

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление

6В07103 – Автоматизация и роботизация

Келген Диас Айдарұлы

Разработка двухдвигательного электропривода согласованного привода согласованного
вращения

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
к дипломному проекту

6В07103 – Автоматизация и роботизация

Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление



ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

к дипломному проекту

На тему: «Разработка двухдвигательного электропривода согласованного привода
согласованного вращения»

6B07103 – Автоматизация и роботизация

Выполнил

Келген Д. А.

Рецензент

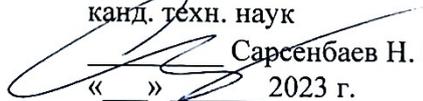
Зав. каф. ЭМЭП PhD доктор

 Шыныбай Ж. С.

«08» 06 2023 г.

Научный руководитель

канд. техн. наук

 Сарсенбаев Н. С.

« » 2023 г.

Алматы 2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

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

Институт Автоматики и информационных технологий

Кафедра Автоматизация и управление

6B07103 – Автоматизация и роботизация



ЗАДАНИЕ

на выполнение дипломного проекта

Обучающемуся Келгену Д.А.

Тема: «Разработка двухдвигательного электропривода согласованного вращения»

Утверждена приказом Б. Жаутикова № 408-П/Ө от «23» ноября 2022 г.

Срок сдачи законченной работы

«25» мая 2023 г.

Исходные данные к дипломному проекту: данные входных и выходных сигналов двигателей.

Перечень подлежащих разработке в дипломном проекте вопросов:

- а) Технологический процесс двухдвигательного электропривода согласованного вращения;
- б) разработка функциональной схемы конвейера;
- в) анализ и синтез систем автоматического регулирования привода;
- г) разработка программного обеспечения логической САУ двигателя.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):
функциональная схема автоматизации; функциональная схема САУ; структурная схема САУ.

Рекомендуемая основная литература:

1 Воронов А.А. Теория управления. – Москва: Наука, 2019. – 495 с.

2 Бессекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. – С-П.:
«Профессия», 2004. – 752 с.

ГРАФИК
подготовки дипломного проекта

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Технологическая часть работы конвейеров	15 апреля 2023 г.	Выполнено
Расчет характеристик	10 мая 2023 г.	Выполнено
Техническая часть	15 мая 2023 г.	Выполнено

Подписи

консультантов и нормоконтролера на законченный дипломный проект с указанием относящихся к ним разделов проекта

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата	Подпись
Технологический раздел	Н.С. Сәрсенбаев канд. техн. наук	31.05.23	
Раздел расчётной части	Н.С. Сәрсенбаев канд. техн. наук	31.05.23	
Нормоконтролер	А.Б. Жеңіс маг. техн. наук, ассистент	1.06.23	

Научный руководитель

 Сәрсенбаев Н. С.

Задание принял к исполнению обучающийся

 Келген Д. А.

Дата

«2» июня 2023 г.

АНДАТПА

Дипломдық жұмыс координацияланған айнарудың қос қозғалтқышты электр жетегінің автоматты басқару жүйесін әзірлеуге арналған. Жұмыста электр жетегі басқару объектісі ретінде қарастырылады, электр жетегі арқылы автоматты басқарудың функционалдық схемасы, реттеудің технологиялық процестерінің математикалық моделі, АБЖ – кернеу, технологиялық процестерді реттеу және екі қозғалтқышты электр жетегінің басқару алгоритмі әзірленді. келісілген айналым құрастырылады.

Дипломдық жұмысты орындау барысында координацияланған айнарудың екі моторлы электржетегінің ерекшеліктері зерттеледі, сонымен қатар координацияланған айнарудың екі қозғалтқышты электр жетегінің автоматты басқаруының әртүрлі әдістері қарастырылады.

Екінші бөлімде есептелген математикалық модель талданады. Басқару жүйесінің тұрақтылығы, сапасын бағалау, сонымен қатар жүйе реттегішінің синтезі анықталады.

Matlab ортасында математикалық модельді бастапқы пішінде және контроллермен модельдеу нәтижелері алынды.

АННОТАЦИЯ

Дипломная работа предназначена для разработки системы автоматического регулирования двухдвигательным электроприводом согласованного вращения. В работе рассмотрен электропривод в качестве объекта управления, разработана функциональная схема автоматического регулирования электроприводом, математическая модель технологических процессов регулирования, САР – напряжения составлен алгоритм регулирования технологических процессов и управления двухдвигательным электроприводом согласованного вращения.

В процессе выполнения дипломной работы будут изучены особенности двухдвигательного электропривода согласованного вращения, а также рассмотрены различные методы автоматического управления двухдвигательным электроприводом согласованного вращения.

Во втором разделе идет анализ рассчитанной математической модели. Определены устойчивость, оценки качества системы управления, а также синтез регулятора системы.

В среде Matlab были получены результаты моделирования математической модели в исходном виде и с регулятором.

ANNOTATION

The thesis is designed to develop an automatic control system for a twin-engine electric drive of coordinated rotation. The paper considers an electric drive as a control object, develops a functional diagram of automatic control by an electric drive, a mathematical model of technological processes of regulation, ACS - voltage, an algorithm for regulating technological processes and controlling a two-motor electric drive of coordinated rotation is compiled.

In the process of completing the thesis, the features of a two-motor electric drive of coordinated rotation will be studied, as well as various methods of automatic control of a two-motor electric drive of coordinated rotation will be considered.

The second section analyzes the calculated mathematical model. Stability, assessment of the quality of the control system, as well as the synthesis of the system regulator are determined.

In the Matlab environment, the results of modeling the mathematical model in the original form and with the controller were obtained.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Технологическая часть	8
1.1 Общая информация об электроприводах	8
1.2 Классификация электроприводов	11
1.3 Ленточные конвейеры как объект автоматического управления	12
2 Расчетная часть	18
2.1 Моделирование двухдвигательного электропривода	18
2.2 Анализ передаточной функции	36
2.3 ПИД-регулирование	38
3 Техническая часть	42
3.1 Написание программы для контроллера	42
Заключение	45
Список использованной литературы	46
Приложение А	47

ВВЕДЕНИЕ

Цель работы: Целью настоящей работы является разработка автоматизированной системы управления двухдвигательного электропривода согласованного вращения.

В настоящее время широко распространены электроприводы, и их численность и разнообразие технических и функциональных характеристик приводят к увеличению требований к системе в целом. Эти требования включают точность, динамические свойства, надежность, энергопотребление, габаритные показатели и другие аспекты. Отдельной категорией электроприводов, применяемых в производстве, являются высокоточные или прецизионные электроприводы.

Свойства электропривода определяются типом двигателя, методом управления двигателем, принципом построения системы электропривода и используемыми компонентами, такими как датчики, устройства электропитания, регуляторы. Усовершенствование электроприводов может осуществляться как комплексно, учитывая взаимодействие всех компонентов системы, так и индивидуально с учетом особенностей отдельных компонентов. Актуальность работы: определяется необходимостью совершенствования систем управления электроприводом с использованием принципов мехатроники

Задачи, поставленные в работе:

- Проведение анализа функциональных особенностей индукторных двигателей двойного питания, использование различных способов управления электроприводом;
- Исследование разомкнутой и замкнутой систем двухдвигательного электропривода согласованного вращения на устойчивость;
- Подбор ПИД регулятора;
- Исследование оценок качеств системы с ПИД регулятором и подведение итогов.

1 Технологическая часть

1.1 Общая информация об электроприводах

Электропривод - это система, предназначенная для управления работой машин и устройств с целью осуществления определенного технологического процесса. Его компонентами являются электродвигатель, устройство преобразования энергии, система управления и передача сигналов. В настоящее время электрические приводы занимают ведущее положение в промышленном производстве и повседневной жизни благодаря своей широкой распространенности и общей мощности. Современные характеристики электроприводов включают применение полупроводниковых устройств для регулирования скорости и использование микропроцессорных контроллеров для управления ими.

Электрические приводы широко применяются в различных отраслях промышленности, включая машиностроение, металлургию, нефтегазовую промышленность, энергетику и другие. Они также находят применение в бытовых устройствах, таких как стиральные машины, холодильники, кондиционеры и другие бытовые приборы, где выполняют функцию управления их работой.

При использовании современных электрических приводов достигается высокая эффективность, точность и надежность работы, что способствует повышению производительности и экономической эффективности процессов производства. Кроме того, электрические приводы являются экологически безопасными и энергоэффективными в сравнении с другими типами приводов.

Однако, при проектировании и эксплуатации электрических приводов необходимо учитывать несколько важных аспектов. Необходимо выбрать подходящий тип привода для конкретной задачи, обеспечить безопасность работы и надежность системы, а также оптимизировать параметры для достижения экономической эффективности.

Современные электроприводы представляют собой автоматизированные системы, которые обязательно включают систему автоматического управления. Эта система выполняет различные функции, включая пуск, остановку и защиту двигателя, а также управление технологическими процессами. Такие особенности приводят к упрощению кинематических цепей машин и совершенствованию систем управления электроприводами.

Передающее устройство включает в себя механические передачи и соединительные муфты, которые необходимы для передачи механической энергии, вырабатываемой двигателем, исполнительному механизму.

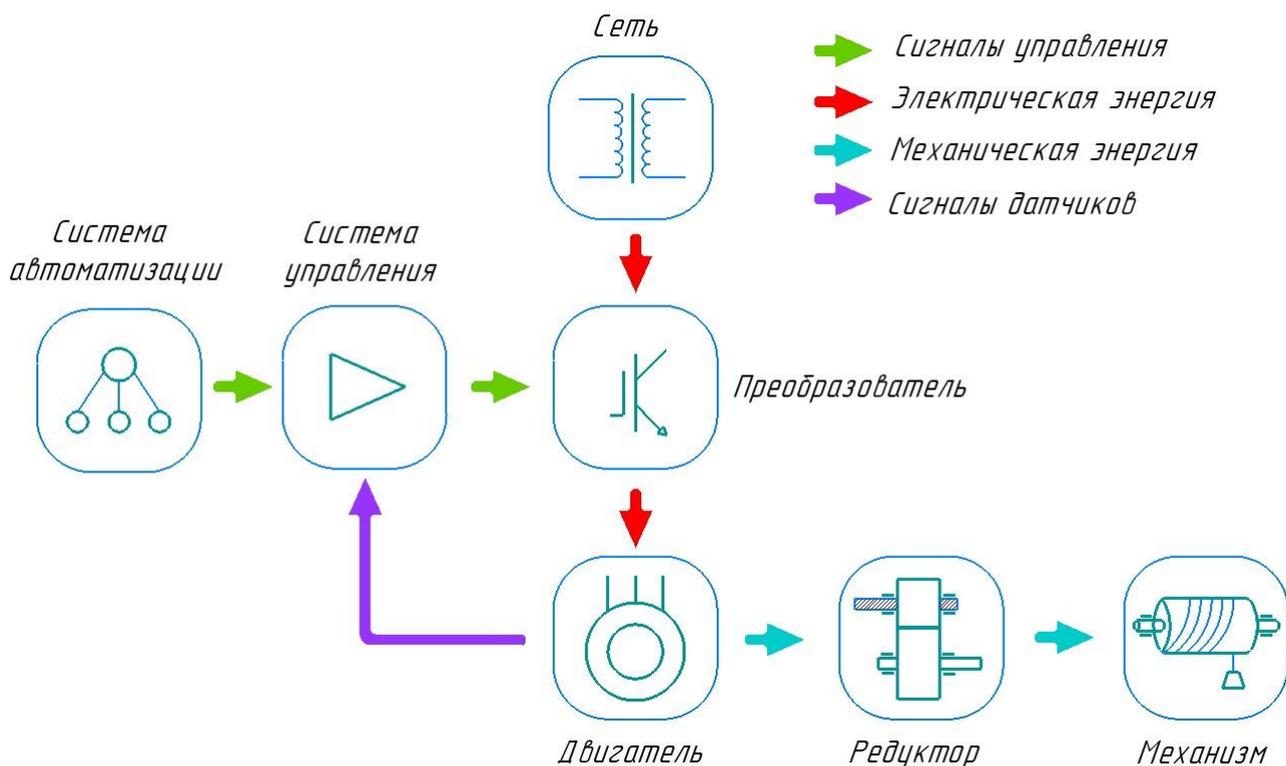


Рисунок 1.1 - Структура современного электропривода

Стоит рассмотреть примеры, типы, классификацию электроприводов, и предъявленные к ним требования.

Функциональными частями являются:

- 1) электродвигатель;
- 2) механическая часть;
- 3) система управления.

Исполнительный механизм - это устройство, которое перемещает рабочую часть в соответствии с сигналом, поступающим от управляющего механизма. Рабочие элементы способны двигаться как поступательно, так и вращательно в определенном диапазоне, чтобы оказывать воздействие на объект. Обычно электрический привод с механизмом исполнения включает в себя электродвигатель, редуктор, датчики положения и обратной связи. Современные электрические приводы стремятся к уменьшению веса, повышению эффективности, экономичности, долговечности и надежности.

Свойства электрического привода включают:

- 1) Статические свойства, включающие механические и электромеханические характеристики.
- 2) Механические свойства, отражающие зависимость скорости вращения от момента сопротивления.

3) Электромеханические свойства, представляющие зависимость скорости вращения от тока.

4) Динамические свойства, показывающие зависимость координат электрического привода в определенный момент времени во время переходного процесса.

Электрические приводы обычно классифицируются по различным параметрам и свойствам, присущим им. Таким образом, электрические приводы могут быть классифицированы по следующим критериям:

1) Виду движения (вращательные, поступательные, реверсивные, возвратно-поступательные).

2) Принципу регулирования (нерегулируемые, регулируемые, следящие, программно-управляемые, адаптивные, позиционные).

3) Виду передаточного устройства (редукторные, безредукторные, электрогидравлические, магнитогиродинамические).

4) Виду преобразовательного устройства (вентильные, выпрямитель-двигатель, частотный преобразователь-двигатель, генератор-двигатель, магнитный усилитель-двигатель).

5) Методу передачи энергии (групповой, индивидуальный, взаимосвязанный).

6) Уровню автоматизации (автоматизированные, неавтоматизированные, автоматические).

7) Роду тока (постоянный ток, переменный ток).

8) Важности операций (главный или вспомогательный).

Компьютерная платформа представляет собой среду, в которой необходимо запускать новые программные фрагменты или объектные модули, учитывая ограничения и возможности данной среды. Интегрированная среда разработки включает в себя следующие компоненты:

1) текстовый редактор;

2) компилятор и/или интерпретатор;

3) средства автоматизации сборки;

4) отладчик.

Передаточное устройство состоит из механических передач и соединительных муфт, которые необходимы для передачи механической энергии от двигателя к исполнительному механизму.

Преобразовательное устройство отвечает за управление электрической энергией, поступающей из сети, с целью регулирования режимов работы двигателя и механизма. Оно является исполнительной частью системы управления электроприводом, отвечающей за энергетические аспекты.

Управляющее устройство представляет собой слаботочную информационную часть системы управления. Оно отвечает за сбор и обработку информации о воздействиях и состоянии системы, а также

генерацию управляющих сигналов для преобразовательного, электродвигательного и передаточного устройств.

1.2 Классификация электроприводов

Существуют различные виды электроприводов, включая:

□ Виды по типу тока: с постоянным/переменным током (в зависимости от используемого типа тока);

□ Виды по характеру движения: линейные, дискретные, с вращательным движением (в соответствии с осуществляемым движением);

□ Виды по типу передаточного механизма: электрогидравлические, магнитогидродинамические, с использованием редукторов;

□ Виды по значимости использования: главные, вспомогательные, для передачи;

□ Виды по типу управления и назначения: автоматизированные, программируемые, адаптивные, позиционные, следящие;

□ Виды по числу рабочих органов: групповые, индивидуальные, взаимосвязанные, с несколькими двигателями, с электрическим валом.

Момент, создаваемый двигателем, определяется взаимодействием двух потоков:

□ Статорный поток, создаваемый током в обмотках статора;

□ Роторный поток, создаваемый высокоэнергетическими постоянными магнитами.

Механическая характеристика прямолинейна, но ее жесткость меньше, чем у двигателя в системе генератор-двигатель (Г-Д).

При снижении нагрузочного момента происходит режим прерывистых токов, для которого не действуют обычные соотношения, и реальные характеристики указываются штрихованными линиями.

Качественное регулирование координат в системе подчиненного регулирования (П-Д) достигается путем регулирования каждой координаты с помощью отдельного регулятора и соответствующей обратной связи. Это означает, что каждая координата регулируется в собственном замкнутом контуре, и требуемые характеристики электропривода в статическом и динамическом режимах могут быть достигнуты путем выбора схемы и параметров регулятора этой координаты и обратной связи. Для ограничения тока и момента необходимо ограничить сигнал, поступающий из внешнего контура.

Схема электропривода с подчиненным регулированием имеет выходную регулируемую координату - скорость. Управляющая часть схемы состоит из двух замкнутых контуров: контура регулирования тока (момента),

включающего регулятор тока (РТ) и датчик тока (ДТ), и контура регулирования скорости, включающего регулятор скорости (РС) и датчик скорости (тахогенератор) (ТГ).



Рисунок 1.2 – Модель двухдвигательного электропривода согласованного вращения

1.3 Ленточные конвейеры как объект автоматического управления

В рамках механизмов передачи товаров или продукции на ленточных конвейерах широко применяются двухдвигательные электроприводы с согласованным вращением. В настоящее время исследование рабочих процедур и внедрение ленточных конвейеров являются очень актуальной темой. Это связано с тем, что транспортные и технологические системы на предприятиях взаимосвязаны и формируют единую систему. Современный подход к производству, основанный на поточном методе, широко опирается на конвейерную транспортировку товаров или продукции между различными этапами производственного процесса.

Система автоматизации сложных конвейерных систем на промышленных предприятиях обычно разрабатывается с учетом конкретных требований технологического процесса. Она управляет активацией и деактивацией различных конвейеров в строго определенной последовательности, согласованной с производственными операциями. Ее основные задачи включают поддержание требуемой скорости перемещения грузов и, при необходимости, синхронизацию скоростей различных

конвейеров. Кроме того, при необходимости система обеспечивает функциональную блокировку технологического и аварийного оборудования.

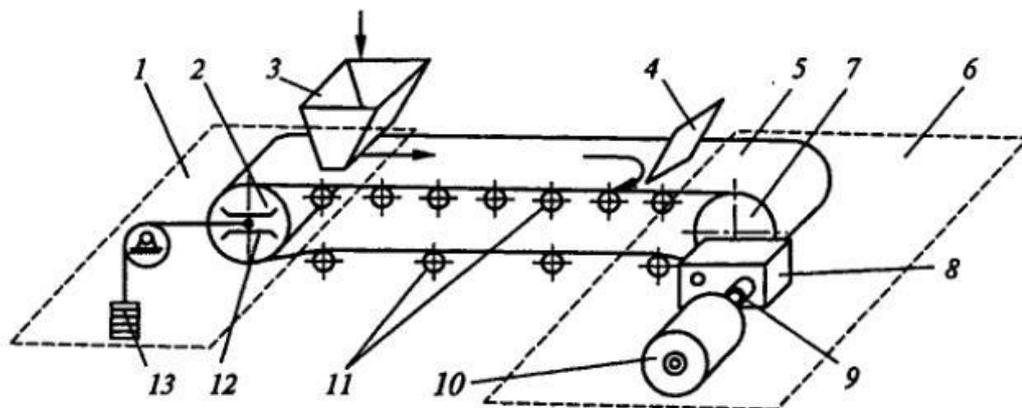


Рисунок 1.3 – Ленточный конвейер

Ленточные конвейеры, изображенные на рисунке 2.1, используются в нескольких отраслях промышленности, таких как агломерационные фабрики, металлургические доменные печи и тепловые станции, для перемещения сыпучих материалов.

Гибкая лента, обозначенная как (5) проходит между натяжной станцией (1) и приводной станцией (6), охватывая барабаны (2) и (7). Барабан (2), который может перемещаться в направляющих (12), прикладывает к ремню силу предварительного натяжения под действием груза (13). Это натяжение обеспечивает передачу тягового усилия от барабана приводной станции без проскальзывания. Для предотвращения провисания как верхней рабочей, так и нижней холостой ветви ленты на пути конвейера установлены поддерживающие ролики (11). Барабан приводной станции связан с электродвигателем (10) через редуктор (8). Упругая муфта (9) соединяет валы двигателя и редуктора для смягчения возможных ударов при пуске и торможении. Груз подается на ленту через воронку (3) и выгружается с помощью плуга (4). Длина ленточного конвейера может достигать 2-3 километров, скорость движения ленты составляет от 1,5 до 3 метров в секунду, ширина ленты - 2 метра. Производительность таких конвейеров достигает 700 тонн в час.

Ленточные конвейеры не ограничиваются горизонтальной транспортировкой; они также используются в ситуациях, когда угол наклона превышает 20° , что создает риск просыпания груза. В таких случаях устанавливается скребковый ленточный конвейер.

Канат, подвешенный на специальных опорах, играет важную роль в данной дороге, выполняя функции монорельса. Чтобы передать тяговое усилие от двигателя к грузовому устройству, используется дополнительный канат, связывающий приводные и натяжные станции канатной дороги. В процессе производства часто используется группа конвейеров, объединенных

общим технологическим циклом в единую поточно-транспортную систему (ПТС), как показано на рисунке 2.2. В рамках ПТС конвейеры могут быть организованы в несколько параллельных (конвейеры 2 и 3, 6 и 7, 9 и 10) или последовательных (5, 4, 1) цепей. Важно, чтобы движение всех тянущих органов конвейеров было строго согласованным, иначе возможно нарушение технологического процесса, в результате чего качество выпускаемой продукции может снизиться. Чтобы избежать таких проблем при запуске или остановке ПТС, необходимо включать двигатели конвейеров в определенной последовательности. Например, в схеме, изображенной на рисунке 2.2.а, первым должен быть включен двигатель М1, а затем М4, М8, М2, М3, М5, М9, М10, М6 и М7. При остановке ПТС с минимальными перерывами и постоянным содержанием компонентов, необходимо отключать двигатели в следующей последовательности: М3, М5, М2, М4, М9, М10, М8, М6, М7 и М1.

На большой протяженности используется ПТС с конвейерами, расположенными последовательно изображенная на рисунке 2.2 б).

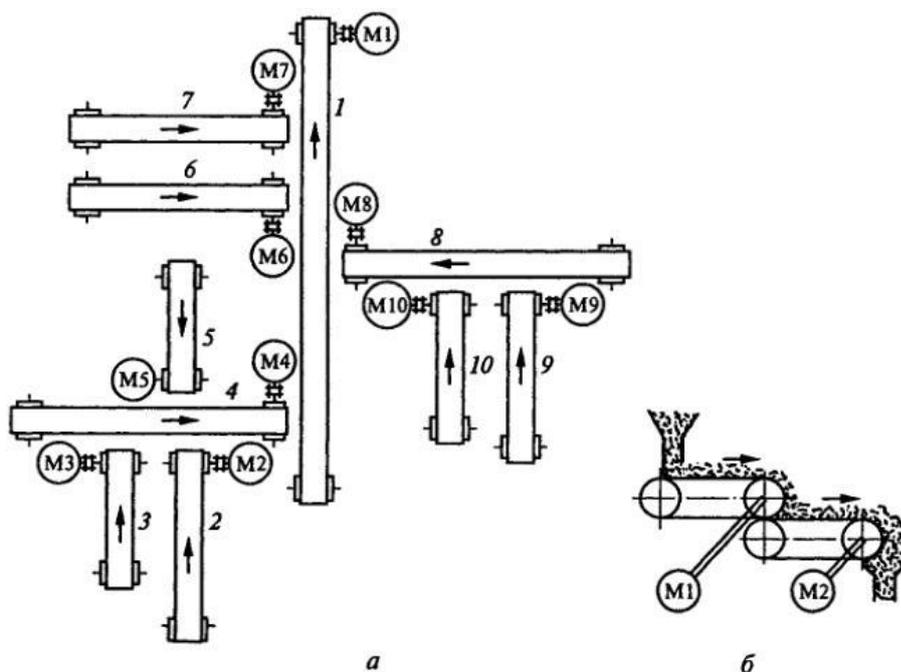


Рисунок 1.4 – Конвейерные линии в процессе смесеобразования в металлургическом производстве

Давайте рассмотрим вариант автоматизации сложной разветвленной конвейерной системы, включающей участковые и магистральные линии с промежуточными бункерами-питателями. Каждая участковая линия состоит из ленточного конвейера типа 1Л-80, имеющего длину 300 метров и ширину ленты 800 мм. Эти участковые линии предназначены для перевозки породы,

которая поступает с добычного участка, напрямую в аккумулирующий бункер-питатель типа ШМ-50 вместимостью 50 м³. Магистральная линия, в свою очередь, состоит из ленточного конвейера типа 1Л-100, протяженностью 700 метров и шириной ленты 1000 мм. Эта магистральная линия предназначена для перевозки породы из бункера-питателя прямо к месту погрузки.

На рисунке 2.3 представлена технологическая схема стабилизации грузопотока в разветвленной конвейерной системе с использованием промежуточных бункеров-питателей.

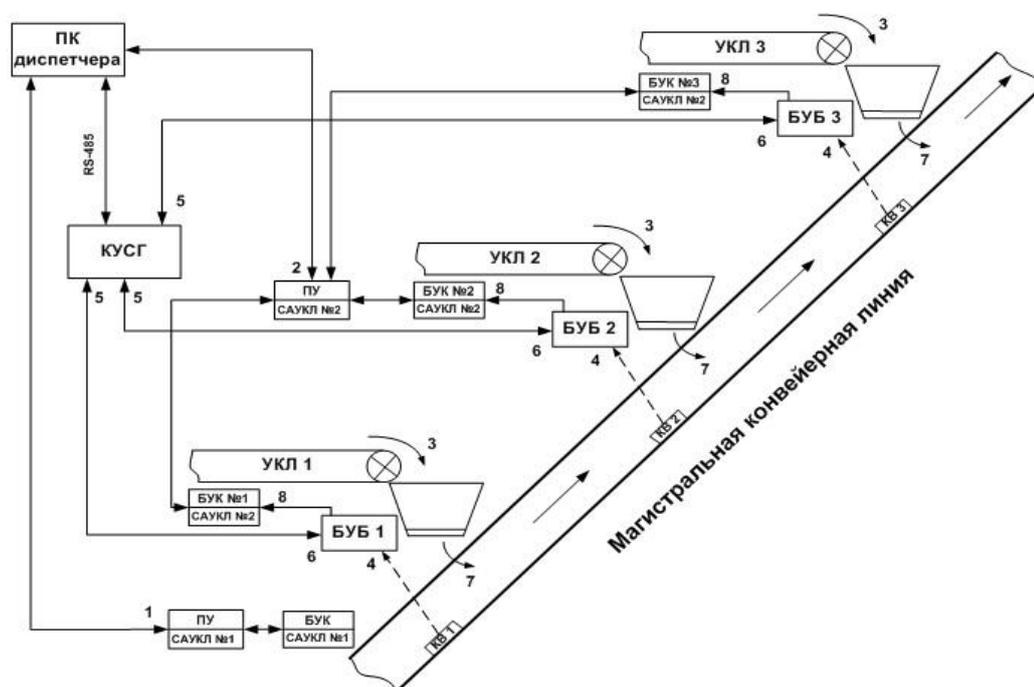


Рисунок 1.5 - Технологическая схема стабилизации грузопотока разветвленной конвейерной линии с помощью промежуточных емкостей бункеров-питателей КУСГ – Координирующее устройство стабилизации грузопотока; УКЛ – Участковая конвейерная линия; САУКЛ - Система автоматизированного управления конвейерными линиями; ПУ – Пульт управления; БУК – Блок управления конвейером; БУБ – Блок управления бункером; КВ – Конвейерные весы

Принцип работы автоматизированной системы следующий: с компьютера диспетчера шахты отправляется сигнал 1 на пульт управления (ПУ) первой системы автоматического управления конвейерной линией (САУКЛ) для включения магистральной линии. Затем аналогичным образом отправляется сигнал 2 на ПУ второй системы САУКЛ для включения участковой конвейерной линии. Горная масса 3, поступающая с добычного

участка, транспортируется с помощью участковой конвейерной линии в аккумулирующий бункер-питатель. Для преобразования силы тяжести бункера и его содержимого в электрический сигнал применяются тензометрические преобразователи ВДУ, установленные под опорами бункера-питателя (БП).

Эти преобразователи преобразуют силу тяжести бункера и его содержимого в электрический сигнал. Этот сигнал, который представляет информацию о состоянии загрузки бункера, анализируется в блоке управления бункером, вместе с сигналом 4, поступающим с конвейерных весов магистрального конвейера, указывающим на состояние загрузки ленты. Затем информация от каждого блока управления бункером 5 поступает на координирующее устройство стабилизации грузопотока, где происходит анализ данных, и с координирующего устройства выдается команда 6 на блок управления соответствующего бункера для открытия или закрытия шиберов III этого бункера. После этого стабилизированный грузопоток 7 передается по магистральной конвейерной линии к погрузочному пункту. Важно отметить, что если уровень угля в бункере достигает аварийного значения и шибер бункера полностью открыт, с блока управления этого бункера поступает сигнал 8 на блок управления участковой конвейерной линией для ее отключения, а также для оповещения диспетчера шахты о возникшей аварии.

Зависимости применения конвейеры могут использоваться различных условиях, которые крайне неблагоприятными. Например, размещены на открытом воздухе большой высоте, часто бывает горнодобывающих предприятиях ленточными или высокогорными дорогами. Также работать помещениях температурой, повышенной влажностью загрязненностью, красильных сушильных или термических цехах. В таких использовать электрооборудование, удовлетворяет перечисленным соответствующее типу исполнению. Приводные являются наиболее частью оборудования, требуется степень безопасности, простоты обслуживания надежности работы. частности, должны закрытое и пусковой момент.

На рисунке 2.4 представлен процесс стабилизации грузопотока конвейерной линии, демонстрирующий работу системы в действии.

Принцип работы конвейеров основан на перемещении грузов или материалов по непрерывной ленте или цепи, что обеспечивает их транспортировку с одного места на другое. Основные компоненты конвейерной системы включают в себя следующие элементы: лента или цепь, приводы, барабаны.

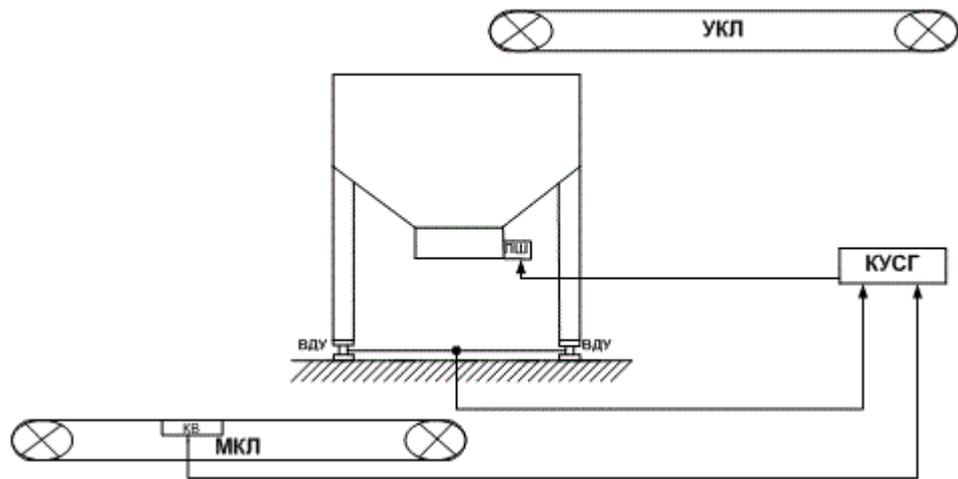


Рисунок 1.6 - Процесс стабилизации грузопотока конвейерной линии
 КУСГ – Координирующее устройство стабилизации грузопотока; УКЛ –
 Участковая конвейерная линия; МКЛ – Магистральная конвейерная линия;
 ВДУ – Весовые датчики уровня бункера; ПШ – Привод шибера бункера; КВ
 – Конвейерные весы.

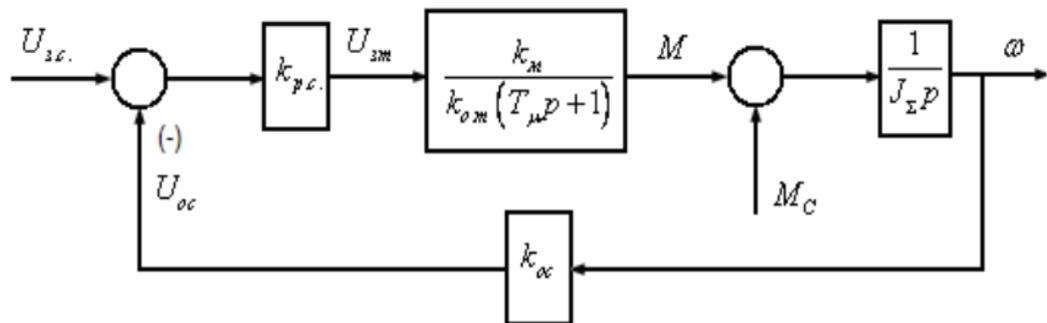


Рисунок 1.7 - Структурная схема регулируемого электропривода

- $U_{зс}$ - напряжение задания на скорость;
- $U_{зм}$ - напряжение задания на ток;
- $U_{ос}$ - напряжение обратной связи по скорости;
- $k_{рс}$ - коэффициент усиления регулятора скорости;
- $k_{ос}$ - коэффициент обратной связи по скорости;
- $k_{от}$ - коэффициент обратной связи по току;
- T_{μ} - постоянная времени, равная постоянной времени T_0 , соответствующей открытому состоянию транзисторного ключа;
- k_m - коэффициент передачи по моменту

2 Расчетная часть

2.1 Моделирование двухдвигательного электропривода согласованного вращения

В современной промышленности асинхронные (ДСАД) в основном используются на двух механических характеристиках. Изменение скорости производится переключением секций трехфазных обмоток. При этом электронные устройства (регуляторы напряжения преобразователи частоты) практически не применяются. Возникает необходимость регулирования частоты вращения в ограниченном диапазоне основных характеристик. Анализ работы двигателей показывает возможность управления ДСАД разделением статорных независимые обмотки.

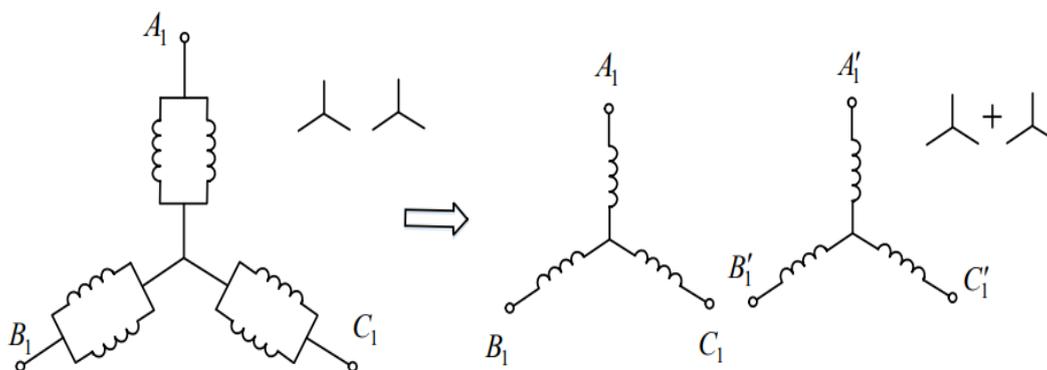


Рисунок 2.1 - Изменение схемы включения обмоток ДСАД

В этом случае на одну группу статорных обмоток (A_1, B_1, C_1) подается питание, а вторую группу обмоток (A'_1, B'_1, C'_1) можно использовать для регулирования скорости. Для анализа работы ДСАД была составлена схема замещения.

Обмотки статоров генераторных двигателей (ГД) в данной системе подключены к сети с прямым чередованием фаз, в то время как вспомогательные обмотки подключены с обратным чередованием. При неравномерных нагрузках на механизмы скорости вращения роторов, обозначенные как ω_1 и ω_2 , различаются. В результате возникает электродвижущая сила (ЭДС), которая порождает уравнительные токи, создающие моменты M_1 и M_2 . Эти моменты противодействуют причине, вызвавшей их по закону Ленца, пока скорости ω_1 и ω_2 не выравняются.

Уравнения, связывающие потокосцепления, токи и напряжения в комплексной форме [1]:

$$\left. \begin{aligned}
 \dot{U}_{1.1} &= R_{1.1} \dot{I}_{1.1} + j\omega_0 \dot{\Psi}_{1.1} \\
 \dot{U}_{1.2} &= R_{1.2} \dot{I}_{1.2} + j\omega_0 \dot{\Psi}_{1.2} = Z \dot{I}_{1.2} \\
 \dot{U}_2 &= 0 = R_2 \dot{I}_2 / S + j\omega_0 \dot{\Psi}_2 \\
 \dot{\Psi}_{1.1} &= (L_M + L_{1.1\sigma}) \dot{I}_{1.1} + L_M (\dot{I}_{1.2} + \dot{I}_2) \\
 \dot{\Psi}_{1.2} &= (L_M + L_{1.2\sigma}) \dot{I}_{1.2} + L_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_2) \\
 \dot{\Psi}_2 &= (L_M + L_{2\sigma}) \dot{I}_2 + L_M (\dot{I}_{1.1} + \dot{I}_{1.2})
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Был выбран ленточный конвейер с двухдвигательным электроприводом согласованного вращения в качестве объекта управления. Далее мы рассмотрим автоматическое регулирование загрузки этого конвейера.

Скорость изменения на разветвлениях 1 и 2 конвейера сильно зависит от длины ленты. При коротких конвейерах, длиной несколько десятков метров, графики скорости на разветвлениях 1 и 2 будут похожи друг на друга (см. рис. 2.2, а). Ветвь 2 начнет двигаться с некоторым задержанием по сравнению с ветвью 1 из-за упругой деформации ленты, но скорости на разветвлениях быстро выравниваются с некоторыми колебаниями.

По мере достижения установившейся скорости всеми участками конвейера, упругое натяжение ленты снижается. Однако возврат запасенной энергии может привести к увеличению скорости ленты по сравнению с установившейся скоростью и вызвать колебания (см. рис. 2.2, б). Такой переходный процесс в тяговом органе нежелателен, так как приводит к повышенному износу ленты и в некоторых случаях может привести к ее разрыву. В связи с этим важно установить жесткие ограничения на ускорения системы при пуске и других переходных процессах в электроприводе ленточных конвейеров. Для соответствия этим требованиям требуется более сложная система управления электроприводом, которая включает многоступенчатые панели управления для асинхронных двигателей с фазным ротором, дополнительные нагрузочные и пусковые устройства и т.д.

Кроме того, в качестве датчика скорости используется типовой датчик ДКС, который представляет собой синхронный тахогенератор, приводимый в действие движущейся лентой. Для различных функций на конвейере используются различные датчики, такие как ДЗ (электронный), ДЛ (КСЛ-2), ДН (динамометр с двумя контактами, первый из которых срабатывает при недопустимо низком, а второй – при недопустимо высоком натяжении ленты), ДТ (концевой выключатель) и ДЭ (реле срабатывания электрозащиты). Эти датчики являются электроконтактными и выполняют дискретные действия в системе.

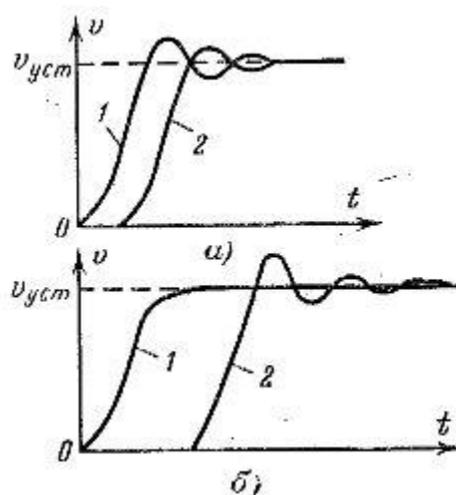


Рисунок 2.2 - Диаграммы скорости различных участков ленточного конвейера при пуске

Для ограничения ускорений в электроприводе ленточных конвейеров при пуске применяется реостатное управление (см. рис. 4, а). Плавное ускорение системы достигается с помощью перехода с одной пусковой характеристики на другую.

В определенных ситуациях более эффективным может быть ограничение ускорения системы электропривода путем дополнительного торможения вала двигателя во время пуска. Это обусловлено тем, что создание дополнительного тормозного момента (МТ) позволяет снизить динамический момент (см. рис. 2.3, б). Анализ графиков показывает, что искусственное снижение ускорения системы путем подтормаживания приводит к уменьшению колебаний скорости в набегающей и сбегаящей ветвях конвейера.

По завершении пуска источник дополнительного тормозного момента должен быть отключен от вала двигателя, чтобы предотвратить его нежелательное влияние.

Эффективное управление ускорением системы в электроприводах ленточных конвейеров играет важную роль в обеспечении безопасной и стабильной работы. Ограничение ускорений помогает предотвратить излишнее напряжение и износ ленты, а также снижает вероятность разрыва. Для достижения оптимальных результатов рекомендуется использовать более сложные системы управления электроприводами, включающие многоступенчатые панели управления, дополнительные нагрузочные и пусковые устройства. Такой подход обеспечивает точное регулирование ускорений и гарантирует долговечность и надежность работы конвейерной системы в различных условиях эксплуатации.

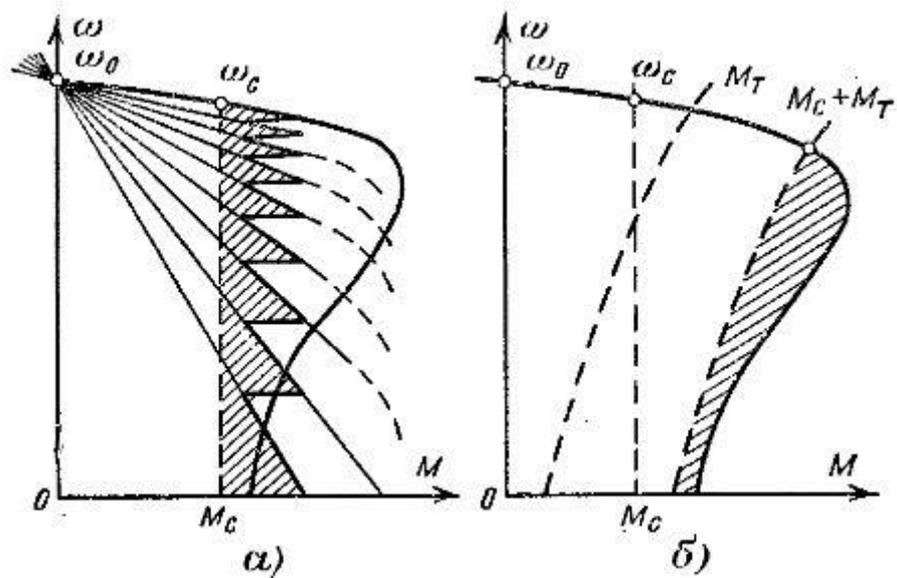


Рисунок 2.3 - К способам пуска ленточных конвейеров

Предположим, что имеется три приводные станции и требуется, чтобы все двигатели обеспечивали одинаковые тяговые усилия. В этом случае двигатели должны быть размещены в точке 0 и на расстоянии 0-1 и 0-2 от нее соответственно (рис 2.4, а). Во время работы конвейера, если механические характеристики двигателей полностью совпадают, каждый из них создает примерно одинаковое тяговое усилие $(F_n - T_0)/3$.

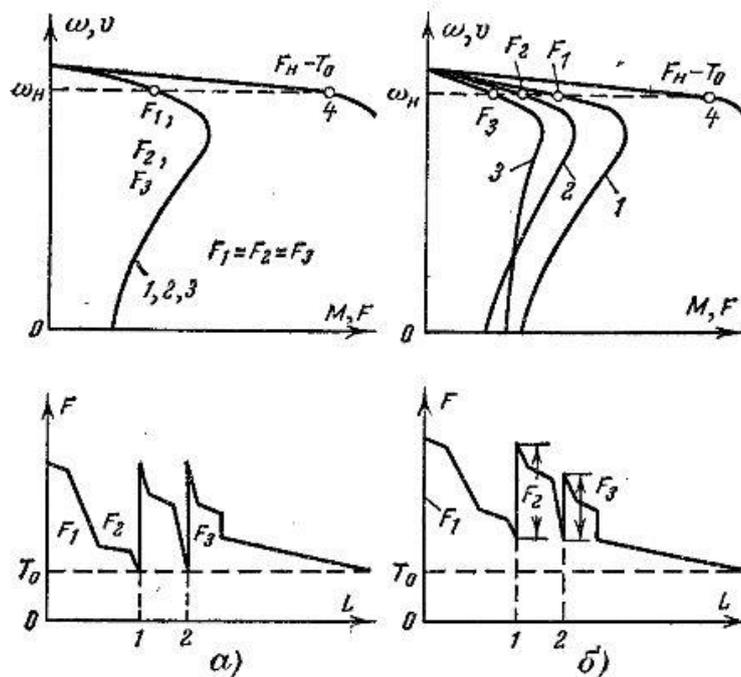


Рисунок 2.4 - Графики распределения нагрузки в тяговом органе цепного конвейера

Механические характеристики двухдвигательного электропривода конвейера представлены на рисунке 7. Характеристики 1 и 2 являются естественными, в то время как характеристики 1' и 2' получены с добавлением дополнительного сопротивления в цепь ротора двигателя. Суммарный момент и тяговое усилие, развиваемые двигателями, остаются одинаковыми как при жестких характеристиках 1 и 2, так и при мягких характеристиках 1' и 2'. Однако при мягких характеристиках более равномерно распределяется нагрузка между двигателями.

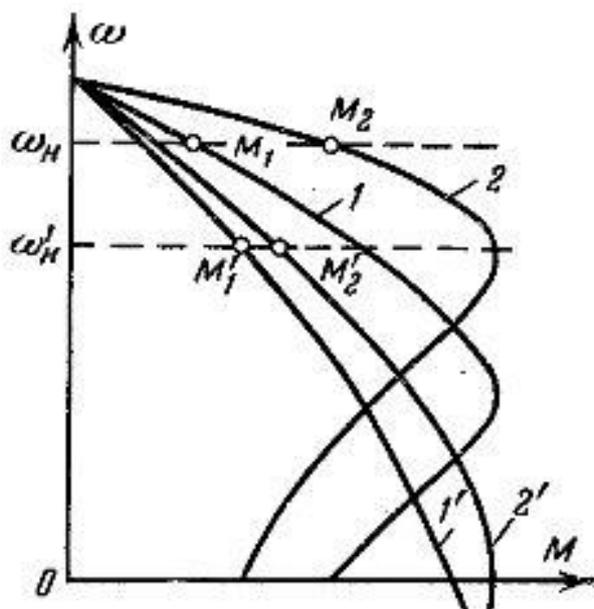


Рисунок 2.5 - Распределение нагрузки между двигателями конвейера при различной жесткости их характеристик

Пульсации грузопотоков, поступающих от источников, приводят к недоиспользованию конвейеров по производительности, т.е. средняя производительность $Q_{ср}$ конвейера может быть значительно ниже номинальной $Q_{ном}$.

Коэффициент использования конвейера по производительности определяется по выражению:

$$k_{и} = \frac{Q_{ср}}{Q_{ном}} \quad (2)$$

При постоянной скорости движения ленты конвейера из уравнения (2) можно получить выражение:

$$k_{И} = \frac{q_{ср}}{q_{ном}} \quad (3)$$

где $q_{ср}$, $q_{ном}$ – средняя и номинальная погонная загрузка ленты конвейера.

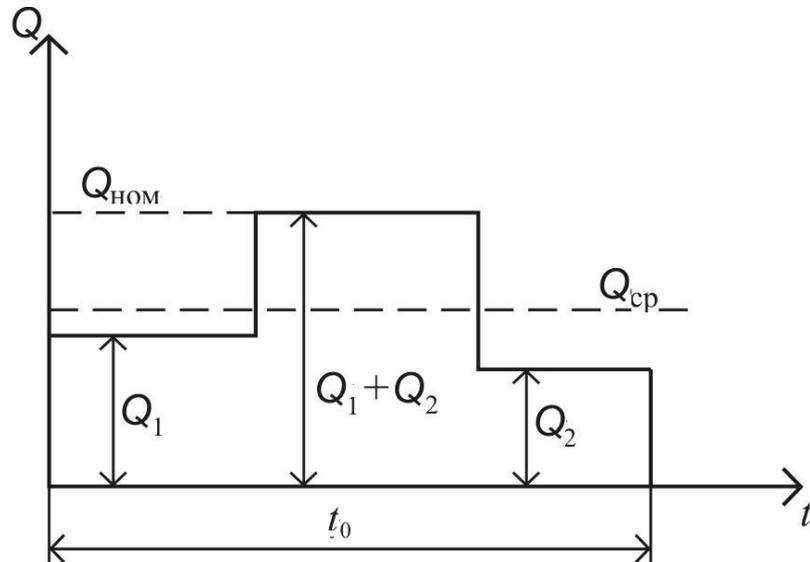


Рисунок 2.6 - Пример графика нагрузки конвейера, принимающего грузопотоки Q_1 и Q_2 от двух источников

При неполной загрузке фактический пробег ленты конвейера всегда будет больше номинального при одном и том же количестве транспортированного материала:

$$L_{ср} = \frac{G}{q_{ср}} > L_{ном} = \frac{G}{q_{ном}} \quad (4)$$

где G – количество транспортированного материала.

При автоматическом управлении загрузкой ленты конвейеров по принципу поддержания на заданном уровне погонной загрузки обеспечивается:

Увеличение срока службы ленты конвейера:

$$\Delta T_C \% = \frac{1 - k_{И}}{k_{И}} \cdot 100 \% \quad (5)$$

Для определения мощности двигателя для конвейера воспользуемся формулой:

$$P = \frac{k_3 \gamma Q H}{1000 \eta_H \eta_{II}} \quad (6)$$

где k_3 - коэффициент запаса (1,1÷1,4);

γ - плотность жидкости, Н/м³ (для Н₂О = 9810 Н/м³);

Q - производительность конвейера, м³/с, 240 м³/с;

H - напор насоса, м, 150 м;

η_{II} - КПД передачи ($\eta_{II} = 1$);

η_H - КПД.

$$P = \frac{k_3 \gamma Q H}{1000 \eta_H \eta_{II}} = \frac{1,4 \cdot 9810 \cdot 240 \cdot 150}{1000 \cdot 0,6 \cdot 3600 \cdot 1,0} = 228,9 \approx 230 \text{ кВт}, \quad (7)$$

где 3600 – коэффициент перевода производительности из м³/ч на м³/с.

Эта система обладает рядом преимуществ, включая высокую эффективность и жесткую механическую характеристику. Благодаря этим особенностям, она обеспечивает эффективную работу и точное управление в условиях разнообразных нагрузок и требований.

Был выбран двухдвигательный электропривод согласованного вращения с частотой вращения 1500 об/мин – 4АНК315М4У3. Параметры этого асинхронного двигателя приведены в таблице 2.1.

Обмотки статоров генераторных двигателей (ГД) в данной системе подключены к сети с прямым чередованием фаз, в то время как вспомогательные обмотки подключены с обратным чередованием.

Генераторные двигатели - это электрические машины, которые преобразуют механическую энергию в электрическую энергию, действуя как генераторы. Они широко используются в различных приложениях, где требуется непрерывная подача электроэнергии.

Принцип работы генераторных двигателей основан на явлении электромагнитной индукции. Когда генераторный двигатель вращается, его статор (неподвижная обмотка) создает магнитное поле. Затем, при наличии движения, ротор (вращающаяся обмотка) пересекает магнитные линии поля, что приводит к индукции электрического тока в роторе.

Таблица 2.1 – Параметры асинхронного двигателя 4АНК315М4У3

Типоразмер электродвигателя	P ₂ ном, кВт	Энергетич. показатели		I _{2 ном} , А	U ₂ , В	Механическая характеристика			Параметры схемы замещения, отн. ед.				
		КПД, %	cosφ			m _к	S _{2 ном} , %	S _к , %	X _μ	R _i '	X ₁ '	R ₂ ''	X ₂ ''
	250	93,0	0,9	425	360	2,0	2,5	8,8	4,1	0,022	0,15	0,025	0,14

В данном технологическом процессе используется два асинхронных двигателя АД1 и АД2 одного типоразмера, но работающих в отличающихся режимах. АД1 работает в асинхронно-вентильном каскаде (АВК), а второй двигатель как машина двойного питания (МДП), т.к. АД2 питается напряжением и со стороны ротора.

Рассмотрим механические характеристики этих двигателей и затем совместную работу АД1 и АД2.

Далее будет произведен расчет и построение характеристик двухдвигательного электропривода согласованного вращения.

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2]} \quad (8)$$

В таблице 2.1 приведены следующие параметры двухдвигательного электропривода:

где η – коэффициент полезного действия (КПД),

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности,

x_0 – индуктивное сопротивление цепи намагничивания,

R_1 – активное сопротивление обмотки статора,

x_1 – индуктивное сопротивление обмотки статора,

R_2'' – активное сопротивление обмотки ротора,

x_2'' – индуктивное сопротивление обмотки ротора,

$S_{ном}$ – номинальное скольжение,

$s_{кр}$ – критическое скольжение.

Номинальный фазный ток статора определяется по выражению:

$$I_{\text{нфаз}} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{\text{нфаз}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad (9)$$

где P_1 – мощность на валу двигателя (Вт).

Естественную механическую характеристику $M(s)$ или $n(M_{cm})$ выбранного двигателя построим по выражению (8) изменяя значение s в диапазоне от $0 \div 1$ с шагом $0,1$.

$$I_{\text{Нфаз}} = \frac{P_1}{3 \cdot U_{\text{Нфаз}} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{250 \cdot 1000}{3 \cdot 220 \cdot 0,93 \cdot 0,9} = 452,55 \text{ А} \quad (10)$$

где P_1 – мощность двигателя;

$\cos \varphi$ – энергетический показатель двигателя;

$U_{\text{НФАЗ}}$ – фазное напряжение питающее АД1.

$$Z_1 = \frac{U_{\text{Нфаз}}}{I_{\text{Нфаз}}} = \frac{220}{452,55} = 0,486$$

$$x_{\mu} = x_0 = x_0 \cdot z_1 = 4,1 \cdot 0,486 = 1,996$$

$$r_1 = R_1' \cdot z_1 = 0,022 \cdot 0,486 = 0,01$$

$$x_1 = x_1' \cdot z_1 = 0,15 \cdot 0,486 = 0,073$$

$$x_2' = x_2'' \cdot z_1 = 0,14 \cdot 0,486 = 0,068$$

$$r_2' = R_2'' \cdot z_1 = 0,025 \cdot 0,486 = 0,012$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_0} = 1 + \frac{0,073}{1,996} = 1,04$$

Определим число пар полюсов p для нашего двигателя:

$$n = \frac{60f}{p}$$

отсюда

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2$$

где n – синхронное вращения АД, об/мин.

f – частота сети, Гц.

$$w_1 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 50}{2} = 157$$

При $s=0,1$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,1}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,1} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 2142,77$$

Частота вращения ротора:

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,1 \cdot 157 = 141,3$$

При $s=0,2$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,2}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,2} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 1207,691$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,2 \cdot 157 = 125,6$$

При $s=0,3$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,3}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,3} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 824,5371$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,3 \cdot 157 = 109,9$$

При $s=0,4$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,4}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,4} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 623,665$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,4 \cdot 157 = 94,2$$

При $s=0,5$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,5}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,5} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 500,9049$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,5 \cdot 157 = 78,5$$

При $s=0,6$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,6}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,6} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 418,3193$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,6 \cdot 157 = 62,8$$

При $s=0,7$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,7}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,7} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 359,0254$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,7 \cdot 157 = 47,1$$

При $s=0,8$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2)^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,8}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,8} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 314,4124$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,8 \cdot 157 = 31,4$$

При $s=0,9$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{0,9}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{0,9} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 279,6396$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,9 \cdot 157 = 15,7$$

При $s=1$

$$M = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s}}{\omega \cdot [(r_1 + c_1 \cdot \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 \cdot x_2')^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 48400 \cdot \frac{0,012}{1}}{157 \cdot \left[\left(0,01 + 1,04 \cdot \frac{0,012}{1} \right)^2 + (0,073 + 1,04 \cdot 0,068)^2 \right]} = 259,7799$$

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 1 \cdot 157 = 0$$

При $s=0$ $M=0$.

Занесены полученные данные в таблицу 2.2 и построим механические характеристики асинхронного двигателя без нагрузки.

Таблица 2.2 Данные для построения механической характеристики

s	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
w	141	125,6	109,9	94,2	78,5	62,8	47,1	31,4	15,7	0
M	2142,9	1207,6	824,5	623,6	500,9	418,3	359,0	314,4	279,6	251,7

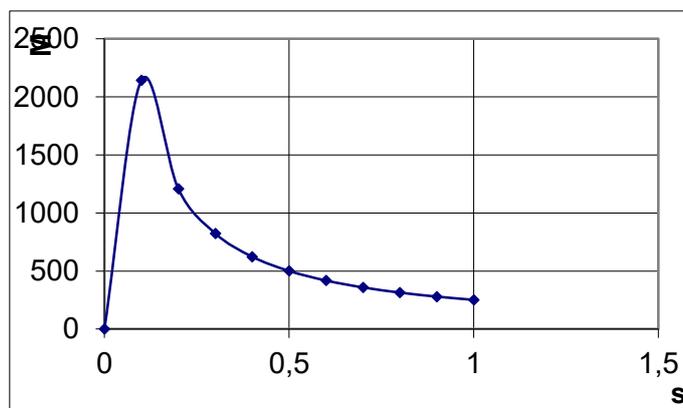


Рисунок 2.7 - Механическая характеристика $M=f(s)$

Определим номинальное вращения двигателя и номинальный момент:

$$n_{ном} = n_1 - s_H n_1 = 1500 - 0,025 \cdot 1500 = 1462,5 \text{ об/мин.}$$

$$M_{ном} = \frac{9550 \cdot P_1}{n_{ном}} = \frac{9550 \cdot 250}{1462,5} = 1632,48$$

По графику определим s и найдем номинальную частоту вращения ротора АД1.

$$w = w_1 - sw_1 = 157 - 0,15 \cdot 157 = 133,45$$

Машина двойного питания на рисунке 3.12 выполнена так же, как и асинхронная двигатель с фазным ротором. Обмотка статор подключается к питающей сети непосредственно, а обмотка ротора – через регулируемый преобразователь частоты (ПЧ).

Для того чтобы векторы МДС статора и ротора были взаимно неподвижны, ПЧ должен питать обмотку ротора током I_2 при частоте скольжения $f_2 = f_1 s$. Введение в цепь добавочного напряжения U_2 позволяет плавно регулировать частоту вращения n_2 в широких пределах как ниже, так и выше частоты n_1 и без больших потерь энергии, а также изменять коэффициент мощности $\cos\phi_1$ двигателя. При регулировании такой машиной изменяют частоту f_2 и напряжение U_2 на выходе преобразователя частоты ПЧ.

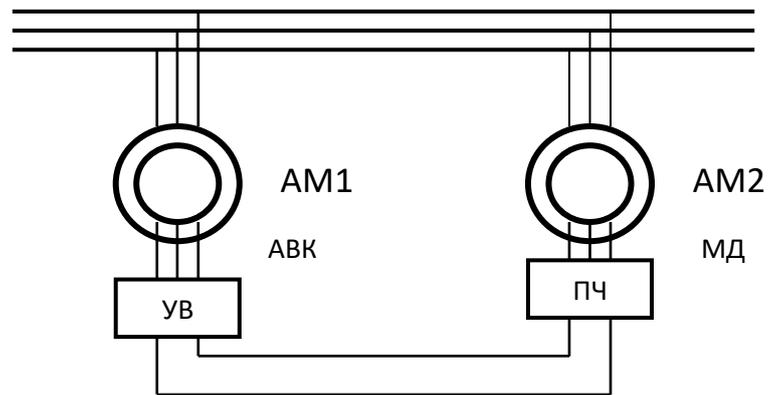


Рисунок 2.8 – Функциональная схема двухдвигательного электропривода согласованного вращения на базе МДП

Чтобы определить ток I_2 , который поступает на ротор МДП, надо рассмотреть схему замещения. Он учитывает параметры АМ1, ПЧ и УВ.

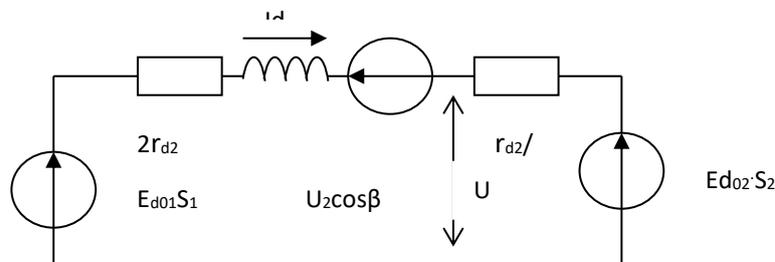


Рисунок 2.9 – Схема замещения МДП

Найдем ток I_d , рассматривая схему замещения МДП:

$$E_{d0p}s = E_{d0u} \cos \beta + 3\Delta U + I_d \cdot \left(\frac{m x_{d1}}{2\pi} s + \frac{m_2 x_{d2}}{4\pi} + 2r_{d1} + r_{d2} / 2 \right) \quad (11)$$

Отсюда

$$I_d = \frac{E_{d0p}s - E_{d0u} \cos \beta - 3\Delta U}{\frac{m x_{d1}}{2\pi} s + \frac{m_2 x_{d2}}{4\pi} + 2r_{d1} + \frac{r_{d2}}{2}} \quad (12)$$

где ΔU 18-20 Вт - падение в дуге одного ртутного вентиля;

I_d - выпрямленный ток;

$\frac{m x_{d1} s}{2\pi} I_d$ - падение напряжение от перекрытия анодов

неуправляемых вентилях инвертора;

$\frac{m x_{d1} s}{2\pi} I_d$ - падение напряжения от перекрытия анодов управляемых

вентилей инвертора;

E_{2k} - линейная эдс ротора при скольжении $s=1$;

$E_{2\phi.\delta 2}$ - фазная эдс второго двигателя;

$m; m_2$ - соответственно число фаз выпрямителя (для мостовой трехфазной схемы $m=6$) и инвертора (для схемы с уравнительным реактором $m_2 = 3$);

x_{d1} - реактивность фазы первого асинхронного двигателя, приведенная к обмотке ротора при $s=1$;

x_{d2} - реактивность фазы второго асинхронного двигателя;

r_{d1} - активное сопротивление фазы первого двигателя, приведенное к роторной цепи двигателя;

r_{d2} - активное сопротивление фазы второго двигателя;

β - угол регулирования инвертора (угол опережения зажигания);

s - номинальное скольжения двигателя;

δ - угол между векторами U_2 и E_2 .

$$E_{2\phi.\delta 2} = \frac{360}{\sqrt{3}} = 207,97$$

$$E_{d0u} = 1,17 E_{2\phi.\delta 2} = 207,97 \cdot 1,17 = 243,325$$

$$E_{d0p} = 486$$

Найдем ток I_d :

$$I_d = \frac{E_{d0p} s - E_{d0u} \cos \beta - 3\Delta U}{\frac{m x_{d1}}{2\pi} s + \frac{m_2 x_{d2}}{4\pi} + 2r_{d1} + \frac{r_{d2}}{2}} = \frac{486 \cdot 0,025 - 243,325 \cdot 0 - 3 \cdot 20}{\frac{6 \cdot 0,126}{2 \cdot 3,14} \cdot 0,025 + \frac{3 \cdot 0,126}{4 \cdot 3,14} + 2 \cdot 0,02 + \frac{0,02}{2}} = 1110,08 \text{ A} \quad (13)$$

Найдем входное напряжение U_d .

$$P_1 = \frac{P_{об1}}{\eta_{об1}} = \frac{250 \cdot 10^3}{0,93} = 268,817 \text{ кВт}$$

$$\cos \phi = \frac{P_1}{S_1}$$

Отсюда найдем S_1 (полная мощность):

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \phi} = \frac{268,817}{0,9} = 292,585 \text{ кВт}$$

Вспользуемся следующим соотношением:

$$\frac{S_1}{P_d} = 1,05$$

Отсюда:

$$P_d = \frac{S_1}{1,05} = \frac{292,585}{1,05} = 284,462 \text{ кВт}$$

$$U_d = \frac{P_d}{I_d} = \frac{284,462 \cdot 10^3}{1110,08} = 256,25 \text{ В}$$

$$U_2 = \sqrt{3} \cdot U_{2\phi} = \sqrt{3} \cdot \frac{U_d}{2,34} = \sqrt{3} \cdot \frac{256,25}{2,34} = 189,453 \text{ В}$$

$$U_{2*} = \frac{U_2}{E_2} = \frac{189,453}{360} = 0,526$$

Анализ такой системы из-за сложности описания АД затруднен. При пуске и регулировании напряжения АД присутствуют слабозатухающие колебания скорости и момента. В этом случае передаточную функцию АД можно приближенно представить в виде:

$$W_{\Delta d}(p) = \frac{\Delta M_{\Delta}(p)}{\Delta U_1(p)} = \frac{K_{\phi}}{(T_1 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\gamma_1 T_0 p + 1)} \quad (14)$$

где T_1 - постоянная времени, характеризующая апериодическую составляющую момента; T_0 - постоянная времени затухания периодической составляющей, γ_1 - коэффициент демпфирования.

$$W_{\Delta d}(p) = W_1(p) \quad (15)$$

Передаточная функция, связывающая скорость и момент с учетом вентиляторной нагрузки имеет вид

$$W_M(p) = \frac{K_M}{T_M p + 1} \quad (16)$$

Соответственно на структурной схеме:

$$W_M(p) = W_2(p) \quad (17)$$

На свободных обмотках ДСАД наводятся ЭДС E_1 и E_2 , пропорциональные скоростям n_1 и n_2 , на схеме это звенья с коэффициентами K . Разность ЭДС приводит к появлению уравнительного тока, протекающего через свободные обмотки двигателей. При этом внутренние падения напряжения на обмотках и их постоянные времени учитываются звеном:

$$W_3(p) = \frac{K_3}{T_3 p + 1} \quad (18)$$

Рассмотрим работу системы без корректирующей цепи. Считаем, что система работает в установившемся режиме $n_1 = n_2$ и $E_{1.2} = E_{2.2}$. Кроме этого принимаем, что $T_{M1} = T_{M2}$.

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{W_2(p)}{1 + 2 * W_1(p)W_2(p) * W_3(p)} \quad (19)$$

С учетом корректирующей цепи передаточная функция $W_{n1}(p)$:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{W_2(p)}{1 + 2 * W_1(p)W_2(p) * [W_3(p) + K_n W_p K_p] K} \quad (20)$$

Проведем расчет корректирующего звена из условия настройки системы на технический оптимум. Подставим передаточные функции звеньев в (8) и, пренебрегая малыми величинами, получим выражение:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{(\tau_1 p + 1) * K_M * T_p p}{\tau_2 T_p p^2 + 2K_o K_M T_p K_{\Sigma} p + 2K_o K_M K_n} \quad (21)$$

где

$$\tau_1 = T_1 + T_3; \tau_2 = \tau_1 + T_M; K_{\Sigma} = K_3 + K_n K_p.$$

Для настройки на технический оптимум знаменатель передаточной функции (9) должен иметь вид:

$$2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1 \quad (22)$$

С учетом выражения (4) получаем соотношение для выбора T_p :

$$T_p = \frac{\tau_2 K_n}{K_o K_M K_{\Sigma}^2} = \frac{\tau_2 K_n}{K_o K_M (K_3 + K_n K_p)^2}, \quad (23)$$

На основании формул (3-5) в итоге получается:

$$W_{\Delta n}(p) = \frac{p * (\tau_1 p + 1) T_{\mu} / K_o K_{\Sigma}}{2T_{\mu}^2 p^2 + 2T_{\mu} p + 1}, \quad (24)$$

где

$$T_{\mu} = \frac{\tau_2}{2K_o K_M K_{\Sigma}} = \frac{\tau_2}{2K_o K_M (K_3 + K_n K_p)}.$$

Значение постоянной времени T_{μ} можно изменять в широких пределах за счет коэффициента регулятора K_p .

Анализ передаточной функции (12) показывает, что динамические характеристики системы зависят от соотношения постоянных времени τ_1 и T_{μ} .

Передаточная функция PID регулятора:

$$W_p(p) = K_1 + \frac{K_0}{p} + K_2 p \quad (25)$$

Пропорциональная составляющая регулятора использует разность между текущим значением измеряемой величины и желаемым значением для генерации управляющего сигнала, пропорционального этой разности.

Таблица 2.3 – Параметры передаточной функции

Название и описание параметра	Значение
K_d – коэффициент мощности двигателя	3
T_1 - постоянная времени, характеризующая апериодическую составляющую момента	45
T_0 - постоянная времени затухания периодической составляющей	39
K_M – коэффициент связывающий скорость и момент	7,5
T_M - постоянная времени связывающий скорость и момент	0,8
T_3 – постоянная времени внутреннего падения напряжения	0,6
K_3 – коэффициент внутреннего падения напряжения	4,5
K_n – коэффициент скорости	5
K_p – коэффициент регулятора	8,9
τ - постоянная времени	1
K_1 – пропорциональный коэффициент	0,044
K_0 – интегрирующий коэффициент	0,00038
K_2 – дифференцирующий коэффициент	168.83

Для обеспечения неподвижности векторов МДС статора и ротора в электроприводах используется преобразователь частоты (ПЧ). ПЧ подает ток I_2 на обмотку ротора с частотой скольжения $f_2=f_1s$. Для плавного регулирования частоты вращения n_2 в широком диапазоне, введение дополнительного напряжения U_2 играет важную роль. Это позволяет изменять частоту как ниже, так и выше частоты n_1 , минимизируя потери энергии. Кроме того, такой подход также позволяет изменять коэффициент мощности $\cos\phi_1$

двигателя, обеспечивая гибкость и эффективность работы системы. Изучение и анализ характеристик двигателей: Начните с изучения технических спецификаций и характеристик двух используемых двигателей. Определите основные параметры, такие как номинальное напряжение, номинальная частота, мощность, скорость вращения и токи.

Определение режимов работы: Решите, в каких режимах будут работать двигатели и как они будут взаимодействовать друг с другом. Например, один двигатель может быть основным, а другой - вспомогательным, или оба двигателя могут работать одновременно.

Проведенные исследования позволили получить:

- математическую модель двигателя,
- математическую модель системы согласованного вращения двигателей,
- формулы для настройки.

На рисунке 2.10 изображена имитационная математическая модель двух электроприводов согласованного вращения.

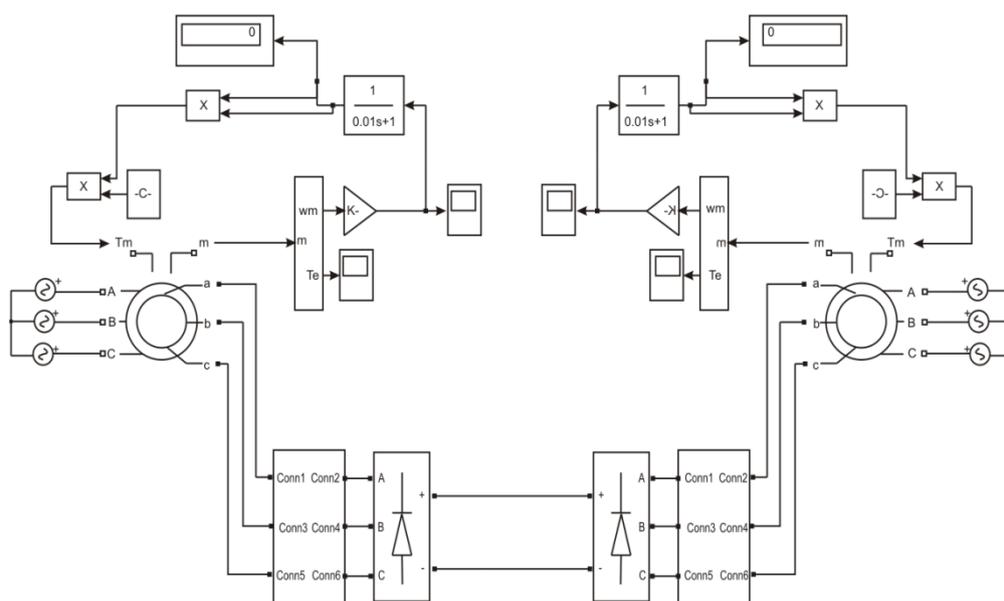


Рисунок 2.10 – Имитационная математическая модель двух электроприводов согласованного вращения.

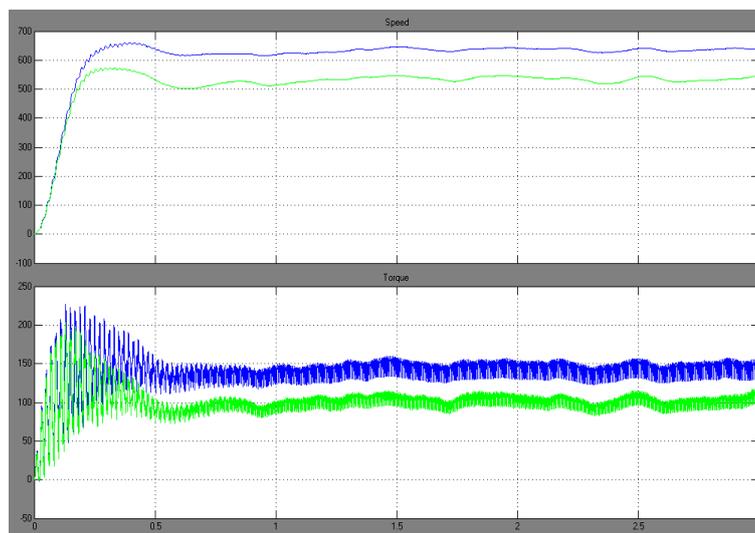


Рисунок 2.11 – Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при $\beta = 30^{\circ}$

1- характеристики первого двигателя; 2- характеристики второго двигателя

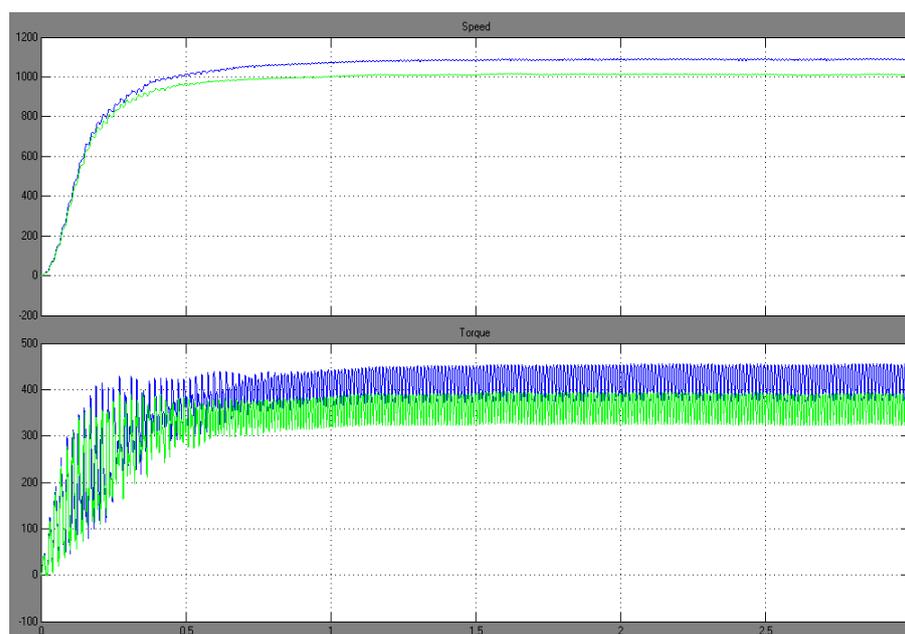


Рисунок 2.12 - Динамические характеристики двухдвигательного электропривода при $\beta = 60^{\circ}$

1- характеристики первого двигателя; 2- характеристики второго двигателя

2.2 Анализ передаточной функции

Далее будет проведено исследование разомкнутой передаточной функции

$$W_{Ad}(p) = \frac{\Delta M_d(p)}{\Delta U_1(p)} = \frac{K_o}{(T_1 p + 1)(T_0^2 p^2 + 2\gamma_1 T_0 p + 1)} = \frac{3}{45p^3 + 39p^2 + 1,1p} \quad (26)$$

С помощью программного обеспечения Matlab найдены полюса передаточной функции, также выведен график переходного процесса. Из этих данных можно будет сделать вывод об устойчивости системы и необходимости добавление в систему регулятора.

```
>> g=tf([3],[45 39 1.1 0])

g =

          3
-----
45 s^3 + 39 s^2 + 1.1 s

Continuous-time transfer function.

>> step(g)
>> pole(g)

ans =

          0
     -0.8375
     -0.0292
```

Рисунок 2.12 – Полюса разомкнутой передаточной функции

Согласно второму методу Ляпунова если система имеет хотя бы один нулевой полюс, то система находится на границе устойчивости. Это же можно наблюдать на рисунке 2.7 – график находится на границе устойчивости. Так как системой, находящейся на границе устойчивости управлять невозможно, необходимо сделать ее устойчивой. Самый просто и эффективный способ сделать ее устойчивой – добавить регулятор.

Дальнейшее исследование требует преобразовать разомкнутую передаточную функцию в замкнутую по следующей формуле:

$$W_3(s) = \frac{W(p)_p}{1 + W(p)_p} = \frac{3}{45p^3 + 39p^2 + 1,1p + 3} \quad (27)$$

Для корректировки системы выбран ПИД регулятор. Регулятор не только поможет сделать из неустойчивой системы устойчивую, но и сделают систему более быстродейственной и позволит снизить ошибки.

$$W_{зг}(s) = \frac{3}{45(j\omega)^3 + 39(j\omega)^2 + 1,1(j\omega) + 3} \quad (28)$$

2.3 ПИД регулирование

Для того, чтобы превратить неустойчивую замкнутую систему 15 в устойчивую добавлен ПИД регулятор.

ПИД-регулятор — это прибор для управления технологическим процессом, который используется в методе ПИД-регулирования, основанном на трех законах регулирования: пропорциональном, интегральном и дифференциальном.

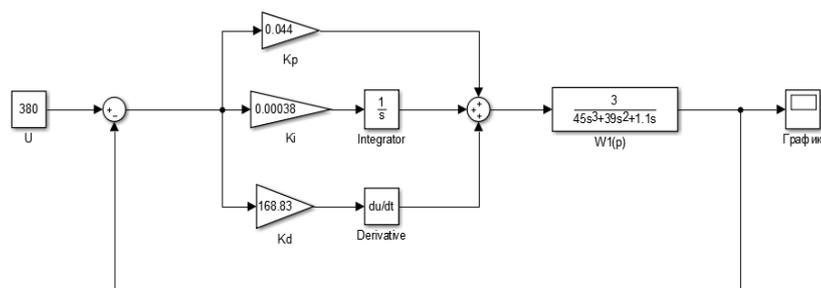


Рисунок 2.16 – Система с ПИД регулятором

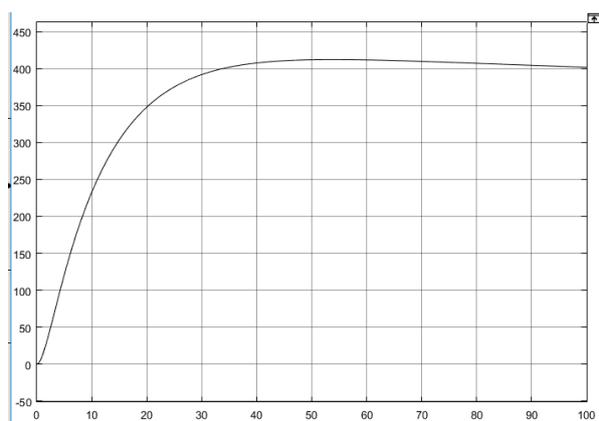


Рисунок 2.17 – График переходного процесса с ПИД регулятором

Как видно из рисунка 2.11 – графика переходного процесса с ПИД регулятором. ПИД регулятор помог из неустойчивой системы сделать устойчивую.

Далее будет представлена оценка качеств системы с ПИД регулирование для того, чтобы удостовериться, что система соответствует всем нормам.

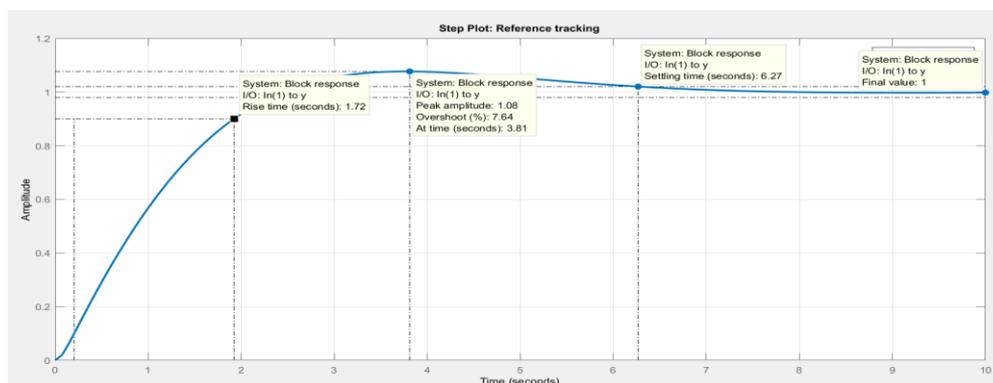


Рисунок 2.18 - Оценка качеств системы с ПИД регулированием

Комбинация этих трех компонентов в ПИД-регуляторе позволяет достичь более точного и стабильного управления различными процессами и системами.

Таблица 2.4 - Оценки качеств системы с PID регулятором

	№	Оценка качества	Символ	Прямые
Основные	1	Время регулирования (Settling time)	T_{set}	6.27
	2	Декремент затухания	X	0.006
	3	Частота колебаний (oscillation frequencies)	ω_{osc}	0.23
	4	Перерегулирование (Overshoot)	P_{ov}	7.64%
	5	Колебательность (Oscillation)	M	5.26%
Дополнительные	6	Время достижения первого максимума (peak time)	T_p	3.81
	7	Время нарастания (rise time)	T_R	1.75
	8	Число колебаний	M	1

Как видно из таблицы 2.2 все параметры в пределах допустимого. А именно перерегулирование не превышает 30%, время регулирования не большое, число колебаний не превышает 3х.

Также было проведено сравнение переходного процесса трех регуляторов – P, PI, PID.

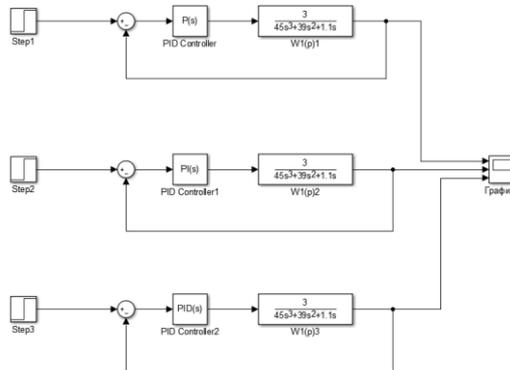


Рисунок 2.19 - Математическая модель с тремя регуляторами

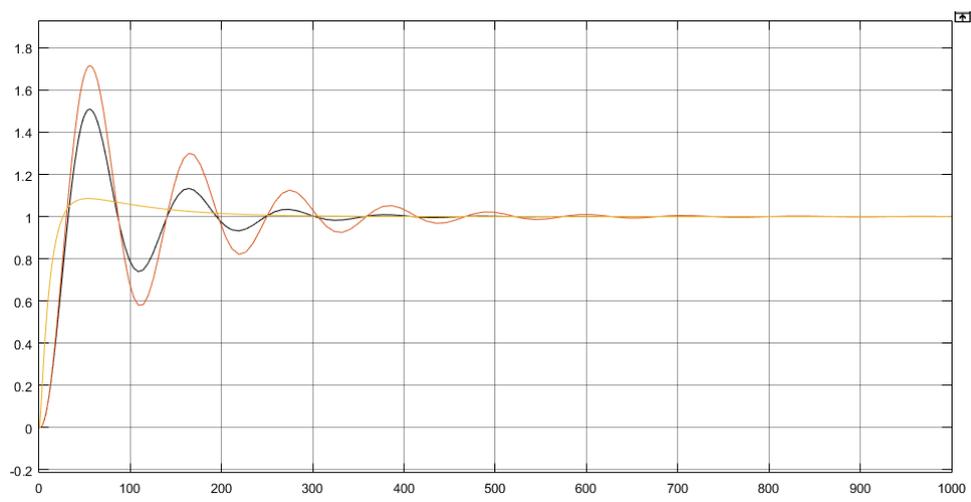


Рисунок 2.20 - График переходного процесса трех регуляторов

3 Техническая часть

3.1 Написание программы для контроллера

После выбора регулятора необходимо написать логическую программу для контроллера. В качестве контроллера выбран s7-300, а именно CPU-313. Блок питания – PS 307 10A, аналоговый входной/выходной модуль и дискретный входной/выходной модуль.

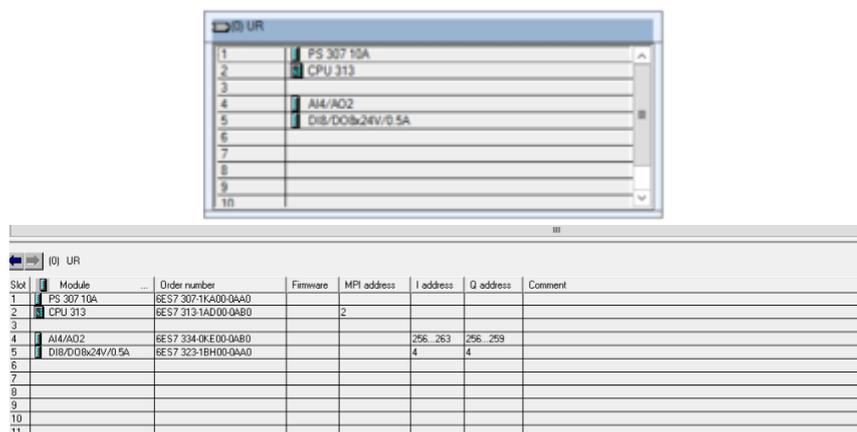


Рисунок 3.1 – Конфигурация оборудования

На рисунке 3.1 показана конфигурация оборудования. Далее необходимо создать таблицу символов для программы. В ней будут прописаны все переменные использованные в программе.

С помощью встроенной подпрограммы PLCSIM осуществляется управление моделируемого контроллера.

	Statu	Symbol	Address	Data type	Comment
1		Критические обороты	I 0.2	BOOL	
2		Пожар	I 0.1	BOOL	
3		Работа двигателя	Q 0.1	BOOL	
4		Старт	I 0.0	BOOL	
5		Стоп	I 0.3	BOOL	
6					

Рисунок 3.2 - Таблица символов

На рисунке 3.2 показана таблица символов. Старт – запуск двигателя, стоп – остановка двигателя, работа двигателя – выходная величина, пожар – наличие или отсутствие пожара, критические обороты – наличие или отсутствие предельных оборотов двигателя.

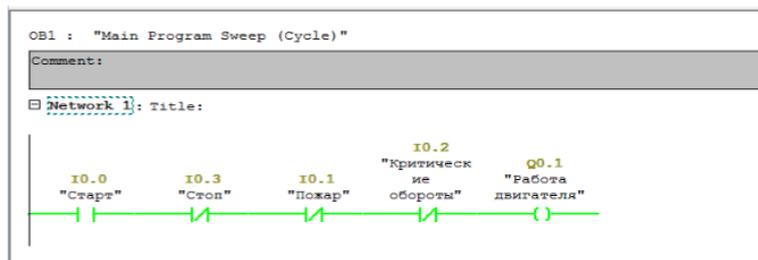


Рисунок 3.3 – Логическая программа

При возникновении пожара двигатель автоматически останавливается. Также аварийная остановка двигателя происходит при критических режимах работы. То есть при возникновении критических оборотах двигателя, что может послужить причиной поломки двигателя.



Рисунок 3.4 - Остановка двигателя при пожаре

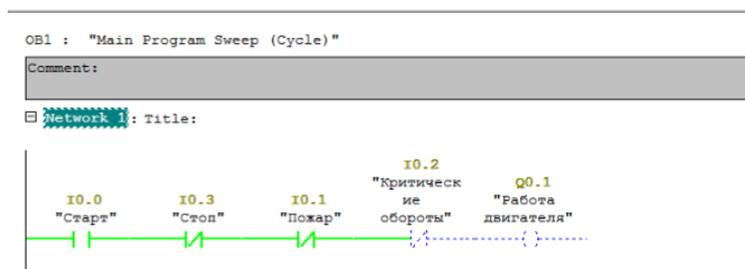


Рисунок 3.5 – Остановка двигателя при критических оборотах



Рисунок 3.6 – Подпрограмма PLCSIM

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном дипломном проекте были реализованы следующие задачи:
Разработана система автоматического регулирования двухдвигательного электропривода согласованного вращения.

В процессе разработки системы были изучены особенности электроприводов, а также рассмотрены различные способы автоматического регулирования двухдвигательного электропривода согласованного вращения.

Разработана функциональная и структурная схемы для двухдвигательного электропривода согласованного вращения. Выбраны необходимые средства для разработки системы автоматического регулирования.

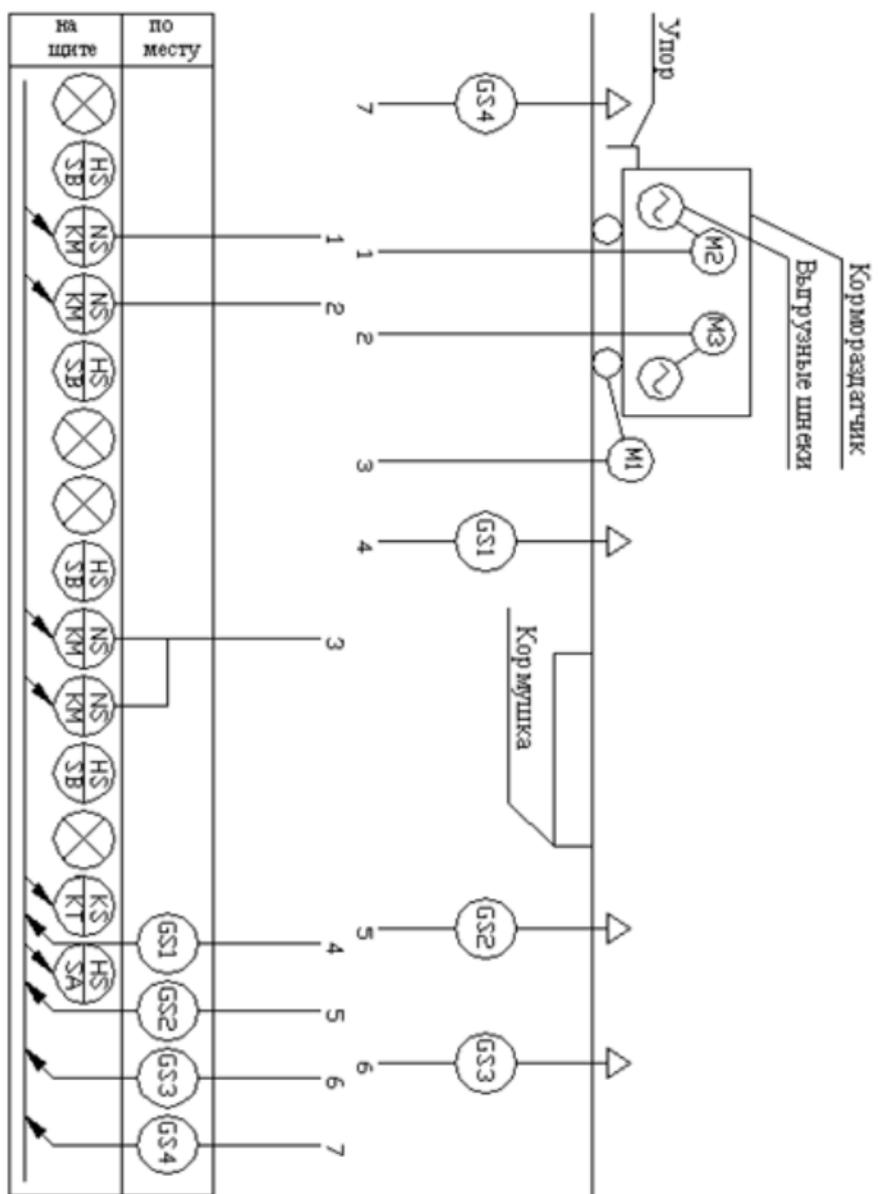
Были исследованы динамические свойства разомкнутой и замкнутой систем и получены результаты моделирования в временной и частотной областях. А также найдены и проанализированы оценки качества системы с PID регулятором. Для разработки системы автоматического регулирования, произведено математическое моделирование двухдвигательного электропривода согласованного вращения, исследование системы без регулятора и с PID регулятором и выбран наилучший вариант. Помимо всего прочего была приведена сравнительная переходная характеристика P, PI, PID регуляторов Также написана программа управления для контроллера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Бесекерский В. А., Попов Е. П. - Теория систем автоматического управления – С-П.: Профессия, 2004. – с. 214-216.
- 2 Настройка типовых регуляторов по методу Циглера–Никольса: Методические указания к выполнению лабораторной работы для студентов / О.С. Вадутов. – Т.: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.
- 3 ГОСТ 21.408-2013. Система проектной документации для строительства. Правила выполнения рабочей документации автоматизации технологических процессов. – М.: Изд-во стандартов, 2013.
- 4 Ким Д. П. Теория Автоматического Управления. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — с. 90-92.
- 5 Sayda A. F., Taylor J. H. Modeling and Control of Three-Phase Gravity Separators in Oil Production Facilities. American Control Conference, 2007 – pp. 4847-4853.
- 6 ГОСТ 21.208-2013 – Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации.
- 7 Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. В 2-ух т. М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 652 и 532 с.
- 8 Ключев В.И. Теория электропривода. М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- 9 Доманов В.И., Доманов А.В., Гаврилова С.В. Параметрическая автоматизация двухскоростного асинхронного двигателя/ Промышленные АСУ и контроллеры, 2015. №3. С. 3-7.
- 10 Гаврилова С.В., Байрамов Н.В. Моделирование согласованной системы вращения асинхронных двигателей/ материалы I Международной научно технической конференции (24-25 сентября 2015 г.). – Пермь: Изд-во Пермского национального исследовательского политехнического университета, 2015. – С. 84-88.
- 11 Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 420 с.

Приложение А

Схема автоматизации



Отзыв

на дипломный проект студента
Келгена Диаса Айдарулы
6B07103 – Автоматизация и роботизация

на тему: Разработка двухдвигательного электропривода согласованного вращения
Выполнено:

а) пояснительная записка на 45 страницах

В пояснительной записке, представленной на рецензирование, продемонстрирована тема дипломной работы Разработка двухдвигательного электропривода согласованного вращения

Во введении автор сформулировал цель и определил задачи, которые предстоит решить в работе.

В первой главе автор призывает решить проблему замены традиционного источника электроэнергии на альтернативный источник энергии, потенциал ветроэнергетики в Казахстане, особенности и все необходимые средства для реализации строительства ветряных турбин, привел принципиальную и структурную схему ветроэнергетической установки, описание материалов о ветряных электростанциях, останавливается на видах генераторов показывая минусы и плюсы, продемонстрировал принципиальную схему, режимы работы генератора по схеме машины двойного питания, конструктивные представления и эффективность использования.

Во второй главе автором акцент был сделан на техническое описание конвейера как объект автоматизированной системы управления, с разделением на уровни и подробным описанием каждого из них, выполнены расчеты и реализованы в системе MATLAB, показаны результаты моделирования схемы САР с регулятором и без него, проделано выборка и расчет всех основных технических устройств, функциональная схема.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

Оценка работы

Дипломный проект Келгена Д. является самостоятельным, целостным законченным исследованием одной из актуальных проблем современной электромеханики.

В процессе работы автор проекта показал себя дисциплинированным и исполнительным. Хочется отметить отличную теоретическую подготовку, показанную в ходе подготовки дипломной работы. Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «хорошо», рекомендуется к защите, а студент Келген Д. присуждения степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Научный руководитель
к.т.н., ассоциированный профессор

 Сарсенбаев Н.С.

«21» 05 2023 г.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломный проект студента
Келгена Диас Айдарулы
6B07103 – Автоматизация и роботизация

На тему: Разработка двухдвигательного электропривода согласованного вращения

Выполнено:

а) пояснительная записка на страницах

В пояснительной записке, представленной на рецензирование, продемонстрирована тема дипломной работы Разработка двухдвигательного электропривода согласованного вращения.

Во введении автор сформулировал цель и определил задачи, которые предстоит решить в работе.

В первой главе автор объясняет работу двухдвигателей в совокупности чтобы организовывать работу конвейеров в производственных линиях.

Во второй главе автором акцент был сделан на техническое описание конвейеров как объект автоматизированной системы управления, выполнены расчеты и реализованы в системе MATLAB, показаны результаты моделирования схемы САР с регулятором и без него, проделано выборка и расчет всех основных технических устройств, функциональная схема.

Графический и текстовый материал оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ, предъявляемыми к оформлению учебных работ.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

В продемонстрированной дипломной работе есть недостатки: можно было рассмотреть SCADA систему всего магистраля работы всех конвейеров в согласованном режиме.

Оценка работы

Считаю, что дипломный проект заслуживает оценки «хорошо», рекомендуется к защите, а студент Келген Д.А. присуждения степени бакалавра техники и технологий по образовательной программе 6B07103 – Автоматизация и роботизация.

Доктор Ф.И.Д., зав. кафедрой ЭМЭП, АУЭС им. Г. Даукеева
Шыныбай Ж. С.
20²³ г.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Келген Диас.

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Дипломная работа

Название работы: Разработка двухдвигательного электропривода согласованного привода согласованного вращения

Научный руководитель: Нурлан Сарсенбаев

Коэффициент Подобия 1: 17.7

Коэффициент Подобия 2: 6.4

Микропробелы: 2

Знаки из других алфавитов: 41

Интервалы: 0

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: *Выявленные в работе совпадения являются корректными цитированием с указанием ссылки*

Дата

10.06.2023

проверяющий эксперт