\text{пт}}}{V_p} \quad (2.3)$$

$$t_y = \frac{4,2 - 2 \cdot 0,02}{0,2} = 20,8$$

Рассчитаем статические моменты рабочей машины.

Момент сил трения в подшипниках:

$$M_{\text{под}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot d_{\text{ш}} \cdot \mu_{\text{п}} \cdot g}{2} \quad (2.4)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения ( $9,81 \text{ м/с}^2$ );

2 – распределение нагрузки в двухточечной опоре шейки ролика.

$$M_{\text{доп}} = \frac{110 \cdot 0,025 \cdot 0,02 \cdot 9,81}{2} = 0,27 \text{ Нм}$$

Рассчитаем момент сил трения скольжения тела по горизонтальной плоскости::

$$M_{\text{тс}} = \frac{m_{\text{в}} \cdot D \cdot \mu_{\text{с}} \cdot g}{2} \quad (2.5)$$

$$M_{\text{тс}} = \frac{110 \cdot 0,1 \cdot 0,2 \cdot 9,81}{2} = 10,78 \text{ Нм}$$

Рассчитаем статический момент:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{под}} + M_{\text{тс}} \quad (2.6)$$

$$M_{\text{ст}} = 0,27 + 10,78 = 11,05 \text{ Нм}$$

Определим момент инерции рабочего органа по формуле:

$$J_{po} = J_p + m_b \cdot \frac{D^2}{4} \quad (2.7)$$

$$J_{po} = 18 + \frac{110 \cdot 0,1^2}{4} = 4,95 \text{ кгм}^2$$

При заданной величине допустимого ускорения определим динамические моменты при движении:

$$M_{po.дин} = J_{po} \cdot \frac{2 \cdot a_{доп}}{D} \quad (2.8)$$

$$M_{po.дин} = 4,95 \cdot \frac{2 \cdot 1}{0,1} = 99 \text{ Нм}$$

Полный момент рабочего органа механизма:

$$M_{po} = M_{ст} + M_{po.дин} \quad (2.9)$$

Первый участок – старт рабочий ход:

$$M_{po1} = 11,05 + 99 = 110,05 \text{ Нм}$$

Второй участок – рабочий ход установившаяся скорость::

$$M_{po2} = M_{ст} = 11,05 \text{ Н·м.}$$

Третий участок – торможение рабочий ход:

$$M_{po3} = M_{ст} - M_{po.дин} = 11,05 - 99 = -87,951 \text{ Н·м.}$$

Четвертый участок – старт обратный ход:

$$M_{po11} = -M_{ст} - M_{po.дин} = -11,05 - 99 = -110,05 \text{ Н·м.}$$

Пятый участок – установившаяся скорость обратный ход:

$$M_{po2} = -M_{ст} = -11,05 \text{ Н·м}$$

Шестой участок – торможение обратный ход:

$$M_{po3} = -M_{ст} + M_{po.дин} = -11,05 + 99 = 87,951 \text{ Н·м.}$$

В таблице 2.2 представлены значения моментов, скоростей, моментов инерции и пройденного пути для каждого участка. На рисунке 2.1 показаны диаграммы зависимости скорости и моментов от времени.

Таблица 2.2 – Предварительный расчет нагрузочных диаграмм

Участок движения		Рабочий ход			Обратный ход		
Расчетные данные	Обозначение	Пуск	Уст. режим	Торм до остан.	Пуск	Уст. режим	Торм до остан.
Скорость, м/с	$V_{po}$	-	0,2	-	-	0,2	-
Время работы, с	$t_{po}$	0,2	20,8	0,2	0,2	20,8	0,2
Путь, м	$L_{po}$	0,02	4,16	0,02	0,02	4,16	0,02
Стат. момент, Нм	$M_{ст}$	11,05	11,05				
Дин. момент, Нм	$M_{родин}$	99	-	-99	-99	-	99
Сумм. момент, Нм	$M_{po}$	110,05	11,05	-87,951	-110,05	-11,05	87,951

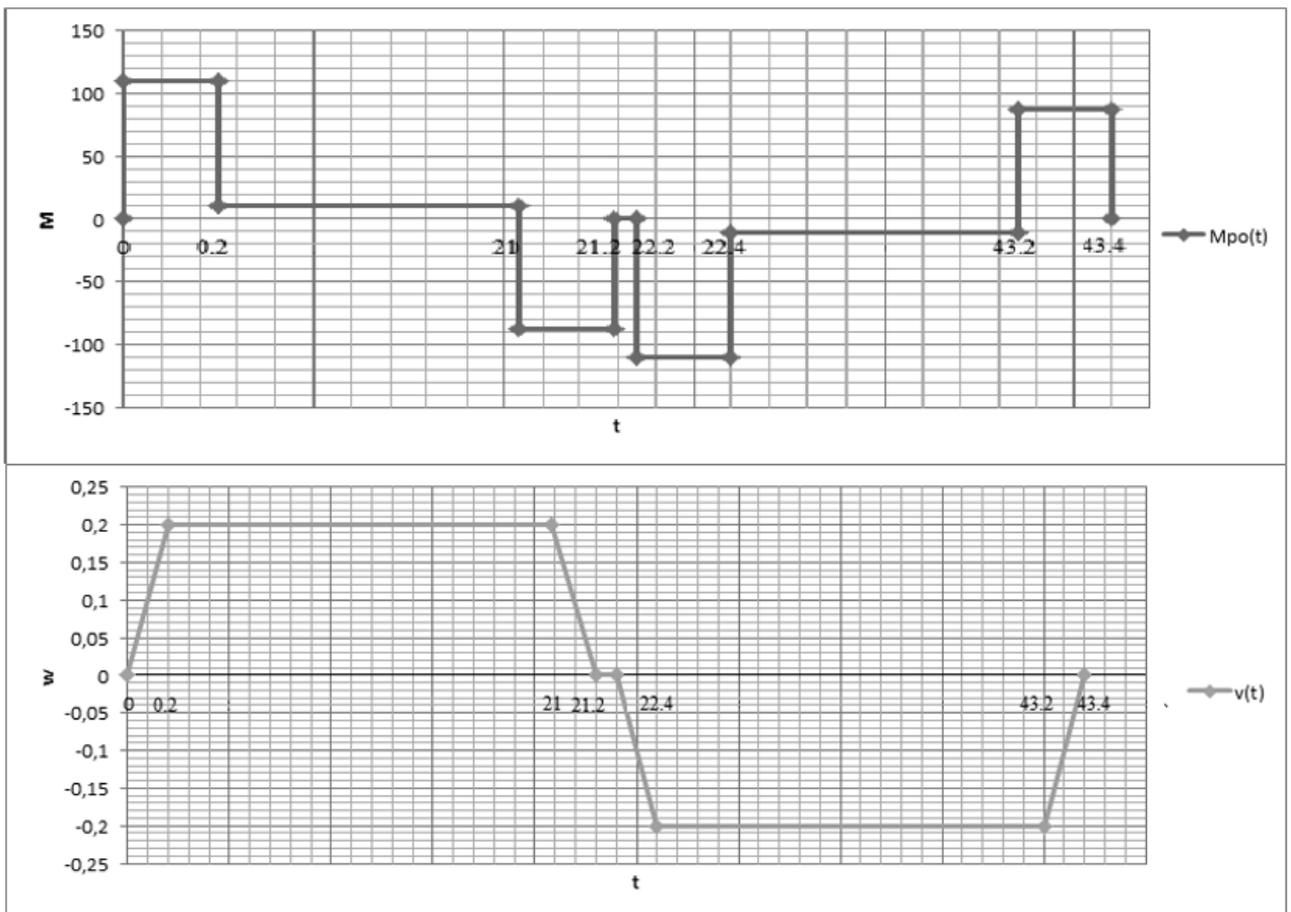


Рисунок 2.1 – Нагрузочная диаграмма момента рабочего органа и скорости

По рассчитанным значениям моментов на каждом участке можно найти среднеквадратичное значение момента:

$$M_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m M_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^m t_k}} \quad (2.10)$$

где  $M_k$  – момент на  $k$ -ом участке, Нм;  $t_k$  – длительность  $k$ -го участка, с.

Получаем значение момента:

$$M_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{110,05^2 \cdot 0,2 + 11,05^2 \cdot 20,8 + \dots + 87,951^2 \cdot 0,2}{0,2 + 20,8 + \dots + 0,2}} = 17,353 \text{ Нм}$$

Тогда мощность двигателя определяется по формуле:

$$P_{\text{дв}} = k_1 M_{\text{ср.кв}} \frac{2V_p}{D} \sqrt{\frac{\text{ПВ}_{\text{факт}}}{\text{ПВ}_{\text{кат}}}} \quad (2.11)$$

где  $k_1=1,5$  - коэффициент, учитывающий трение кабины при движении по направляющим;

$D$  – диаметр реечной шестерни, м;

$V_p$  – основная скорость движения, м/с;

$\text{ПВ}_{\text{факт}}$  – фактическое значение относительной продолжительности включения проектируемого привода;

$\text{ПВ}_{\text{кат}}$  – ближайшее к  $\text{ПВ}_{\text{факт}}$  каталожное значение относительной продолжительности включения для электродвигателей выбранной серии.

$$\text{ПВ}_{\text{факт}} = \frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{k=1}^m t_k \cdot 100\% \quad (2.12)$$

Время работы цикла:

$$t_{\text{ц}} = \frac{3600}{z} = \frac{3600}{80} = 45 \text{ с.}$$

$$\text{ПВ}_{\text{факт}} = \frac{(0,2 + 20,8 + \dots + 0,2)}{45} \cdot 100\% = 46,7\%$$

Для двигателей общепромышленной серии ряд ПВ: 15, 25, 40, 60, 100%. Выбираем ближайшее ПВ, то есть  $\text{ПВ}_{\text{кат}}=40\%$ .

$$P_{дв} = 1,5 \cdot 17,353 \cdot \frac{2 \cdot 0,2}{0,1} \cdot \sqrt{\frac{46,7}{40}} = 112,461 \text{ Вт.}$$

### 2.3 Выбор типа двигателя

Электродвигатель является ключевым элементом системы привода откатных ворот, так как именно он обеспечивает поступательное движение створки при открытии и закрытии. От его технических характеристик напрямую зависит надёжность, стабильность и эффективность работы всей автоматизированной системы. Правильно подобранный двигатель должен обеспечивать достаточный пусковой момент, устойчивую работу при переменных нагрузках, а также соответствовать условиям эксплуатации – в том числе температурным и климатическим. При этом важно учитывать как габаритные размеры, так и уровень энергопотребления, так как они напрямую влияют на экономичность и удобство установки оборудования. Ошибки при выборе двигателя могут привести к частым остановкам, перегреву, износу механических узлов или нестабильной работе автоматики. Поэтому подбор электродвигателя требует технически обоснованного подхода, анализа нагрузки, режима работы и условий монтажа. Кроме того, электродвигатель должен быть совместим с системой управления и обеспечивать возможность точного регулирования скорости и направления вращения [3].

Для реализации проекта выбран асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором из серии АИР 112МА8, которая относится к числу двигателей общепромышленного назначения. Основные характеристики двигателя представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры двигателя АИР 112МА8

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Величина
Рн	Номинальная мощность на валу	кВт	2,2
пн	Номинальная частота вращения	об/мин	700
Ин	Номинальный ток статора	А	6,2
cos φн	Коэффициент мощности в номинальном режиме	-	0,7
Ип	Пусковой ток	А	37,2
Мп	Пусковой момент	Нм	54
Ммакс	Максимальный (критический) момент	Нм	66
Jдв	Момент инерции двигателя	кгм <sup>2</sup>	0,004

## 2.4 Выбор редуктора

Редуктор играет важную роль в системе привода откатных ворот, обеспечивая передачу крутящего момента от электродвигателя к исполнительному механизму и снижая скорость вращения до необходимого уровня. Он служит звеном между электродвигателем и подвижной частью ворот, позволяя преобразовать высокооборотное вращение в медленное, но мощное движение, необходимое для перемещения тяжёлой створки. Правильный выбор редуктора определяет не только эффективность и надёжность всей системы, но и срок её службы, так как чрезмерные нагрузки или несоответствие технических параметров могут привести к ускоренному износу шестерён, подшипников и других узлов. При подборе редуктора учитываются передаточное число, номинальный крутящий момент, КПД, тип крепления, климатические условия и режим работы. Также важно учитывать совместимость с используемым электродвигателем и возможностью интеграции в общую конструкцию. Качество редуктора напрямую влияет на плавность движения створки и уровень шума при эксплуатации, что особенно важно при установке в жилых или коммерческих зонах. Кроме того, от надёжности редуктора зависит стабильность работы ворот в условиях частых пусков и остановок, характерных для автоматизированных систем [4].

Передаточное число редуктора рассчитывается исходя из номинальной частоты вращения выбранного двигателя и основной скорости перемещения исполнительного органа в соответствии с формулой (2.13).

$$i_p = \frac{\omega_n \cdot D}{2 \cdot v_0} \quad (2.13)$$

где  $D$  – диаметр реечной шестерни, находящегося на выходном валу редуктора и преобразующего вращение вала в поступательное движение исполнительного органа рабочей машины, м;

$v_0$  – основная скорость движения исполнительного органа.

В соответствии с формулой (2.13):

$$i_p = \frac{73,3 \cdot 0,1}{2 \cdot 0,2} = 18$$

Выбор редуктора будет осуществляться с учётом того, что его передаточное число должно быть равно или незначительно меньше вычисленного значения. При этом необходимо учитывать условия эксплуатации механизма и рабочую скорость двигателя. Характеристики выбранного редуктора будут приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры редуктора Ч-80

Обозначение	Наименование показателя	Размерность	Величина
$i_p$	Передаточное число редуктора	-	16
$n_{вр}$	Частота вращения входного вала	Об/мин	$\leq 750$
$M_T$	Номинальный крут. момент на выходном валу	Н*м	280
$\eta_p$	Коэффициент полезного действия	%	$\geq 83$

## 2.5 Приведение моментов к валу двигателя

Приведение моментов к валу двигателя – это процесс пересчёта всех внешних моментов сопротивления, действующих на исполнительные механизмы, к одному общему месту приложения, а именно к валу электродвигателя. Такой подход необходим для корректного расчёта нагрузки на двигатель и подбора его основных параметров. Поскольку в системе привода могут использоваться редукторы и передаточные механизмы, момент сопротивления на выходном звене значительно отличается от момента, который должен развивать сам двигатель. Для упрощения анализа и расчётов все внешние нагрузки, действующие на систему, пересчитываются с учётом передаточного числа и КПД редуктора.

Приведение моментов позволяет точно определить пусковые и рабочие моменты, необходимые для нормального функционирования привода, а также избежать перегрузки двигателя. Это особенно важно при проектировании систем с переменными нагрузками или при выборе электродвигателя с требуемым запасом по мощности. Правильное приведение моментов способствует повышению надёжности, энергоэффективности и долговечности всей электромеханической системы [5].

*Приведение статических моментов и моментов инерции к валу двигателя.*

После выбора двигателя и редуктора рассчитаем статические моменты рабочей машины, приведенные к валу двигателя, по формуле:

$$M_{pc} = \frac{M_{p.ст}}{i_p} \quad (2.14)$$

где  $M_{p.ст}$  – статический момент рабочего органа;  $i_p$  – передаточное число редуктора.

$$M_{pc} = \frac{11,05}{16} = 0,691 \text{ Нм.}$$

С учётом потерь в редукторе статические моменты на валу двигателя рассчитываются в зависимости от режима работы электропривода. Момент на валу двигателя при работе с постоянной статической нагрузкой:

$$M_{bc} = \frac{M_{pc}}{\eta_p}. \quad (2.15)$$

$$M_{bc} = \frac{0,691}{0,83} = 0,832 \text{ Нм.}$$

При работе электропривода в тормозных режимах моменты на валу двигателя определяют по формуле:

$$M_{вст} = M_{pc} \cdot \eta_p \quad (2.16)$$

$$M_{вст} = 0,832 \cdot 0,83 = 0,573 \text{ Нм}$$

Приведенные статические моменты системы электропривод - рабочая машина рассчитывают для каждого участка с учетом режима работы электропривода по формуле:

$$M_c = M_{bc} + \Delta M_x \quad (2.17)$$

где  $\Delta M_x$  – момент потерь холостого хода двигателя.

$$\Delta M_x = (I_{1n} \cdot U_{1n} \cdot 3 \cdot \cos \varphi_n - P_n) / (3n_n / 9.55) \quad (2.18)$$

$$\Delta M_x = \frac{(42 \cdot 380 \cdot 3 \cdot 0.7 - 2200) \cdot 9.55}{3 \cdot 700} = 12.5 \text{ Нм}$$

С учетом потерь на ХХ статический момент на валу в двигательном режиме рассчитывается по формуле 2.17:

$$M_c = 0,832 + 12,5 = 13,3 \text{ Нм}$$

С учетом потерь на ХХ статический момент на валу в тормозном режиме рассчитывается по формуле:

$$M_c = 0,573 - 12,5 = -11,927 \text{ Нм}$$

Для каждого участка проведены расчеты, и все значения занесены в таблицу 2.5.

*Приведение моментов инерции и коэффициентов жесткости к валу двигателя.*

Необходимо привести моменты инерции всей системы к валу двигателя для того, чтобы заменить систему на эквивалентную.

Суммарный приведенный момент инерции:

$$J = \delta \cdot J_{\text{дв}} + J_{\text{пр}} \quad (2.19)$$

где  $J_{\text{пр}}$  – приведенный к валу двигателя момент инерции поступательно и вращательно движущихся частей системы, кг·м<sup>2</sup>;

$J_{\text{дв}}$  – момент инерции ротора выбранного двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $\delta$  – коэффициент, учитывающий момент инерции остальных моментов электропривода: тормозного шкива, муфт, редуктора, и т.д.  $\delta=1,3\dots1,5$ .

Учитывая:

$$J_{\text{пр}} = \frac{J_{\text{ро}}}{i_p^2} \quad (2.20)$$

Тогда:

$$J = 1,5 \cdot J_{\text{дв}} + m_1 \cdot \frac{V_p^2}{\omega_c^2} \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.21)$$

где  $\omega_c$  – установившаяся скорость двигателя, рад/с.

Установившуюся скорость двигателя находим по формуле:

$$\omega_c = i_p \cdot \frac{2 \cdot V_p}{D} \quad \text{кг} \cdot \text{м}^2 \quad (2.22)$$

При движении с рабочей скоростью  $V_p$ :

$$\omega_c^p = 16 \cdot \frac{2 \cdot 0,2}{0,1} = 64 \text{ рад/с} \quad (2.23)$$

Приведенный момент инерции с грузом при движении со скоростью  $V_p$ :

$$J = 1,5 \cdot 0,004 + 110 \cdot \frac{0,2^2}{64^2}$$

*Рассчитаем пусковые и тормозные моменты двигателя, которые требуются для разгона и торможения привода.*

Пусковой момент:

$$M_{\text{п}} = M_{\text{с}} + M_{\text{дин}} \text{ Нм.} \quad (2.24)$$

где  $M_{\text{с}}$  – статический момент сопротивления вращению, Н·м;  $M_{\text{дин}}$  – динамический момент, Н·м.

Динамический момент рассчитываем по формуле:

$$M_{\text{дин}} = J \cdot \frac{2 \cdot a_{\text{доп}} \cdot i_p}{D} \text{ Нм.} \quad (2.25)$$

$$M_{\text{дин}} = 0.024 \cdot \frac{2 \cdot 1 \cdot 16}{0,1} = 7,744 \text{ Нм.}$$

Пусковой момент:

$$M_{\text{п}} = 13,3 + 7,744 = 21,044 \text{ Нм.}$$

Тормозной момент:

$$M_{\text{т}} = M_{\text{дин}} - M_{\text{с}} \text{ Нм.} \quad (2.26)$$

$$M_{\text{т}} = 7,744 - 11,927 = -4,183 \text{ Нм}$$

Пусковой момент меньше максимально допустимого, значит, ускорения снижать не требуется.

Ни на одном участке момент при торможении или разгоне не оказался выше максимального момента двигателя.

Приведем крутильную жесткость рабочего вала к валу двигателя:

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{к}}}{j_p^2} = \frac{50000000}{16^2} = 200 \text{ кНм/рад} \quad (2.27)$$

Для каждого участка проведены расчеты, и все значения занесены в таблицу 2.5.

## **2.6 Предварительная проверка электродвигателя по производительности и нагреву**

Целями предварительной проверки является уточнение нагрузочных диаграмм момента и скорости двигателя с учетом момента инерции предварительно выбранного двигателя. Проверка позволяет удостовериться, что выбранный электродвигатель удовлетворяет требованиям по перегрузочной

способности и динамической устойчивости привода. Анализ пусковых и установившихся режимов работы помогает выявить возможные несоответствия в тепловых и энергетических характеристиках системы [6].

Рассчитаем время переходных процессов:

$$t_i = J \frac{\omega_c}{M_{cp} - M_c} \quad (2.28)$$

где  $J$  – суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  
 $\omega_c$  – установившаяся скорость двигателя,  $\text{рад/с}$ ;  $M_{cp}$  – средний момент двигателя,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;  $M_c$  – приведенный статический момент,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ .

Первый участок – разгон:

$$t_1 = J_1 \frac{\omega_c}{M_{п1} - M_c} = 0,024 \cdot \frac{64}{21,044 - 13,3} = 0,2 \text{ с.}$$

Третий участка – торможение:

$$t_3 = 0,024 \cdot \frac{64}{-4,183 - (-11,927)} = 0,2 \text{ с.}$$

Рассчитаем угол поворота вала двигателя за время переходного процесса:

$$\alpha_i = \frac{\omega_c \cdot t_i}{2} \quad (2.29)$$

Угол поворота вала на соответствующих участках пути:

$$\alpha_1 = \frac{64 \cdot 0,2}{2} = 25,6 \text{ рад.}$$

$$\alpha_3 = \frac{64 \cdot 0,2}{2} = 25,6 \text{ рад.}$$

Расчёт времени работы в режиме установленной скорости:

$$t_y = \frac{\alpha - (\alpha_{п1} + \alpha_{т3})}{\omega_c} \quad (2.30)$$

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

$$\alpha = 2L \frac{j_p}{D} = 2 \cdot 4,2 \cdot \frac{16}{0,1} = 1344 \text{ рад.} \quad (2.31)$$

Рассчитаем угол поворота двигателя, приходящийся на установившиеся режим:

$$\alpha_{ур} = \alpha_{\Sigma} - (\alpha_1 + \alpha_3) = 1344 - (25,6 + 25,6) = 1292,8 \text{ рад.}$$

Тогда время работы с установившейся скоростью:

$$t_2 = \frac{\alpha_{ур}}{\omega_c} = \frac{1292,8}{64} = 20,8 \text{ с.}$$

Таблица 2.5 – Расчетные параметры

Уч. движения		Открытие			Закрытие		
Расч. данные	Обозн.	Пуск	Уст.реж.	Тормож.	Пуск	Уст.реж.	Тормож.
Скорость РО, м/с	$V_{ро}$	-	0,2	-	-	0,2	-
Момент стат. РО, Нм	$M_{рост}$	11,05			11,05		
Момент ин. РО, кгм <sup>2</sup>	$J_{рост}$	4,95			4,95		
Скорость двиг., рад/с	$\omega_c$	-	64	-	-	64	-
Стат. момент раб. машины, Нм	$M_{ст}$	0,691			0,691		
Момент в двиг. и торм. режимах, Нм	$M_{вс}$	0,832		0,573	0,832		0,573
Стат. момент на валу, Нм	$M_c$	13,3		-11,927	13,3		-11,927

Проверка нагрева двигателя выполняется по значению среднеквадратичного момента:

$$M_{ср.кв} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m M_i^2 \cdot t_i}{\sum_{i=1}^m t_i}} \leq M_{доп}. \quad (2.32)$$

$$M_{доп} = M_{кат} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_{кат}}{ПВ_{\phi}}} \quad (2.33)$$

Тогда:

$$M_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{21,044^2 \cdot 0,2 + (-4,183)^2 \cdot 0,2 + \dots + (-4,183)^2 \cdot 0,2}{41,68}} = 4,41 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Фактическое значение ПВ:

$$\text{ПВ}_\phi = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{t_{\text{ц}}} \cdot 100\% = \frac{81,1}{45} \cdot 100\% = 46\%$$

Определим момент двигателя при  $\text{ПВ}_{\text{кат}}$ , ближайшем к  $\text{ПВ}_\phi$ :

$$M_{\text{кат}} = \frac{P_{\text{кат}}}{\omega_{\text{кат}}} = \frac{2200}{\frac{2\pi \cdot 700}{60}} = 30 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

Допускаемый момент:

$$M_{\text{доп}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{40}{46}} = 27,975 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$4,41 < 27,975$$

## 2.7 Выбор основных элементов силовой цепи

Частотный преобразователь выбирается по каталогу Schneider Electric, при этом мощность преобразователя должна быть равной или превышать номинальную мощность двигателя [7].

Выбран преобразователь частоты типа ATV310HU22N4E, его параметры приведены в таблице 2.6, а внешний вид показан на рисунке 2.2.

Таблица 2.6 – Параметры частотного преобразователя

Тип ЧП	P, кВт	I <sub>макс</sub> , А	I <sub>ном</sub> , А	I <sub>м.вых</sub> , А	P, Вт	m, кг.
ATV310HU22N4E	2,2	8,3	5,5	8,8	220	1,1



Рисунок 2.2 – Внешний вид ЧП

Применение частотного преобразователя (ЧП) ATV310HU22N4E для управления электродвигателем откатных ворот позволяет обеспечить движение створки с разными скоростями – высокой (рабочей) при открытии и закрытии, а также низкой (монтажной и сервисной). Движение ворот становится плавным, без резких рывков и ускорений, что снижает механические нагрузки и повышает надёжность всей системы [7].

Цикл работы привода откатных ворот с ЧП включает несколько этапов:

В исходном состоянии ворота находятся в покое. При подаче управляющей команды ЧП получает сигнал, указывающий направление движения, и исполнительные элементы подают питание на обмотки двигателя. Частотный преобразователь через управляющее реле подаёт сигнал готовности к пуску. Двигатель получает напряжение, формирующее необходимый удерживающий момент.

Как только ток в обмотках достигает нужного значения, система управления подаёт сигнал для снятия блокировки механического стопора (если используется). Затем ЧП формирует на обмотках двигателя напряжение, которое обеспечивает плавный разгон створки ворот с требуемым ускорением.

При достижении определённой точки (например, вблизи конечного положения) ЧП получает команду на снижение скорости и обеспечивает плавное замедление створки. Она продолжает движение с пониженной скоростью до момента точной остановки. После этого частотный преобразователь формирует напряжение для окончательного торможения, обеспечивая надёжную фиксацию створки в конечном положении.

После остановки двигателя ЧП передаёт сигнал об окончании движения управляющему контроллеру. В этот момент механический стопор (если он используется) срабатывает, двигатель отключается, и все управляющие сигналы снимаются, завершая цикл движения.

Для обеспечения безопасности во время работы системы возможно применение встроенных защитных функций, таких как контроль перегрузки и перегрева двигателя.

Частотный преобразователь также может быть интегрирован в систему удалённого мониторинга, что облегчает диагностику и техническое обслуживание.

Наличие плавного пуска и остановки позволяет продлить ресурс не только электродвигателя, но и всех механических узлов ворот.

Кроме того, ЧП позволяет реализовать режим частичного открытия створки, что удобно при ограниченном проезде.

Гибкость настройки параметров через интерфейс управления делает систему адаптируемой к различным условиям эксплуатации.

При проведении сервисных или аварийных работ предусмотрена возможность подачи питания на двигатель через специальные коммутационные устройства, позволяющие использовать низкую скорость для безопасного перемещения створки.

Использование ЧП даёт важные преимущества:

- расширяется диапазон регулирования скорости и повышается точность остановки створки ворот;
- уменьшаются пусковые токи двигателя, сокращается энергопотребление и продлевается срок службы оборудования;
- постоянная скорость движения ворот поддерживается вне зависимости от их массы или внешних условий;
- отпадает необходимость в дополнительных механических инерционных элементах (маховиках), что снижает тепловыделение и нагрузку на привод;
- механический стопор срабатывает только при полной остановке створки, снижая износ и повышая надёжность системы.

## 2.8 Расчет статических характеристик электропривода

При питании асинхронного двигателя от частотного преобразователя промышленная частота преобразуется в регулируемое напряжение с регулируемой частотой. При этом в преобразователе происходят потери напряжения и мощности. Обычно такие преобразователи имеют внутреннюю обратную связь, благодаря которой выходное напряжение и частота практически не изменяются при изменении нагрузки двигателя. Поэтому далее будем рассматривать напряжение и частоту на статоре двигателя как независимые от нагрузки [9]. Синхронная скорость вращения двигателя зависит от частоты питающей сети и числа полюсов:

$$\omega_{0H} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}}{p} \quad \text{рад/с.} \quad (2.33)$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $f_{1H}$  – номинальная частота напряжения статора, Гц.

$$\omega_{0H} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{4} = 78.5 \quad \text{рад/с}$$

Номинальный момент на валу МН:

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H} \quad \text{Н·м} \quad (2.34)$$

$$M_H = \frac{2200}{\omega_H 78,5} = 30 \quad \text{Н·м}$$

Номинальный электромагнитный момент:

$$M_{эмн} = \frac{3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} \cos \varphi - 3 \cdot I_{1H}^2 \cdot r_1}{\omega_{0H}} \quad \text{Н·м} \quad (2.35)$$

$$M_{\text{эмн}} = \frac{3 \cdot 380 \cdot 6,2 \cdot 0,7 - 3 \cdot 6,2^2 \cdot 19,2}{78,5} = 34,821$$

Номинальное относительное скольжение:

$$S_H = \frac{\omega_{0H} - \omega_H}{\omega_{0H}} \quad (2.36)$$

$$S_H = \frac{78,5 - 73,3}{78,5} = 0,066$$

Критическое скольжение:

$$S_k = S_H (\mu_k + \sqrt{\mu_k^2 - 1}) \quad (2.37)$$

где  $\mu_k$  – перегрузочная способность асинхронного двигателя.

$$\mu_k = \frac{M_k}{M_H} \quad (2.38)$$

$$\mu_k = \frac{66}{30} = 2,2$$

$$S_k = 0,066 \cdot (2,2 + \sqrt{2,2^2 - 1}) = 0,276$$

В выбранной системе электропривода ПЧ-АД требуется определить частоту  $f_1$  и напряжение на статоре  $U_1$ , при которых механические характеристики будут проходить через точки установившихся режимов. Напряжение на статоре определяется законом  $U_1/f_1 = \text{const}$ .

Таблица 2.6 – Расчетные характеристики для функционирования в установленных режимах

Расчетные параметры/ Участок работы		Участок работы					
		Открытие			Закрытие		
		1	2	3	4	5	6
Заданные точки							
$\omega_{\text{зад}}$	Рад/с		64			64	
	О.е.		0,873			0,871	
$M_{\text{зад}}$ на валу	Нм	0,832			0,832		
	О.е.	0,029			0,029		

Продолжение таблицы 2.6

Расчетные данные							
$\omega_{\text{зад}}$	О.е.	-	0,817	-	-	0,817	-
	Рад/с	-	64,128	-	-	64,128	-
$f_1$	О.е.	-	0,817	-	-	0,817	-
	Гц	-	40,861	-	-	40,861	-
$U_1$	О.е.	-	0,817	-	-	0,817	-
	В	-	310,43	-	-	310,43	-

Синхронная скорость:

$$\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{зад}} + \Delta\omega_{\text{ест}} = \omega_{\text{зад}} + M_{\text{зад}} \cdot S_H \quad \text{рад/с} \quad (2.39)$$

Участок 2:

$$\omega_{\text{зад}} = 0,832 + 0,029 \cdot 0,066 = 0,817$$

Участок 5:

$$\omega_{\text{зад}} = 0,832 + 0,029 \cdot 0,066 = 0,817$$

Учитывая:

$$\omega_{\text{зад}} = \omega_{\text{зад}} \cdot \omega_{\text{ОН}} \quad (2.40)$$

Участок 2:

$$\omega_{\text{зад}} = 0,817 \cdot 78,5 = 64,128$$

Участок 5:

$$\omega_{\text{зад}} = 0,817 \cdot 78,5 = 64,128$$

Частота и напряжение на статоре при  $U_1/f_1 = \text{const}$ :

$$\alpha = \frac{f_1}{f_{1H}} = \omega_{\text{зад}} \quad (2.41)$$

$$f_1 = \alpha \cdot f_{1H} \quad \text{Гц} \quad (2.42)$$

$$U_1 = \alpha \cdot U_{1H} \quad B \quad (2.43)$$

Участок 2:

$$\alpha = 0.817$$

$$f_1 = 0,817 \cdot 50 = 40,846 \text{ Гц}$$

$$U_1 = 0,78 \cdot 380 = 310,43 \text{ В}$$

Участок 5:

$$\alpha = 0.817$$

$$f_1 = 0,817 \cdot 50 = 40,846 \text{ Гц}$$

$$U_1 = 0,78 \cdot 380 = 310,43 \text{ В}$$

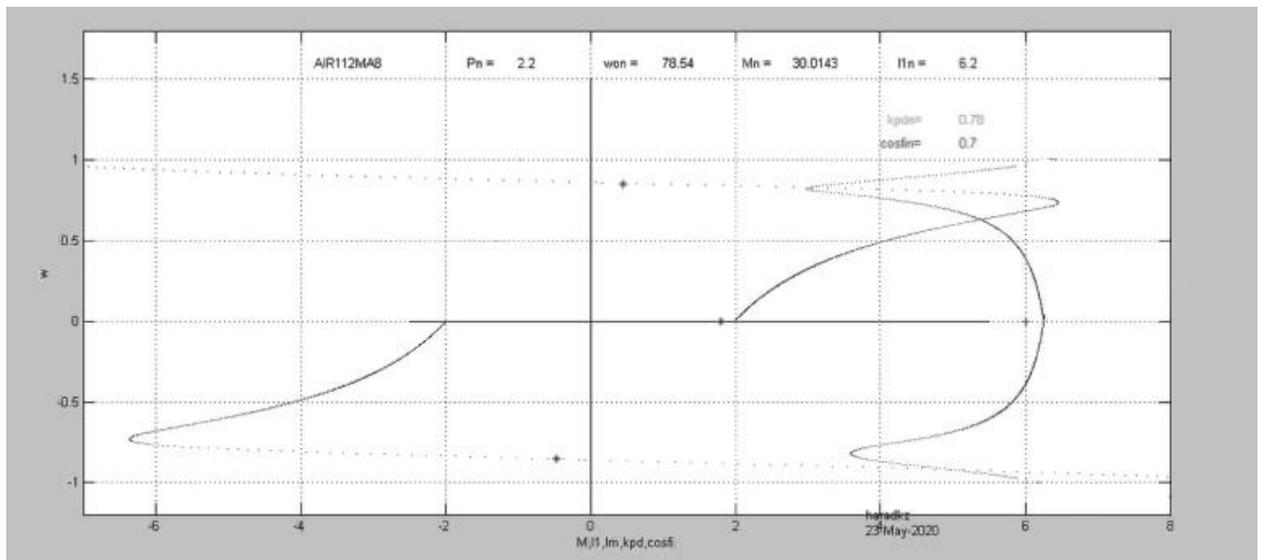


Рисунок 2.3 – Синтетическая характеристика процессов открытия и закрытия ворот

## 2.9 Расчет параметров схемы подключения для обеспечения запуска и торможения двигателя

При питании электродвигателя от индивидуального преобразователя частоты становится возможным плавное регулирование напряжения, что позволяет формировать переходные процессы пуска и торможения за счёт управляемого изменения напряжения. В разомкнутой системе «преобразователь – двигатель» обычно реализуется линейный режим нарастания напряжения управления, при котором напряжение питания двигателя изменяется линейно.

Для реализации линейного изменения напряжения управления на вход преобразователя подают сигнал с интегрального задатчика интенсивности (ЗИ). При подаче на вход ЗИ ступенчатого управляющего сигнала  $U_{ЗД}$  выходное напряжение изменяется по линейной зависимости. Когда выходное напряжение ЗИ достигает уровня  $U_{ЗД}$ , процесс его нарастания прекращается [16].

Такой подход обеспечивает плавный разгон электродвигателя, что особенно важно для приводов с повышенной инерционностью.

При необходимости можно реализовать аналогичный режим и для торможения, задавая линейное снижение напряжения.

Применение интегрального задатчика позволяет гибко настраивать временные характеристики пуска и останова без изменения аппаратной части схемы.

Это особенно актуально при модернизации существующих приводных систем, где необходимо минимальное вмешательство в конструкцию.

В современных преобразователях частоты также реализуются цифровые ЗИ, обеспечивающие высокую точность формирования управляющих сигналов.

Кроме того, корректно настроенный ЗИ способствует снижению электромеханических перегрузок и увеличивает срок службы как двигателя, так и редуктора.

Таким образом, выходное напряжение ЗИ выступает в роли управляющего сигнала для преобразователя, а величина  $U_{ЗД}$  определяется базовой постоянной времени ЗИ  $T_{ЗИ}$ , которая численно соответствует времени достижения выходным напряжением преобразователя базового уровня  $U_{Н}$ , начиная с нулевого значения.

Базовая постоянная задатчика интенсивности:

$$T_{ЗИ} = \frac{J \cdot \omega_{0H}}{M_{дин}}. \quad (2.44)$$

Рассчитаем величину постоянной задатчика интенсивности для участков, на которых происходит пуск/торможение заготовки.

Пуск и торможение:

$$T_{ЗИ} = \frac{0,024 \cdot 78,5}{7,744} = 0,245$$

## 2.10 Расчет переходных процессов электропривода

Расчёт переходных процессов электропривода является важной частью анализа работы автоматизированных систем, особенно в случаях, когда привод должен обеспечивать точное, надёжное и безопасное управление механизмом. Переходные процессы охватывают такие режимы, как пуск, торможение, реверс и изменение нагрузки, при которых возникают кратковременные динамические изменения тока, напряжения и момента. Проведение такого расчёта позволяет

предсказать поведение системы в неустановившихся режимах и выявить возможные перегрузки или неустойчивости. Особенно важно учитывать переходные процессы в системах, где требуется высокая точность позиционирования и ограничение пиковых нагрузок. Это, в свою очередь, даёт возможность оптимизировать выбор двигателя, редуктора, элементов управления и защитных устройств. Кроме того, расчёт переходных процессов способствует повышению надёжности электропривода, снижению энергопотребления и увеличению срока службы оборудования. Таким образом, он играет ключевую роль в обеспечении устойчивой и эффективной работы всей системы. Корректно выполненный расчёт также позволяет задать оптимальные параметры частотного преобразователя и настроить режимы плавного пуска и останова. Это особенно важно для приводов, работающих с инерционными или чувствительными к перегрузке механизмами, такими как откатные ворота [12].

Расчет и построение характеристик переходных процессов двигателя производится с помощью программы zipchad.m в программе Matlab.

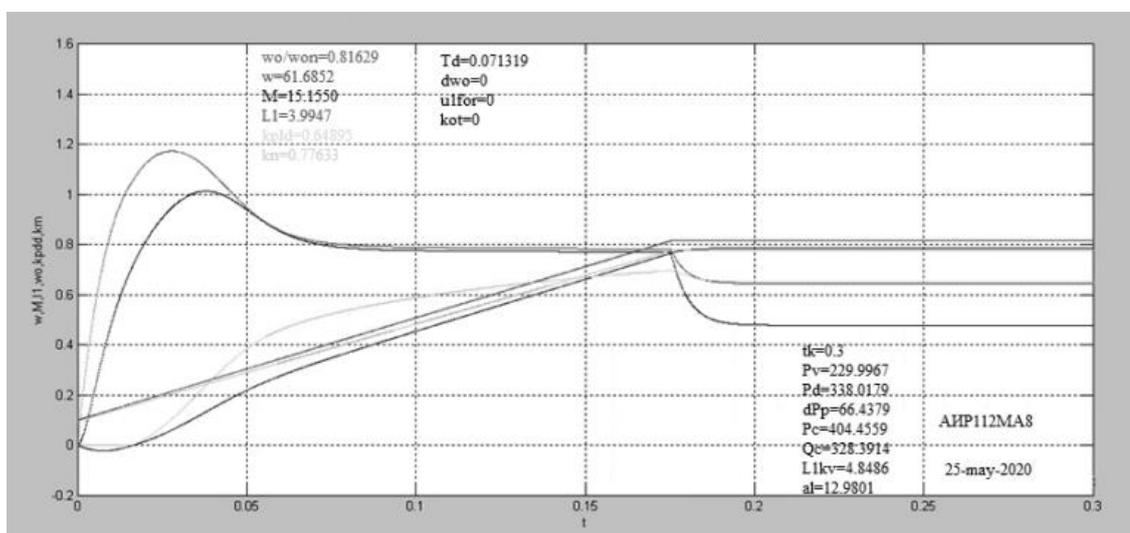


Рисунок 2.4 – Переходные процессы, сопровождающие открытие и закрытие ворот

## 2.11 Расчёт энергетических показателей электропривода

Имея исходные данные электродвигателя (таблица 2.3), рассчитаем активную, реактивную и полную мощность, потребляемую из сети.

Полная мощность:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 6,2 = 4080 = 4,080 \text{ кВт} \quad (2.45)$$

Активная мощность:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 6,2 \cdot 0,7 = 2856=2,856 \text{ кВт} \quad (2.46)$$

Реактивная мощность:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{4,080^2 - 2,856^2} = 2,914 \text{ кВт} \quad (2.47)$$

КПД системы:

$$\eta = \frac{P_n}{P} \cdot 100\% = 0,77 \quad (2.48)$$

Годовое энергопотребление:

$$Э_{\text{потр}} = P_n \cdot T_{\text{год}} = 2,2 \cdot 50 = 110 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год} \quad (2.49)$$

Номинальные потери в системах управления электроприводом с учетом коэффициента полезного действия:

$$\Delta P_n = P_n \cdot \frac{1-\eta}{\eta} = 2,2 \cdot \frac{1-0,77}{0,77} = 0,66 \text{ кВт} \quad (2.50)$$

Потери холостого хода и номинальные нагрузочные потери:

$$\Delta P_{\text{xx}} = 0,55 \cdot \Delta P_n = 0,55 \cdot 0,66 = 0,363 \text{ кВт} \quad (2.51)$$

$$\Delta P_{\text{нн}} = 0,67 \cdot \Delta P_n = 0,67 \cdot 0,66 = 0,442 \text{ кВт} \quad (2.52)$$

Максимальные потери активной мощности:

$$\Delta P_m = \Delta P_{\text{xx}} + \Delta P_{\text{нн}} \cdot \kappa_3^2 = 0,363 + 0,442 \cdot 0,8^2 = 0,65 \text{ кВт} \quad (2.53)$$

## 2.12 Принципиальная схема электропривода

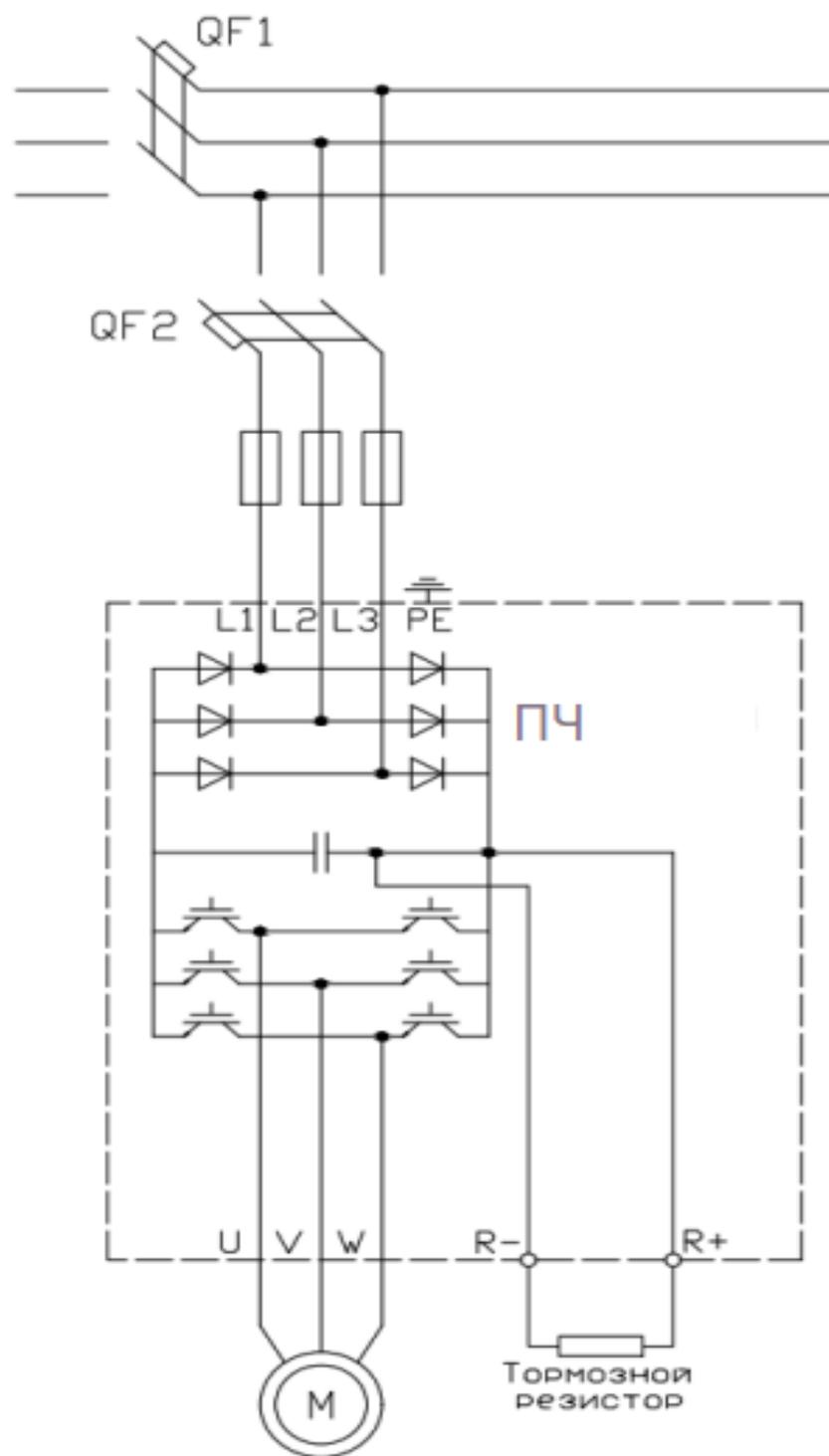


Рисунок 2.5 – Принципиальная схема электропривода

### 3 Экономика часть

#### 3.1 Определение стоимости основного оборудования автоматизированного электропривода пассажирского лифта

Сметная стоимость оборудования в дипломном проекте определяется на основе выбора оборудования для откатных ворот, выполненного в технологической части. Расчёты проводятся с использованием данных таблицы 3.1.

Капитальные затраты на установку откатных ворот включают:

- расходы на приобретение, доставку и монтаж оборудования, а также средств автоматизации, с учётом стоимости монтажных материалов, работ и накладных расходов;
- затраты на дорогостоящие инструменты и вспомогательное оборудование.

Таблица 3.1 – Данные для расчёта капитальных затрат на оборудование и инструменты

Наимен-ие	Кол-во, шт	Цена, тенге	НДС (12%) тенге	Доставка и монтаж оборудования (10%), тенге	Итого, тенге	Амортизация (10%), тенге	Сумма, тенге
Элдвигатель АИР 112МА8	1	108000	12960	10800	131760	13176	144936
Редуктор Ч-40	1	90000	10800	9000	109800	10980	120780
ЧП ATV310HU2 2N4E	1	120000	14400	12000	146400	14640	161040
ВСЕГО					387960		426756

#### 3.2 Сравнительный анализ стоимости электрооборудования откатных ворот

Проведение сравнительного анализа стоимости электрооборудования откатных ворот является важным этапом при проектировании и выборе оптимальной системы привода. Такой анализ позволяет оценить экономическую целесообразность различных технических решений с учётом требуемых характеристик, условий эксплуатации и срока службы оборудования. Это

способствует не только снижению первоначальных затрат, но и уменьшению последующих расходов на обслуживание и ремонт. Кроме того, обоснованный выбор компонентов повышает общую надёжность и эффективность работы автоматизированной системы.

Цены на электрооборудование приведены по данным официальных прейскурантов, актуальных на 2025 год. Стоимость компонентов электропривода для обоих вариантов представлена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Стоимость оборудования приводов для откатных ворот

Система управления ТП-Д		Система управления ЧП-Д	
Наименование оборудования	Стоимость за единицу оборудования, тыс. тенге	Наименование оборудования	Стоимость за единицу оборудования, тыс. тенге
Приводной двигатель АИР 112МВ6	160	Приводной двигатель АИР 112МА8	108
Редуктор Ч-63	130	Редуктор Ч-40	90
Тиристорный преобразователь Т-63-220-25	150	Частотный преобразователь ATV310HU22N4E	120
Общая сумма	440	Общая сумма	318
Разница			122

Таким образом, из таблицы видно, что система управления ЧП-Д на 122 тыс. тенге дешевле чем система ТП-Д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дипломной работе были решены следующие задачи: выполнен анализ технологического процесса автоматизации откатных ворот; рассчитаны статические моменты сопротивления при открытии и закрытии ворот и предварительно определена мощность электродвигателя; обоснован выбор типа электрического привода; подобран электродвигатель и проведена его предварительная проверка по нагреву и производительности; выбран частотный преобразователь; разработана структурная схема электрического привода откатных ворот и выполнены расчёты его параметров. Проведены расчёты статических характеристик электрического привода и построены естественные характеристики асинхронного электродвигателя. Особое внимание уделено выбору оптимальных параметров частотного преобразователя для обеспечения плавного пуска и торможения ворот, а также надёжности системы. Были проанализированы различные режимы работы привода, включая аварийные и сервисные режимы, что позволило оценить его эксплуатационную гибкость. Кроме того, выполнено сравнение возможных вариантов компоновки привода и выбрано оптимальное решение с точки зрения технической надёжности и удобства обслуживания.

Выполнены расчёты частоты и напряжения двигателя в системе «Частотный преобразователь – асинхронный электродвигатель»; с помощью программы Simulink Matlab исследована виртуальная модель электрического привода откатных ворот и сделаны выводы по его переходным характеристикам. Рассчитаны энергетические показатели системы. В экономической части проведена оценка технико-экономической эффективности применения автоматизированного электрического привода откатных ворот и рассчитаны капитальные затраты на установку привода. Проведено сравнение с альтернативным вариантом привода.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Виды гаражных ворот. Интернет ресурс. Доступен по ссылке: [https://worota.com.ua/page/vidy-garazhnykh-vorot.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://worota.com.ua/page/vidy-garazhnykh-vorot.html?utm_source=chatgpt.com)
- 2 Конструкция откатных ворот. Интернет ресурс. Доступен по ссылке: [https://xn----7sbf6cakadesq.xn--p1ai/stati/konstruktsiya-otkatnykh-vorot/?utm\\_source=chatgpt.com](https://xn----7sbf6cakadesq.xn--p1ai/stati/konstruktsiya-otkatnykh-vorot/?utm_source=chatgpt.com)
- 3 Яни А.В. Регулируемый асинхронный электропривод: Учебное пособие, - СПб.: Лань, 2016 – 464 с.
- 4 Бекишев Р.Ф. Электропривод: Учебное пособие, -Люберцы: Юрайт, 2016.-301 с.
- 5 Неменко А.В. механические компоненты электропривода машин: расчет и проектирование: Учебное пособие, Неменко А.В. – М.: Учебник, 2017. -80 с.
- 6 Москаленко В.В., системы автоматического управления электропривода – М.: Инфра-М, 2018. – 576 с. Кисаримов Р.А. Электропривод. Справочник. – М.: «Академия», 2009. – 458 с.
- 7 Малафеев С.И. Основы автоматики и системы автоматического управления. - М.: «Академия», 2010. – 560 с.
- 8 Цыба Ю.А., Сагитов П.И. «Элементы теории автоматического управления»: Учебное пособие для ВУЗов. – Алматы: КАУ, 2006. – 144 с.
- 9 Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2005. – 302 с.
- 10 Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 2010. - 416 с.
- 11 Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода.- СПб.: Энергоатомиздат. Санкт – Петербургское отд. 2006. - 496 с.
- 12 Цыба Ю.А. Автоматическое управление электромеханическими системами. Учебное пособие для ВУЗов. – Алматы: АИЭС, 2008. – 77 с.
- 13 Водовозов А.М. Элементы систем автоматики. - М.: 2008. – 509 с.
- 14 Анучин А.С. Системы управления электроприводов, Вологда: Инфера-Инженерия, 2015. – 373 с.
- 15 Васильев Б.Г. Электропривод. Энергетика электропривода: Учебник – М.: Солон-пресс, 2015 – 268 с.
- 16 Яни А.В. Регулируемый асинхронный электропривод: Учебное пособие, - СПб.: Лань, 2016 – 464 с.
- 17 СТ КазНИТУ – 09 – 2023. Учебная работа. Общие требования к структуре, оформлению, изложению и содержанию текстовых и графических материалов.