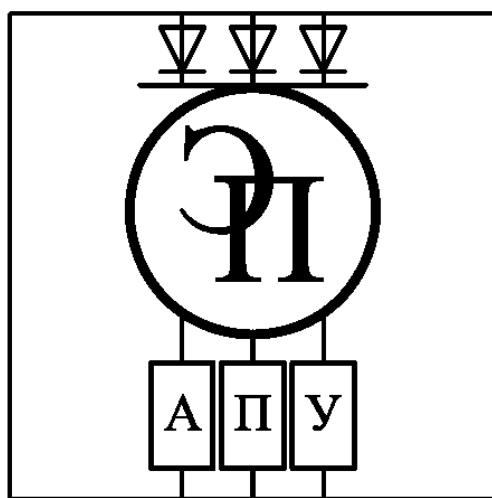


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов направления подготовки  
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»  
дневной формы обучения*



Могилев 2023

УДК 62-83  
ББК 31.291  
Э33

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «31» августа 2022 г., протокол № 1

Составители: канд. техн. наук., доц. Б. Б. Скарыно;  
ст. преподаватель А. С. Третьяков

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Методические рекомендации к курсовому проектированию предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» дневной формы обучения.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет 2023

## Содержание

1 Общие методические рекомендации по изучению курса .....	4
2 Курсовая работа, ее характеристика .....	6
3 Этапы проектирования автоматизированного электропривода и их краткая характеристика .....	6
3.1 Постановка задачи на проектирование .....	9
3.2 Анализ и описание системы «электропривод – рабочая машина» .....	9
3.3 Выбор принципиальных решений .....	11
3.4 Расчет силового электропривода .....	14
3.5 Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода .....	15
3.6 Расчет переходных процессов за цикл работы .....	17
3.7 Проверка правильности расчета мощности и окончательный выбор двигателя .....	19
3.8 Разработка схемы электрической принципиальной .....	19
3.9 Заключение .....	19
4 Задания на курсовую работу .....	20
Список литературы .....	40

## 1 Общие методические рекомендации по изучению курса

Курс «Электрический привод» является одной из основных дисциплин по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Задачей курса «Электрический привод» является изучение общей теории электропривода, которая включает изучение общих физических закономерностей, свойственных различным техническим реализациям современных электроприводов любого назначения, и содержит общие методы и рекомендации, используемые при их проектировании, наладке и эксплуатации.

Для того чтобы проектировать, исследовать, налаживать и эксплуатировать современные электроприводы, необходимо знать и уметь использовать электрические машины, промышленную электронику и преобразовательную технику, электрические аппараты и другие элементы автоматизированного электропривода, измерительную и вычислительную технику, а также свободно владеть математическими методами теоретической механики и теории автоматического управления. Все эти знания являются необходимой основой для изучения специальных вопросов, составляющих содержание теории электропривода.

Предусмотренная программой структура курса «Электрический привод» непосредственно отражает структуру современного электропривода. Как объект изучения электропривод содержит механическую часть, электромеханический и электрический преобразователи и систему управления. Свойства механической части, методы ее анализа, вопросы формирования заданных законов движения рассматриваются в разделе программы курса «Механика электропривода».

Динамические свойства, статические характеристики идеализированных и реальных электромеханических преобразователей выявляются в разделе «Электромеханические свойства и характеристики электродвигателей».

В разделе программы «Динамика электромеханических систем» электромеханические преобразователи и механическая часть электропривода объединяются в разомкнутые электрические динамические системы с различными двигателями и изучают свойства таких систем, рассматриваемые с позиций управления их работой: составляются структурные схемы и методами теории автоматического управления анализируются их динамические свойства; на основе классического метода решения дифференциальных уравнений изучаются особенности электромеханических переходных процессов в системе.

Знание физических свойств разомкнутых электромеханических систем служит основой для изучения в разделе «Регулирование координат электропривода» общих вопросов регулирования момента, скорости и положения как основных координат электропривода. Здесь же рассматриваются особенности управления электропривода в зависимости от типов преобразователей и электродвигателей.

Важным разделом программы является раздел «Энергетика и основы выбора мощности электропривода», в котором рассматриваются энергетические показатели электропривода и излагаются методы расчета мощности и выбора двигателей и преобразователей.

Таким образом, в курсе «Электрический привод» сосредоточены основные теоретические вопросы специальности, рассматриваемые в обобщенном виде с концентрацией внимания на общих закономерностях, свойственных современному электроприводу.

В качестве главной общей методической рекомендации для изучающих данную дисциплину следует указать на необходимость акцентировать внимание не только на деталях математических выкладок, но и на понимании физического смысла проводимого анализа на всех его этапах – при постановке задачи, при записи ее исходного математического описания и при оценке полученных результатов.

Необходимо помнить, что целью курса является изучение общих физических закономерностей электропривода, особенностей взаимодействия элементов электромеханической системы, характера динамических процессов и особенностей взаимодействия элементов электромеханической системы, характера динамических процессов и особенностей статических режимов как в разомкнутой, так и замкнутой обратными связями по главным координатах системах. В результате изучения курса нужно научиться объяснять характер процессов и зависимостей, рассмотренных в курсе, уметь анализировать влияние изменений параметров, настроек системы и внешних воздействий на работу электропривода и механизма, пользуясь для этого физическими соображениями и важнейшими математическими соотношениями.

Достижение этой цели обеспечивается всем комплексом учебных занятий по дисциплине: лекционным курсом, практическими занятиями, лабораторным практикумом, а также самостоятельной работой. Для самостоятельного изучения материала каждый раздел курса разбит на под разделы-темы. Рекомендуемая к обязательной проработке литература указана в конце каждой темы, причем, учитывая современное состояние теории и практики автоматизированного электропривода и перспективы его развития, что в полной мере отражено в содержании программы курса, а также специфику его самостоятельного изучения, рекомендуется дополнительная литература. Это позволит вначале, «в первом чтении», ознакомиться с материалом курса по книге с более простым изложением, а затем глубоко и основательно изучить его по основным рекомендуемым учебникам [1, 2]. Способствовать изучению дисциплины должно изучение приведенных в [2] практических примеров.

Второй важной целью данной дисциплины является обучение практическим навыкам расчета статических характеристик, переходных процессов и нагрузочных диаграмм электропривода, выбора мощности двигателей и преобразователей, расчета энергетических показателей. Эта цель обеспечивается выполнением курсовой работы.

При выполнении курсовой работы, кроме [1–9], специальной и справочной литературы, следует руководствоваться методическими указаниями, разработанными на кафедре.

## 2 Курсовая работа, ее характеристика

В шестом семестре студенты выполняют курсовую работу на тему «Проектирование автоматизированного электропривода».

Целью курсовой работы является:

- 1) углубление знаний и закрепление навыков по обоснованному выбору электропривода, отвечающего заданным требованиям;
- 2) выбор его основных элементов;
- 3) расчет статических механических и электромеханических характеристик, переходных процессов за цикл работы;
- 4) проверка исполнительного двигателя по нагреву, перегрузочной способности и по условиям пуска.

При курсовом проектировании студент овладевает навыками решения инженерных задач в области автоматизированного электропривода, а также максимально использует средства вычислительной техники, что позволяет провести расчет и анализ статических, динамических и энергетических характеристик проектируемого электропривода.

Курсовая работа включает следующие разделы.

*Пояснительная записка курсовой работы.*

- 1 Введение (постановка задачи по теме проекта).
- 2 Анализ и описание системы «электропривод – рабочая машина»:
  - количественная оценка вектора состояния или тахограммы требуемого процесса движения;
  - количественная оценка моментов и сил сопротивления;
  - составление расчетной схемы механической части электропривода;
  - построение нагрузочной диаграммы и механической характеристики рабочей машины.
- 3 Выбор принципиальных решений:
  - построение механической части привода;
  - выбор типа привода (двигателя);
  - выбор способа регулирования координат;
  - оценка и сравнение выбранных вариантов.
- 4 Расчет силового электропривода:
  - расчет исходных параметров и выбор двигателя;
  - расчет исходных параметров и выбор силовых преобразователей.
- 5 Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода.
- 6 Расчет переходных процессов в электроприводе за цикл работы.
- 7 Проверка правильности расчета мощности и окончательный выбор двигателя.
- 8 Разработка схемы электрической принципиальной:
  - разработка схемы силовых цепей, цепей управления и защиты;
  - выбор элементов схемы.
- 9 Заключение.

*Графическая часть курсовой работы.*

1 Механическая характеристика рабочей машины. Статические механические и электромеханические характеристики двигателя и привода (один лист формата А1, шифр Д1).

2 Расчётная схема механической части привода. Нагрузочная диаграмма механизма. Графики переходных процессов за цикл работы (один лист формата А1, шифр Д2).

3 Кинематическая схема установки. Схема электрическая принципиальная привода (один лист формата А1, шифр Д3).

На выполнение курсовой работы отводится 36 часов.

Объем пояснительной записки – 25–30 страниц формата А4. Графическая часть составляет три листа формата А1.

Примерный перечень этапов выполнения курсовой работы и количества баллов за каждый из них представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы выполнения курсовой работы и распределение баллов

Этап выполнения	Минимум	Максимум
Введение (постановка задачи на проектирование)	2	3
Анализ и описание системы «электропривод – рабочая машина»	4	7
Выбор принципиальных решений	4	7
Расчет силового электропривода	4	8
Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода	4	7
Расчет переходных процессов в электроприводе за цикл работы	4	7
Проверка правильности расчета мощности и окончательный выбор двигателя	4	7
Разработка схемы электрической принципиальной	4	7
Заключение	1	2
Оформление проекта	5	7
Итого за выполнение курсового проекта	36	60
Защита курсового проекта	15	40

Итоговая оценка курсовой работы представляет собой сумму баллов за выполнение и защиту курсовой работы и выставляется в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2 – Оценка курсовой работы по пятибалльной системе

Оценка	Отлично	Хорошо	Удовлетворительно	Неудовлетворительно
Балл	87–100	65–86	51–64	0–50

Выполнение курсовой работы возможно только при соблюдении определенной последовательности работы над заданием, которое выдаётся каждому

студенту в день начала курсового проектирования. В задании указаны тема проекта (номер задания) и номер варианта, отражающего исходные (основные) технологические данные и основные параметры рабочей машины, для которой проектируется электропривод. Необходимые вспомогательные технологические данные и условия функционирования рабочей машины студент выбирает самостоятельно при работе со специальной технической литературой.

Курсовая работа выполняется путем самостоятельной работы студента с учебной и технической литературой и с использованием консультаций преподавателя – руководителя проекта.

Консультации проводятся по графику, утверждённому кафедрой. Посещение консультаций для студентов является обязательным, независимо от того, имеются ли у студента вопросы и неясности по выполнению проекта или нет. При этом студент на консультациях обязан отчитываться перед руководителем проекта о выполнении графика проектирования. Законченный проект не позднее 7 дней до защиты сдается на проверку руководителю проекта.

К защите допускаются студенты, курсовые проекты которых подписаны руководителем проекта «к защите».

На защите курсового проекта студент делает доклад, в котором должны быть:

1) сформулирована тема проекта и кратко изложены технологические и другие требования, предъявляемые рабочей машиной (механизмом) к электроприводу;

2) представлены с кратким обоснованием принятые основные технические решения (род тока, тип двигателя и преобразователя, способы регулирования координат и его реализация, способы пуска и торможения, элементы управления и защиты (станция и аппаратура управления);

3) указаны в краткой форме, без раскрытия деталей, примененные методы расчетов, в том числе с использованием специального программного обеспечения;

4) выводы по работе, отражающие, в какой степени разработанный проект обеспечивает выполнение заданных технических требований.

Доклад должен быть рассчитан на 3–5 мин. Основные положения доклада следует иллюстрировать схемами и графиками, представленными на чертежах графической части проекта.

При оценке курсовой работы комиссия принимает во внимание:

1) обоснованность принятых в проекте технических решений;

2) глубину проработки основных вопросов;

3) умение сжато и технически грамотно доложить суть проекта в отведенное для доклада время;

4) правильность и полноту ответов на вопросы, заданные членами комиссии.



## **3 Этапы проектирования автоматизированного электропривода и их краткая характеристика**

### ***3.1 Постановка задачи на проектирование***

Проектирование электропривода является сложной задачей. Сложность обусловлена также тем, что нельзя наметить однозначный путь прямого решения задачи проектирования. Даже в простом случае неизбежны предварительные расчеты приводов с их последующей проверкой и уточнением.

Поэтому, приступая к проектированию электропривода для конкретной технологической установки, очень важно изучить по специальной литературе используемые на практике системы электроприводов, способы регулирования координат, а также особенности рабочих машин с точки зрения их взаимодействия с электроприводом.

Приступив к проектированию электропривода, следует подобрать специальную литературу и по ней изучить назначение, конструкцию, кинематическую схему механизма и, что особенно важно, технологический цикл работы механизма (возможно, во взаимодействии с другими механизмами). В результате такого изучения уточняется постановка задачи в виде следующей информации:

1) требования к электроприводу (сначала о главных, которые бы обеспечили отработку заданного технологического цикла), к его механическим характеристикам;

2) чёткое представление о режимах работы привода, о всех этапах цикла его действия, о формулах расчета статических нагрузок механизма, о характерном соотношении для данного механизма инерционных масс механизма и двигателя, о существующих структурах привода, возможных принципиальных решениях, типовых проектах, а также об отдельных частных решениях для данного класса механизмов и т. д.

### ***3.2 Анализ и описание системы «электропривод – рабочая машина»***

*3.2.1 Количественная оценка вектора состояния или тахограммы требуемого процесса движения.* Исходя из требований технологического процесса и задания на проектирование следует установить, какие процессы движения рабочего органа механизма должен реализовать электропривод, а именно:

1) в каком диапазоне и с какой точностью должна регулироваться угловая или линейная скорость;

2) каким образом должна регулироваться скорость в заданном диапазоне (непрерывно или дискретно);

3) какая неравномерность скорости допустима, её отклонения при изменении нагрузки или других возмущениях;

4) какое требуется угловое или линейное ускорение рабочего органа;

5) как долго привод должен работать на пониженной скорости;

6) какова цикличность работы привода с заданными скоростями.

На основании этих данных следует построить тахограмму требуемого про-

цесса движения механизма.

На основании построения тахограммы можно установить временные характеристики цикла:

- время цикла;
- расчетную продолжительность включения.

Тахограмма используется также для приблизительного расчета динамических нагрузок или оценки влияния последних на расчет мощности двигателя.

*3.2.2 Количественная оценка моментов и сил сопротивления.* Целью данного анализа является количественная оценка моментов и сил, противодействующих движению за весь цикл работы, что является основой для силового расчета двигателя. Для этого следует определить:

- 1) величину статических нагрузок на каждом участке цикла работы, приведенных к валу двигателя;
- 2) величину (если в этом есть необходимость и задано ускорение динамических нагрузок);
- 3) вид нагрузки (потенциальная или реактивная).

*3.2.3 Составление расчетной схемы механической части электропривода.* Для анализа механической части электропривода реальный механизм заменяют динамически эквивалентной приведенной расчетной схемой, состоящей из сосредоточенных инерционных элементов, соединенных между собой невесомыми упругими связями, и обладающей таким же энергетическим запасом, как и исходная реальная механическая система привода.

Учитывая абсолютное большинство используемых на практике исполнительных вращающихся электродвигателей, в расчетных схемах рассматривается вращательное движение.

Как правило, при исследовании электропривода ограничиваются одномассовой расчетной схемой, или двухмассовой консервативной, или двухмассовой диссипативной расчетной схемой. Значительно реже расчетную схему приводят к трехмассовой системе.

*3.2.4 Построение нагрузочной диаграммы и механической характеристики рабочей машины.* Нагрузочная диаграмма механизма представляет собой зависимость приведенного к валу двигателя момента (или мощности, если неизвестно передаточное число редуктора) в функции времени за цикл работы. Нагрузочных диаграмм может быть несколько, в зависимости от типа рассматриваемого механизма и его режимов работы.

Чаще всего на первом этапе проектирования (грубый расчет) имеется возможность рассчитать и построить упрощенную нагрузочную диаграмму зависимости статических моментов в функции времени без учета динамических нагрузок), которая в последующем требует уточнения на этапе предварительной проверки расчета мощности двигателя. Более точная нагрузочная диаграмма двигателя может быть получена только после расчета переходных процессов в электроприводе за цикл работы (например, зависимость потерь мощности или

тока в функции времени).

Упрощенная нагрузочная диаграмма и уточненная нагрузочная диаграмма необходимы уже на первом этапе расчета мощности двигателя, поэтому чем точнее они будут построены, тем большая вероятность правильного выбора двигателя и, как следствие, всех дальнейших расчетов.

Анализируя совместно тахограмму и нагрузочную диаграмму механизма, делают вывод о режиме работы привода, что является также важнейшей задачей.

Механическая характеристика рабочей машины есть зависимость статического момента от скорости рабочего вала (или приведенного статического момента от скорости вала двигателя). Анализ ее позволяет правильно выбрать способ регулирования скорости привода. При этом также учитывается, какой характер имеет нагрузка: реактивный или потенциальный.

### ***3.3 Выбор принципиальных решений***

*3.3.1 Построение механической части привода.* Для упрощения механической части, уменьшения габаритов и потерь, а также осуществления благоприятного динамического режима следует осуществлять передачу движения от двигателя к рабочему органу (валу) как можно более децентрализованным путем и без использования промежуточных звеньев в виде редукторов или других механизмов.

Вместе с тем повышение номинальной скорости вращения электродвигателей позволяет уменьшить их массу, габариты, себестоимость, что влияет на технико-экономические показатели электропривода в целом. Поэтому для согласования двигателя и нагрузки по компонентам вектора движения обычно применяют промежуточные механические передачи для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот, для понижения угловой скорости (силовые редукторы).

Передачи, в зависимости от назначения и условий эксплуатации, должны удовлетворять определенным требованиям в отношении габаритов, коэффициента полезного действия, люфта, кинематической точности, инерционности, жесткости и надежности. Так, кинематическая точность передачи является главным требованием к позиционным механизмам; плавность работы – основное требование к высокоскоростным передачам; величина контактного давления между зубьями - наиболее существенное требование к силовым передачам; величина бокового зазора в передаче имеет важное значение для реверсивных передач, в которых она должна быть минимальной, т. к. величина бокового зазора определяет в основном мертвый ход передачи (люфт).

*3.3.2 Выбор типа привода (двигателя) и способа регулирования координат.* Основой для выбора двигателя и способа регулирования координат являются технические условия на проектирование конкретного механизма.

В том случае, когда заданным условиям удовлетворяет один тип двигателя, решение задачи ограничивается выявлением этого типа. Однако, как правило, условиям на проектирование удовлетворяет несколько типов электродвигателей

и способов регулирования (если это требуется) координат.

Вследствие этого после определения подходящих типов двигателей следует выбрать из них такой, который способен обеспечить лучшие технико-экономические показатели.

Рассмотрим наиболее общие положения, позволяющие на первом этапе отобрать несколько подходящих вариантов (типов) электроприводов.

Весьма важным обстоятельством, которое учитывается при выборе двигателя для промышленного электропривода, является господство в промышленном электроснабжении системы трехфазного переменного тока, а также относительная простота, надежность и дешевизна асинхронных электродвигателей по сравнению с электродвигателями постоянного тока.

Например, если за единицу принять стоимость эксплуатации асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, то стоимость эксплуатации асинхронного электродвигателя с фазным ротором в пять, а электродвигателя постоянного тока в 10 раз дороже. Не случайно в настоящее время центральное место занимает массовый нерегулируемый электропривод на основе асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Поэтому перебор вариантов типов двигателей следует начинать с короткозамкнутого асинхронного электродвигателя (особенно для нерегулируемых электроприводов). Что касается электропривода постоянного тока, то его следует применять только тогда, когда электроприводы переменного тока не обеспечивают требуемых характеристик механизма (рабочей машины) либо неэкономичны. В ряде случаев следует также рассматривать применение двигателей переменного тока с фазным ротором (например, для крановых механизмов) с реостатным регулированием, а также систем электрического и электромеханического каскадов. Для производственных механизмов, работающих при длительной нагрузке и не требующих электрического регулирования скорости, используются электродвигатели переменного тока. Здесь наибольшее применение получили асинхронные короткозамкнутые двигатели различных модификаций и исполнений. Недостатками применения таких электродвигателей являются большие пусковые токи при прямом включении и относительно большие потери при большой частоте включения.

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются лишь в относительно мощных маховиковых приводах, где асинхронный электродвигатель при пуске будет иметь недопустимо большие потери, а при работе недостаточно большое скольжение, требующееся для уменьшения размеров маховика. Электродвигатели с фазным ротором предпочтительны также, по сравнению с короткозамкнутыми, тогда, когда при значительных массах пуск происходит при больших значениях нагрузки, а также когда требуется интенсивное динамическое торможение.

При продолжительной непрерывной работе энергоемких механизмов со спокойной нагрузкой, редких включениях, малых нагрузках при пуске, малых номинальных скоростях вращения наиболее рациональными являются синхронные электродвигатели. Особо ценной является их способность при перевозбуждении вырабатывать реактивную мощность, чем улучшается коэффи-

циент мощности сети.

При питании электродвигателя от контактной сети более чувствительным к падению напряжения является асинхронный электродвигатель, а менее чувствительным – электродвигатель постоянного тока с последовательным возбуждением. При выборе электродвигателя важно не только обеспечить его работу на естественной характеристике, но и удовлетворить требованию согласования механической характеристики рабочей машины и механической характеристики электродвигателя, что важно с точки зрения энергосбережения.

Производственные механизмы, требующие регулирования скорости или других координат. В этом случае при выборе электродвигателя и способа регулирования координат приходится учитывать целый комплекс технических требований, предъявляемых рабочими машинами, главнейшими из которых являются:

- 1) диапазон регулирования;
- 2) плавность регулирования;
- 3) характер изменения статического момента нагрузки в зависимости от скорости (механическая характеристика рабочих машин);
- 4) надежность и простота схемы управления.

При экономическом сравнении вариантов, равноценных с точки зрения удовлетворения технических требований, главнейшим показателем являются:

- 1) стоимость электрооборудования;
- 2) КПД и коэффициент мощности регулировочного цикла;
- 3) расход и стоимость активной и реактивной энергии за цикл;
- 4) годовые эксплуатационные расходы и т. д.

В зависимости от требований конкретного механизма набор решений может оказаться очень широким - от простейших дешевых и надежных массовых регулируемых приводов, например, по системе параметрический источник тока двигатель, до прецизионных дорогих приводов с развитым микропроцессорным управлением. Кроме того, следует учитывать энергетический аспект выбора способа регулирования скорости: минимальный габарит двигателя и его полное использование по нагреву имеет место, когда способ регулирования скорости по показателю допустимой нагрузки соответствует зависимости нагрузки от скорости. Так, при нагрузке  $M_c = \text{const}$  целесообразнее использование способов регулирования при постоянном допустимом моменте, а при  $P_c = \text{const}$  – при постоянной допустимой мощности.

При больших диапазонах регулирования, составляющих десятки и сотни, при значительных мощностях в настоящее время применяются регулируемые асинхронные электроприводы с частотным, частотно-токовым и векторным управлением, иногда регулируемые электропривода постоянного тока с управляемыми выпрямителями (реже – с индуктивно-емкостными источниками тока, широтно-импульсными преобразователями).

Трехфазные электродвигатели с частотным управлением находят применение также в таких приводах, где нельзя использовать двигатель постоянного тока. Это высокоскоростные приводы, например:

- а) приводы электрошпинделей станков;
- б) групповые, многодвигательные регулируемые ЭП;
- в) приводы, работающие в экстремальных условиях, и т. п.

Задача правильного выбора электродвигателя и способа регулирования координат является более сложной в тех случаях, когда требуется небольшой диапазон плавного регулирования скорости (меньше 10), или требуется получение нескольких фиксированных значений рабочих скоростей, или не предъявляются высокие требования к качеству регулирования координат. Здесь, в зависимости от вида механической характеристики рабочей машины, требований к качеству регулирования, длительности работы на отдельных скоростях в регулировочном цикле и т. д., возможно использование большого количества разнообразных способов регулирования.

Поэтому можно рекомендовать после подбора нескольких вариантов приводов провести тщательный отбор одного-двух по методике экспертных оценок, а также воспользоваться анализом применяемых электроприводов рассматриваемого механизма на практике, обращаясь к справочной литературе.

*3.3.3 Оценка и сравнение выбранных вариантов.* После выбора нескольких вариантов привода для рассматриваемой рабочей машины следует провести их сравнительную оценку. При этом оцениваются и сравниваются в первую очередь технические, технологические и экономические характеристики рассматриваемых вариантов.

Прежде всего проводят оценку технических характеристик.

При оценке технических характеристик обычно исследуют, в какой степени обеспечивается низкая себестоимость изготовления, монтажа, наладки электропривода, а также оценивается сложность эксплуатации установки. Сравнительная экономическая оценка выбранных вариантов представляется в виде расчёта экономической эффективности новой разработки.

На первоначальном этапе отбора желаемых вариантов систем электроприводов проведение строгих технико-экономических расчётов не представляется возможным из-за отсутствия требуемых исходных данных. Поэтому здесь можно воспользоваться так называемым «методом экспертных оценок». Выбор наилучшего решения производится определением взвешенной суммы, лучший вариант имеет большую сумму.

Выбранный вариант привода подлежит последующему расчёту.

### **3.4 Расчет силового электропривода**

*3.4.1 Расчет исходных параметров и выбор двигателя.* На первом этапе проектирования уточняется постановка задачи, разрабатывается механическая часть привода, выбирается и обосновывается тип двигателя (привода), способ регулирования координат, уточняется нагрузочная диаграмма механизма. Это позволяет определить режим работы двигателя, метод расчета двигателя по нагреву и выбрать наиболее подходящий номинальный режим работы.

Наилучшее использование двигателя имеет место, если для данного режи-

ма работы выбирается наиболее подходящий номинальный режим. Например, для длительного режима – двигатель режима S1, для кратковременного – S2, для повторно-кратковременного – S3 и т. д.

Известно, что задача расчета мощности двигателя не может быть решена однозначно (за исключением случая длительного режима с постоянной нагрузкой на валу). После расчета переходных процессов в электроприводе за цикл работы, а также построения уточненной нагрузочной диаграммы выполняется проверка двигателя по нагреву

Метод проверки по нагреву двигателя может не совпадать с методом, принятым для предварительного расчета, и требует дополнительного обоснования. На практике чаще всего для проверки двигателя по нагреву используется метод эквивалентного тока, а в отдельных случаях – метод средних потерь, значительно реже – метод эквивалентного момента.

Проверка двигателя по перегрузочной способности обычно выполняется сразу после предварительного расчета мощности по нагреву и выбора двигателя.

#### *3.4.2 Расчет исходных параметров и выбор силовых преобразователей.*

Для регулируемого электропривода переменного и постоянного тока необходимо выбрать полупроводниковый преобразователь электрической энергии. При определении параметров такого преобразователя необходимо учитывать экономические и технические параметры.

Так, например, преобразователь частоты для асинхронного двигателя должен обеспечивать требуемый закон частотного регулирования (скалярное управление, частотно-токовое или векторное). Следует иметь в виду, что преобразователь должен обеспечивать все режимы работы привода (статические и динамические), обладать высокими энергетическими показателями. В то же время преобразователь энергии не должен быть избыточен по функциональным возможностям, так как это влечёт удорожание его.

### **3.5 Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода**

Расчёт и анализ статических электромеханических и механических характеристик двигателя – важный этап проектирования электропривода, который позволяет оценить его работу в установившемся режиме.

Статическая электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость угловой скорости двигателя от тока в установившемся режиме работы  $\omega = f(I_r)$ . Электромеханическая характеристика позволяет оценить загрузку двигателя по току, а также верно выбрать коммутационные аппараты.

Статическая механическая характеристика двигателя  $\omega = f(M)$  представляет собой зависимость угловой скорости от момента (электромагнитного  $M_s$  или на валу  $M_e$ ) в установившемся режиме работы. Момент электромагнитный  $M_s$  и на валу  $M_e$  связаны соотношением  $M_s = M_e \pm \Delta M$ , где  $\Delta M$  – момент

потерь вращения. В двигательном режиме работы момент электромагнитный  $M_e$  больше момента на валу  $M_g$  на величину  $\Delta M$ , а в тормозных режимах (рекуперативное торможение, торможение противовключением и динамическое торможение) меньше.

Статическая механическая характеристика позволяет определить угловую скорость, с которой будет вращаться вал двигателя при данном моменте нагрузки  $M_c$  на валу. Статическая механическая характеристика есть множество точек установившегося режима работы электрической машины, для которого момент, развиваемый двигателем равен моменту нагрузки ( $M = M_c$ ). При совместном рассмотрении механических характеристик механизма  $\omega = f(M_c)$  и двигателя  $\omega = f(M)$  в качестве последней следует рассматривать зависимость угловой скорости в функции момента двигателя на валу  $\omega = f(M_g)$ . Однако следует помнить, что эта функция имеет разрыв первого рода при переходе от двигательного к тормозному режиму работы. Поэтому в ряде задач целесообразнее рассматривать зависимость угловой скорости от электромагнитного момента двигателя  $\omega = f(M_e)$ , отнеся момент потерь вращения, вызванный механическими потерями в двигателе, если он превышает 5 % от номинального электромагнитного момента, к нагрузке  $M_c$  или пренебрегая им в случае его малости (менее 5 %). При этом следует помнить, что момент потерь вращения  $\Delta M$  зависит от угловой скорости двигателя, т. е.  $\Delta M = f(\omega)$ .

Статические характеристики (электромеханические и механические), рассчитанные при номинальных параметрах для нормальной схемы включения двигателя, носят название «естественные характеристики». При изменении хотя бы одного из параметров двигателя или при изменении схемы включения двигателя двигатель в установившемся режиме будет работать на искусственной характеристике. Естественная характеристика у двигателя одна единственная, а искусственных характеристик множество.

Нужно помнить, что регулирование, например, скорости – суть получения необходимого семейства искусственных механических характеристик. Наилучший способ регулирования с энергетической точки зрения такой, который обеспечит идентичность вида механической характеристики механизма  $M_c = f(\omega)$  и зависимости допустимого момента двигателя от скорости  $M_{\text{дв.дон}} = f(\omega)$ .

Следует иметь в виду, что расчёт статических режимов работы и характеристик двигателя в этих режимах – очень важный этап проектирования электропривода, т. к. по этим характеристикам осуществляют расчёт и выбор пусковых, тормозных и регулировочных реостатов; выбирают, при необходимости, приемлемый тип силового преобразователя электрической энергии; рассчитывают и осуществляют выбор электрических аппаратов управления и защиты.

Методы расчёта естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик двигателей постоянного тока приведены в [1, 2]. Большинство методов расчёта требуют знаний, кроме каталожных данных двигателя, также его электрических параметров (активных и индуктивных сопро-



тивлений статорных и роторных обмоток асинхронных двигателей, полного внутреннего сопротивления якоря двигателя постоянного тока и др.). Если эти параметры в справочниках не приведены, что чаще всего и бывает, необходимо применять приближённые методы расчёта, основанные лишь на данных, приведенных в каталогах (справочниках).

### ***3.6 Расчет переходных процессов за цикл работы***

Расчет и анализ переходных процессов является одним из важнейших этапов проектирования электропривода, так как позволяет получить достаточно информации для оценки его работоспособности в переходном режиме.

Переходный процесс заключается в переходе от одного установившегося (стационарного, равновесного) состояния системы к другому установившемуся ее состоянию. Очевидно, если бы электропривод не обладал инерцией того или иного рода: механической, электромагнитной, тепловой, то переходы от одного установившегося состояния к новому переходили бы мгновенно, т. е. переходный процесс как таковой не имел бы места.

Характер протекания и продолжительность переходного процесса определяются как его видом, так и особенностями собственно электропривода, а именно: количеством и природой содержащихся в нем инерционностей. Последние количественно определяются постоянными времени. Постоянные времени обычно выражаются через параметры электропривода.

Переходный процесс представляет собой явления в механических, электрических и других системах, возникающие в результате резких изменений параметров самой системы – сопротивлений, коэффициентов усиления, индуктивностей, моментов инерции и т. д. (параметрические возмущения); или внешних воздействий на нее: задающие или управляющие воздействия – со стороны нагрузки (момент нагрузки); со стороны источников питания (величина напряжения, частоты и т. д.).

Можно отметить три группы электроприводов с различным влиянием на их работу переходных процессов:

- 1) приводы с незначительным влиянием переходных процессов – чаще всего это нерегулируемые электроприводы, например, насосов, конвейеров и т. д., работающие в длительном режиме со «спокойной» нагрузкой на валу;
- 2) приводы с преобладающими переходными процессами (с частыми пусками, реверсами, переходами на различные заданные скорости и т. д.), работающие преобладающее время в режиме отработки задающих воздействий;
- 3) приводы, работающие в квазинепрерывном режиме, когда при неизменном управляющем воздействии система обрабатывает возмущающие воздействия (иногда такой режим называют режимом стабилизации какой-нибудь координаты).

На практике встречаются также электроприводы, сочетающие в себе свойства приводов второй и третьей групп.

При исследовании переходных процессов электропривода необходимо установить, является система линейной или нелинейной.

Наиболее четкое разграничение между линейной и нелинейной системами сводится к тому, что первая описывается линейным дифференциальным уравнением  $n$ -го порядка (где  $n$  – порядок уравнения, равный, как правило, числу инерционных звеньев или постоянных времени), а вторая – нелинейным уравнением. Как известно, в линейном дифференциальном уравнении все коэффициенты представляют собой постоянные величины или функции независимой переменной (чаще всего времени  $t$ ); в нелинейном уравнении коэффициенты выражаются функциями переменной величины или их производных.

Важность разграничения между линейной и нелинейной системами определяется коренным различием в природе решений того или иного типа дифференциальных уравнений. Основное различие заключается в том, что к нелинейной системе не может быть применен принцип суперпозиции, т. е. в ней реакция или эффект на выходе не пропорциональны возмущению, что значительно усложняет решение.

Для линейных систем движение, вызванное двумя или несколькими независимыми воздействиями, определяется суммой (суперпозицией) движений, вызванных каждым воздействием порознь. Таким образом, согласно принципу суперпозиции полный переходный процесс в линейной системе представляет собой сумму отдельных переходных процессов, обусловленных накоплением энергии в каждой индуктивности и в каждой емкости (при инерционных массах), а также каждым внешним источником энергии, присоединенным к системе. К этому прибавляются показатели установившегося процесса, обусловленного каждым внешним источником энергии. Переходный процесс может рассчитываться начиная с любого момента времени  $t = 0$ , принимаемого за начальный, если известны начальные энергетические условия системы в этот момент.

В зависимости от решаемой задачи на практике применяются различные методы исследования переходных процессов.

#### 1 Классический метод решения дифференциальных уравнений:

- в аналитической форме (если система линейная), используя принцип суперпозиции;

- линеаризация и аналитическое решение, если система нелинейная (здесь, чаще всего, исследуется движение привода в окрестности точки установившегося состояния движение в «малом»);

- численное интегрирование нелинейных уравнений известными методами (например, приращений; пошаговое решение на ПЭВМ с линеаризацией на каждом шаге и т. д.).

#### 2 Операторный метод решения – как правило, для линейных систем с использованием преобразований Карсона – Хевисайда.

#### 3 Составление по исходным линейным (линеаризованным) дифференциальным уравнениям при нулевых начальных условиях уравнений в операторной форме и структурных схемах с последующим использованием для их исследования специфических методов классической теории управления (корневые, частотные и т. д.). Обычно этот метод используется на этапе параметрического и структурного синтеза систем автоматизированного электропривода.

4 Составление по исходным уравнениям уравнений переменных состояния и схем переменных состояния с последующим их исследованием методами современной теории управления.

С точки зрения расчета переходных процессов в электроприводе, особенно для систем высокого порядка ( $n > 3$ ), а также нелинейных, последний метод представляется наиболее удобным.

### ***3.7 Проверка правильности расчета мощности и окончательный выбор двигателя***

Как уже неоднократно отмечалось, предварительно выбранный двигатель требует его проверки по нагреву. Это объясняется приблизительной оценкой его нагрева по упрощенным нагрузочным диаграммам.

Для более точной оценки нагрева двигателя следует рассчитать и построить его нагрузочную диаграмму за цикл работы. Эта задача решается в конечном итоге при расчете переходных процессов с учетом как механической, так и электромагнитной инерции.

Проверку двигателя по нагреву следует выполнять методом средних потерь или, после дополнительного обоснования, одним из методов эквивалентных величин. При этом следует учитывать особенности расчета средних потерь и эквивалентных величин за цикл работы в зависимости от режима работы привода номинальных режимов работы выбранных двигателей, как это проанализировано ранее для этапа предварительного выбора двигателя.

### ***3.8 Разработка схемы электрической принципиальной***

*3.8.1 Разработка схемы силовых цепей, цепей управления и защиты.* В курсовом проекте студент разрабатывает схему электрическую принципиальную, которая должна обеспечивать требуемые статические и динамические режимы работы.

Схема электрическая принципиальная также должна обеспечивать типовые защиты и блокировки исполнительного двигателя (двигателей в случае многодвигательного электропривода), силового преобразователя и системы управления.

*3.8.2 Выбор элементов схемы.* Все электротехнические элементы, представленные на схеме принципиальной студентом, должны быть рассчитаны и выбраны по техническим параметрам.

### ***3.9 Заключение***

В заключении студент подводит итоги проектирования, отмечает, достигнуты ли в процессе проектирования те цели, которые определены на начальном этапе проектирования. Какими свойствами обладает спроектированный электропривод. Определяет качественные и количественные показатели выбранного способа регулирования координат. Формулирует выводы.

## 4 Задания на курсовую работу

По последней цифре шифра зачетной книжки выбирается номер задания (таблица 3).

Таблица 3 – Номер задания

Последняя цифра шифра	1	Электропривод стола продольно-строгального станка
	2	Электропривод механизма передвижения слитковоза
	3	Электропривод скипового шахтного подъемника
	4	Электропривод конвейера
	5	Электропривод эскалатора метрополитена
	6	Электропривод центробежного насоса
	7	Электропривод лифта высотного здания
	8	Электропривод клетьевого шахтного подъемника
	9	Электропривод механизма подъема грейферного крана
	0	Электропривод механизма передвижения мостового крана

По предпоследней цифре шифра выбирается номер варианта соответствующего задания.

### *Тексты заданий с вариантами*

#### **Задание 1. ЭП продольно-строгального станка**

Продольно-строгальный станок (ПСС) относится к классу металло-режущих станков. Они служат для обработки металлов резанием. Обработка заготовки производится путем снятия стружки, в результате чего заготовка принимает форму, близкую к требуемой (черновая обработка) или совпадающую с ней (чистовая обработка).

В ПСС главным движением является передвижение стола, на котором крепится обрабатываемая заготовка (рисунок 1). При строгании снятие стружки с заготовки происходит в течение прямого (рабочего) хода стола, при обратном ходе снятия стружки не происходит.

Электропривод получает питание от трехфазной сети переменного тока (напряжение 380 В, частота 50 Гц). Продольно-строгальный станок рассчитан на обработку деталей весом  $G_{дет}$  при скорости прямого (рабочего) хода  $V_{np}$ . Скорость вращения двигателя  $W_{дв}$ . Графики изменения усилий резания  $F(z)$  в функции скорости прямого хода  $V_{np}$  и изменения КПД передач  $KПД_{мех}$  в функции  $V_{np}$  представлены на рисунке 2.

Вертикальная составляющая усилия резания  $F(y)$  составляет 30 % от  $F(z)$  (т. е.  $F(y) = 0.3 \cdot F(z)$ ).

$M_u$  – коэффициент трения стола о направляющие.

$G_{ст}$  – вес стола.

$V_{обр}$  – скорость обратного хода стола.

$L$  – длина хода стола.

$L_m$  – длина обрабатываемых заготовок.

$D$  – диаметр делительной окружности.

$H$  – ширина реечной шестерни (материал: сталь 45).

Момент инерции редуктора и соединительных валов, приведенный к валу электродвигателя, составляет 25 % от суммарного момента инерции поступательно движущихся элементов кинематической цепи.

$J$  – момент инерции полумуфты.

$C$  – жесткость муфты.

Все остальные связи между элементами кинематической цепи считать абсолютно жесткими. Разбег, реверс и торможение стола происходит при холостом ходе, т. е. с моментом статическим, который определяется весом стола и обрабатываемой детали.

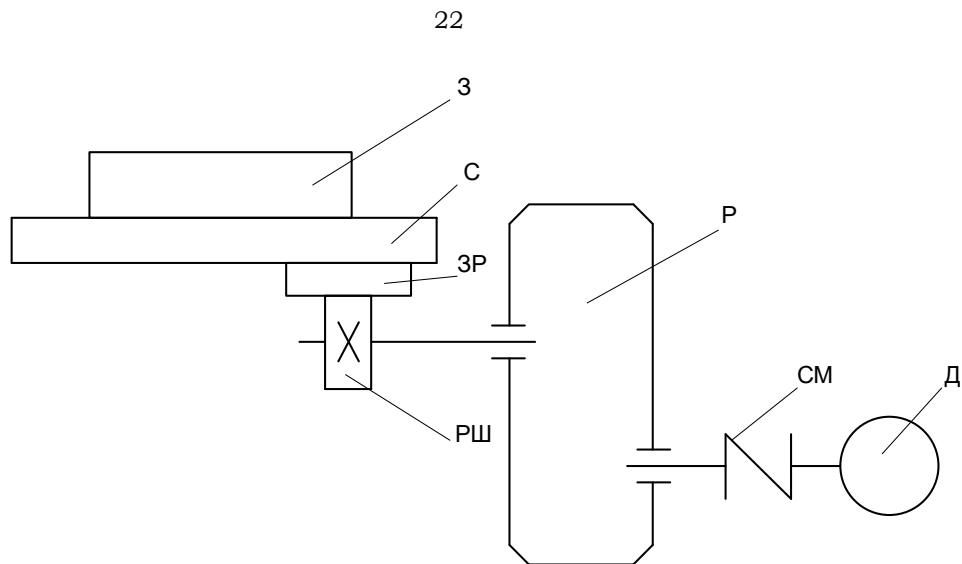
По технологическим причинам вход резца в металл и выход происходит при понижении скорости ( $V_{ex} = V_{вых}$ ). Обычно  $V_{ex} = 15$  м/мин.

С целью повышения производительности время разгона и торможения привода стола должно быть минимальным исходя из допустимого ускорения  $A_{дон}$ . Допустимое ускорение задается технологами исходя из качества обрабатываемого изделия ( $A_{дон} = 5$  м/с<sup>2</sup>).

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 1. Графики изменения усилий резания  $F(z)$  в функции скорости прямого хода  $V_{пр}$  и изменения КПД передач  $KПД_{мех}$  в функции  $V_{пр}$  представлены на рисунке 2. Исходные данные для расчета представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Исходные данные к заданию 1

Параметр	Единица измерения	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_{пр}$	м/мин	30	32	36	40	44	48	50	52	56	60
$V_{обр}$	м/мин	64	70	82	90	102	110	122	136	142	150
$G_{дет}$	кН	100	96	90	84	78	72	66	62	58	52
$G_{ст}$	кН	68	60	52	50	48	42	40	38	34	32
$L$	м	10,5	9	7	8,5	7,5	8	7,5	9	10	10,5
$L_m$	м	8,5	7	5,5	6,4	5,2	5	6	7,2	8,5	9
$D$	м	1,2	0,75	0,8	0,9	0,5	0,55	1	0,6	0,54	0,48
$H$	м	0,1	0,09	0,08	0,08	0,06	0,09	0,1	0,08	0,06	0,06
$M_u$	–	0,07	0,05	0,08	0,06	0,05	0,008	0,07	0,05	0,08	0,06
$W_{ов}$	рад/с	100	150	100	100	150	150	150	100	150	100
$J$	кг·м <sup>2</sup>	10,5	18	13,4	8,5	7,6	4,2	13,2	9,1	4,8	3,5
$C$	Н·м	1,25e7	1,0e7	0,8e7	1,1e7	8,0e7	0,14e7	1,45e7	2,0e7	1,7e7	13,5e7



З – заготовка; С – стол; ЗР – зубчатая рейка; РШ – реечная шестерня; Р – редуктор; СМ – соединительная муфта; Д – двигатель

Рисунок 1 – Кинематическая схема ЭП продольно-строгального станка

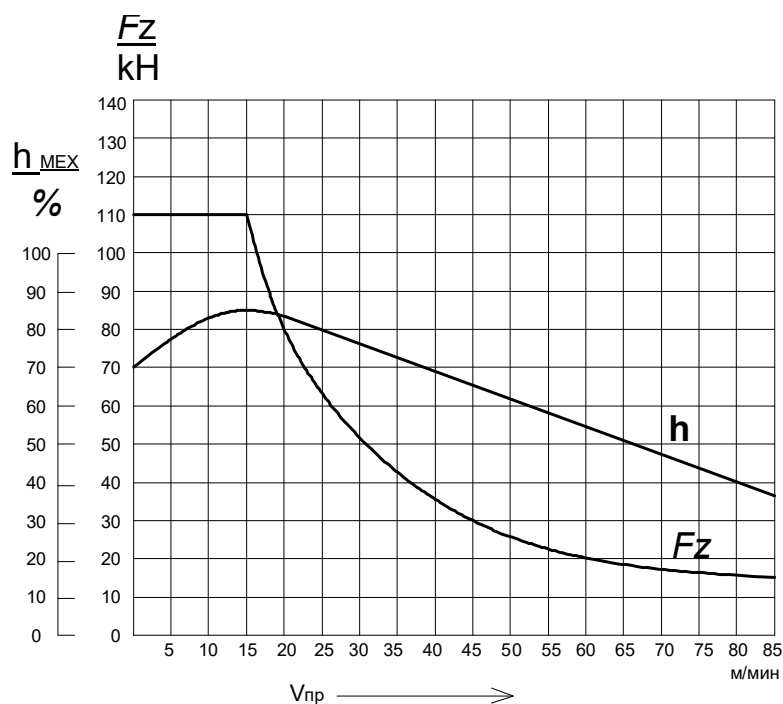


Рисунок 2 – Графики изменения усилий резания  $F(z)$  в функции скорости прямого хода  $V_{пр}$  и изменения КПД передач  $KПД_{мех}$  в функции  $V_{пр}$

### Задание 2. ЭП механизма передвижения слитковоза

Электропривод получает питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В. После загрузки слитка в люльку слитковоз разгоняется до скорости  $V_1$  и направляется к приемному рольгангу. Для обеспечения требуемой точности останова  $\pm M$  при подходе слитковоза к рольгангу скорость понижается до величины  $V_2$ , которую нужно определить

исходя из точности останова. Спустя некоторое время происходит движение на пониженной скорости, двигатели переводятся в режим торможения, затем отключаются от сети и накладывается механический тормоз с моментом торможения, равным номинальному моменту двигателя.

Спустя паузу  $T_1$ , обусловленную выгрузкой слитка, слитковоз разгоняется до скорости  $1.4 \cdot V_1$  и с повышенной скоростью направляется за новым слитком.

При подходе к нагревательному колодцу производится переход на пониженную скорость  $V_2$ , затем торможение и останов в точно назначенном месте путем наложения механического тормоза.

Спустя паузу  $T_2$  цикл повторяется.

Полная длина хода слитковоза в одну сторону –  $L$ .

Данные элементов кинематической схемы приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Данные элементов кинематической схемы

Элемент кинематической схемы	Обозначение	$D_{нар}$ , мм	$D_{вн}$ , мм	$H$ , мм	Количество зубьев
Шестерня	$Z_1$	128	100	170	16
Колесо	$Z_2$	992	150	170	124
Шестерня	$Z_3$	448	100	200	28
Колесо	$Z_4$	800	100	200	50
Ходовое колесо	4	1050	150	80	2 колеса

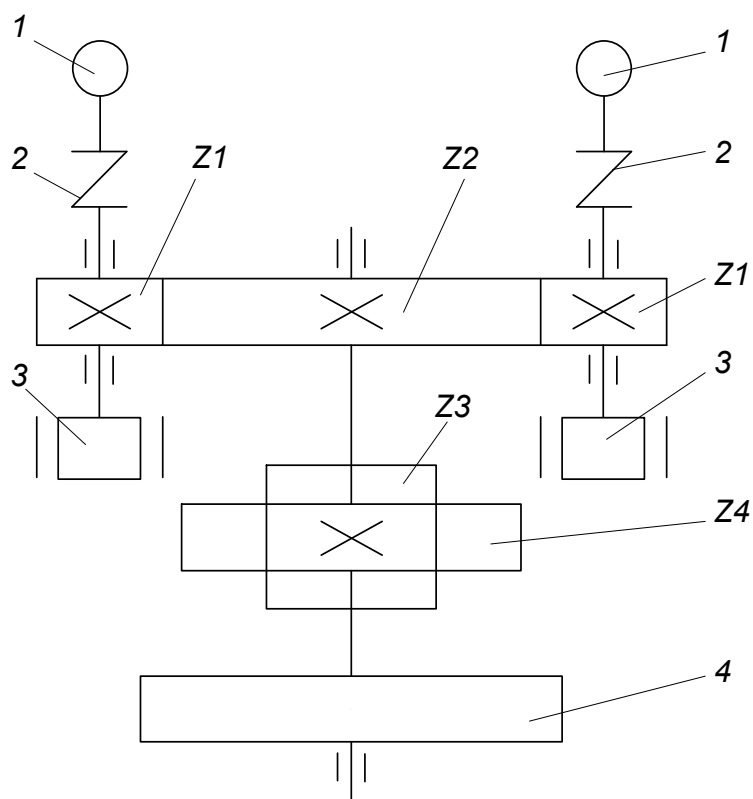
Технические данные ЭП механизма передвижения слитковоза:

- 1) вес слитковоза –  $G_1$ , вес слитка –  $G_2$ ;
- 2) коэффициент трения качения ходового колеса о рельс –  $MU_1$ ;
- 3) коэффициент трения скольжения в подшипниках ходовых колес –  $MU_2$ ;
- 4) радиус цапфы оси катков  $R_u = 102,5$  мм;
- 5) коэффициент, учитывающий трение реборды колеса о рельс –  $K$ ;
- 6) КПД редуктора –  $KPD$ ;
- 7) момент инерции муфты –  $J_1$ ;
- 8) жесткость муфты  $C = 7,6e + 9$  Н·м;
- 9) Момент инерции тормозного диска –  $J_2$ .

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 3. Исходные данные для расчета приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Исходные данные к заданию 2

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_1$	м/с	2,83	3,8	2,82	3,9	3,85	2,84	2,76	3,84	2,81	3,86
$T_1$	с	50	50	40	50	45	45	50	50	40	40
$T_2$	с	60	50	40	30	30	60	50	40	30	60
$L$	м	130	150	160	170	180	130	140	180	160	150
$G_1$	кН	800	700	750	600	800	650	600	750	750	700
$G_2$	кН	250	200	150	250	300	250	300	250	150	200
$MU_1$	–	0,1	0,11	0,13	0,1	0,12	0,11	0,13	0,12	0,11	0,1
$MU_2$	–	0,15	0,14	0,13	0,12	0,15	0,16	0,15	0,14	0,13	0,15
$K$	–	$1,5e-3$	$1,55e-3$	$1,6e-3$	$1,4e-3$	$1,45e-3$	$1,5e-3$	$1,6e-3$	$1,65e-3$	$1,45e-3$	$1,5e-3$
$K$	–	$1,5e-3$	$1,55e-3$	$1,6e-3$	$1,4e-3$	$1,45e-3$	$1,5e-3$	$1,6e-3$	$1,65e-3$	$1,45e-3$	$1,5e-3$
$KPD$	–	0,87	0,9	0,92	0,88	0,87	0,9	0,83	0,86	0,81	0,76
$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
$M$	мм	25	25	30	20	25	40	50	30	60	35



1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – механический тормоз; 4 – ходовое колесо

Рисунок 3 – Кинематическая схема ЭП механизма передвижения слитковоза



### Задание 3. ЭП скипового шахтного подъёмника

Электропривод получает питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 10 кВ.

Скиповый шахтный подъёмник имеет следующие данные:

- 1) грузоподъёмность скипа –  $G_0$ ;
- 2) вес порожнего скипа –  $G_1$ ;
- 3) вес одного метра троса –  $G_m$ ;
- 4) диаметр барабана –  $D_1$ ;
- 5) диаметр направляющих шкивов –  $G_2$ ;
- 6) сила тяжести барабана –  $G_2$ ;
- 7) сила тяжести шкивов –  $G_3$ ;
- 8) момент инерции муфт –  $J_1$ ;
- 9) жесткость муфты –  $C_1$ ;
- 10) жесткость 1 м троса –  $C_2$ ;
- 11) передаточное число редуктора –  $I$ ;
- 12) КПД редуктора –  $KPD_r$ ;
- 13) КПД других механических передач –  $KPD_m$ ;

14) момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, составляет 40 % от момента инерции барабана и шкивов, приведенного к валу двигателя.

Скиповый шахтный подъёмник предназначен для подъема породы из шахты (т. е. с нижней площадки на верхнюю).

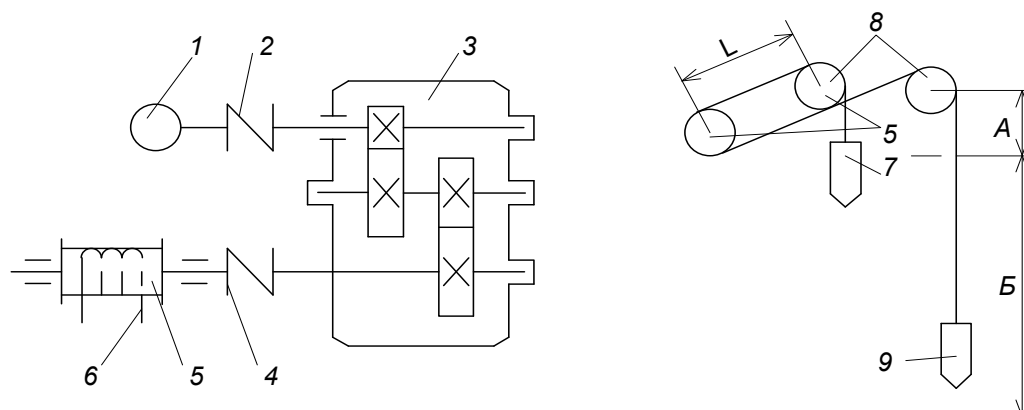
Скорость скипа должна регулироваться. Разгон и торможение скипа двухступенчатые: на первой ступени разгона и на второй ступени торможения ускорение не должно превышать  $A_1$ , на второй ступени разгона –  $A_2$ , на первой ступени торможения –  $A_3$ ;

- 15) длина разгрузочного участка –  $H$ ;
  - 16) время разгрузки и загрузки одинаково и равно –  $T_1$ ;
  - 17) скорость скипа максимальная –  $V_1$ ;
  - 18) скорость выхода скипа на разгрузочную кривую –  $V_2$ ;
- Установка должна предусматривать режим ревизии;
- 19) скорость при ревизии –  $V_3$ ;
  - 20) скорость после первой ступени разгона – 1,5 м/с;
- Привод должен обеспечивать аварийный останов;
- 21) точность остановки скипа –  $\pm DS$ .

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 4. Исходные данные для расчета приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Исходные данные к заданию 3

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_0$	кН	80	100	65	94	75	90	98	85	74	88
$G_1$	кН	48	54	32	46	38	50	52	44	38	46
$G_M$	Н	60	40	35	74	80	55	64	78	60	54
$D_1$	м	4,8	5	3,6	3,2	4,2	4,6	3,8	4,2	3,2	5
$D_2$	м	3,2	3	4	4	3,6	3,2	4	3,4	3,4	4
$G_2$	кН	70	75	65	60	70	70	65	70	64	75
$G_3$	кН	52	5	60	70	44	50	70	50	60	58
$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	20	32	44	18	36	22	28	32	24	26
$C_1$	Нм	13e7	1,2e7	12,5e7	1,05e7	5e7	7,5e7	1,2e7	1,35e7	9,3e7	0,33e7
$C_2$	Н/м	20e7	15e7	9,4e7	15e7	8e7	11e7	1,5e7	2,5e7	25e7	360e7
$I$	–	10	12,5	16	12,5	10	11,2	9	12,5	11,2	10
$KPD_p$	–	0,9	0,82	0,78	0,92	0,86	0,78	0,84	0,78	0,94	0,9
$KPD_M$	–	0,94	0,97	0,99	0,84	0,87	0,98	0,91	0,89	0,94	0,97
$A_1$	м/с <sup>2</sup>	0,55	0,45	0,3	0,25	0,6	0,5	0,3	0,25	0,3	0,45
$A_2$	м/с <sup>2</sup>	1	0,8	0,75	0,9	1	1,1	0,6	0,8	1	0,75
$A_3$	м/с <sup>2</sup>	1,5	1,4	1,2	1,5	1,1	1,6	1,3	1,25	1,4	1,35
$V_1$	м/с	7,5	6	7,2	7	6,8	7,2	7,5	6	6,4	7,3
$V_2$	м/с	1,2	1,1	1	1,4	1,3	1,25	1	1,1	1,2	1,35
$V_3$	м/с	1	1,1	0,8	0,7	0,65	0,95	0,9	1	0,7	0,6
$T_1$	с	12	10	15	17	13	10,8	12,5	11	13,4	11,5
$H$	м	4	2,5	3	4	2,4	1,8	3,5	2,5	4,5	3
$H_1$	м	40	42	44	38	56	70	34	26	24	35
$H_2$	м	180	140	110	125	135	160	135	180	165	170
$L$	м	50	6	7	7,5	5,5	4,5	3,5	8	7	6,5
$DS$	м	0,2	0,35	0,1	0,3	0,25	0,15	0,05	0,15	0,3	0,35



1 – электродвигатель; 2 – соединительная муфта; 3 – цилиндрический двухступенчатый редуктор; 4 – соединительная муфта; 5 – барабан; 6 – канат; 7 – порожний шип; 8 – направляющие шкивы; 9 – груженный шип;  $A$  – верхняя площадка;  $B$  – нижняя площадка

Рисунок 4 – ЭП скипового шахтного подъёмника

#### Задание 4. ЭП конвейера

Электропривод получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Конвейер осуществляет прерывное движение, перемещая попеременно грузы весом  $G_1$  и  $G_2$ .

Перед остановкой привод конвейера переводится на пониженную скорость, которая должна быть рассчитана, исходя из заданной точности останова  $\pm M$ .

Окончательный останов осуществляется наложением механического тормоза с тормозным моментом, равным номинальному моменту двигателя.

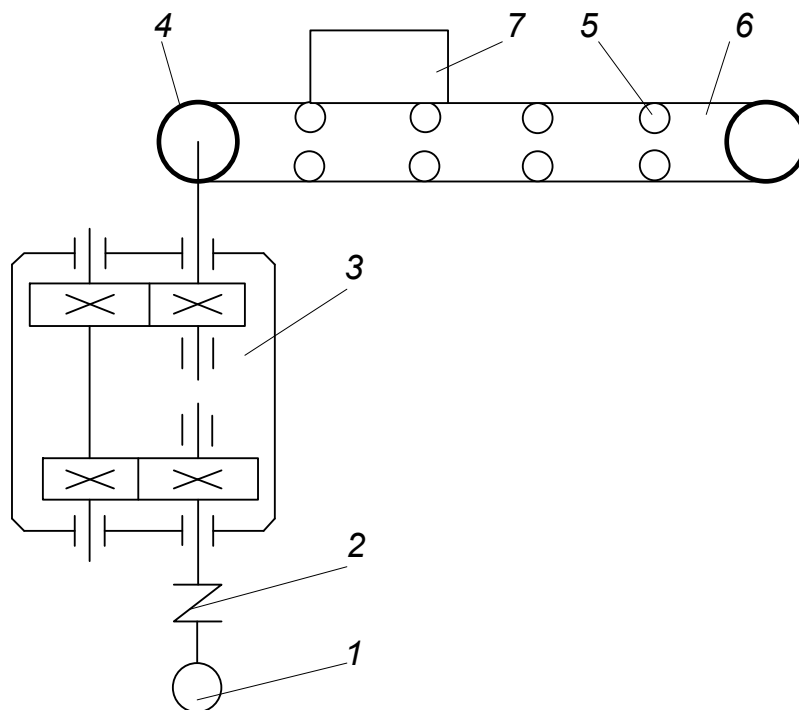
Технические данные конвейера:

- 1) рабочая скорость движения ленты –  $V$ ;
- 2) путь перемещения груза –  $S$ ;
- 3) время паузы –  $T_0$ ;
- 4) диаметр ведущей звездочки –  $D$ ;
- 5) коэффициент трения между лентой и направляющими опорными роликами –  $MU$ ;
- 6) сила тяжести поступательно движущихся частей конвейера без учета веса груза –  $G_{кон}$ ;
- 7) КПД редуктора и звездочки –  $KPD$ ;
- 8) отклонение от пункта остановки при наибольшем и наименьшем грузах не должно превышать –  $\pm M$ ;
- 9) момент инерции редуктора и звездочек, приведенный к валу двигателя, составляет 20 % от момента инерции электродвигателя;
- 10) передаточное число редуктора – оптимальное в смысле минимума времени переходных режимов и потерь в переходных режимах;
- 11) момент инерции муфты –  $5,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;
- 12) жесткость соединительной муфты –  $12,4e + 8 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- 13) жесткость 1 м ленты –  $C_л = 8,5e + 7 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;
- 14) диаметры валков приводной и натяжной станции одинаковы –  $D_6$ ;
- 15) ширина конвейера (валков) – 1,2 м;
- 16) длина конвейера –  $L$ .

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 5. Исходные данные для расчета приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Исходные данные к заданию 4

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_1$	кН	250	300	180	85	220	310	280	100	160	140
$G_2$	кН	100	180	100	30	90	140	120	45	70	50
$G_{кон}$	кН	150	200	150	50	100	150	150	50	100	50
$V$	м/с	0,5	0,4	0,7	0,65	0,45	0,55	0,75	0,48	0,52	0,71
$S$	м	5,2	8,4	3,2	4,7	8,6	9,2	6,4	3,2	6,4	8,4
$T_0$	с	60	45	54	40	32	26	18	54	32	68
$D$	м	1	0,8	1,1	0,6	0,7	0,9	0,8	1,2	1,5	1,3
$MU$	–	0,09	0,1	0,13	0,08	0,11	0,15	0,12	0,14	0,18	0,12
$KPD$	–	0,72	0,68	0,74	0,78	0,64	0,71	0,63	0,78	0,65	0,77
$M$	мм	15	15	10	12	13	12	20	18	17	14
$L$	м	8	10	7	6	10	12	8	5	8	10
$D_6$	м	0,8	0,8	0,4	0,6	0,5	0,6	0,8	0,4	0,4	0,5



1 – двигатель; 2 – соединительная муфта; 3 – редуктор; 4 – ведущая звездочка; 5 – направляющие ролики; 6 – лента; 7 – груз

Рисунок 5 – Кинематическая схема ЭП конвейера

### Задание 5. ЭП эскалатора метрополитена

Электропривод получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Пуск эскалатора на подъем и на спуск производится вхолостую и под нагрузкой. Мощность, необходимая для движения поручней, составляет 5 % от мощности эскалатора при номинальной нагрузке.

Установка должна предусматривать торможение рабочее и аварийное. На рисунке 6 показано изменение нагрузки на эскалаторе в течение суток. Время работы эскалатора в году  $T = 8000$  ч. Геометрическая трасса полотна приведена на рисунке 7.

Скорость движения лестничного полотна –  $V_d$ .

Сила тяжести 1 м лестницы –  $G_d$ .

Сила тяжести 1 м тяговой цепи –  $G_u$ .

Количество пассажиров на каждой паре ступеней – 3.

Сила тяжести одного пассажира –  $0,75 \cdot K_n$ .

Число ступеней, приходящихся на 1 м,  $N = 2,5$ .

Диаметр начальной окружности тяговой звездочки главного вала –  $D_3$ .

Ускорение полотна во всех режимах не должно превышать –  $A_{дон}$ .

Момент инерции тяговой звездочки главного вала и шестерен  $Z_1, Z_3, Z_5 - J_1$ .

Момент инерции муфты, тормозного шкива и шестерен  $Z_2, Z_4, Z_6 - J_2$ .

Жесткость муфты –  $6,3e + 8$  Н·м.

Жесткость лестничного полотна –  $2,5e + 4$  Н·м.

Скорость движения лестничного полотна при ремонтах и осмотрах эскалатора составляет 15 % от номинальной.

КПД передач при полной нагрузке –  $KPD$ .

Потери в механической части эскалатора при холостом ходе составляют половину потерь в ней при номинальной нагрузке.

Величина тормозного момента –  $M_{тм} = 1,5 \cdot M_{ном}$ .

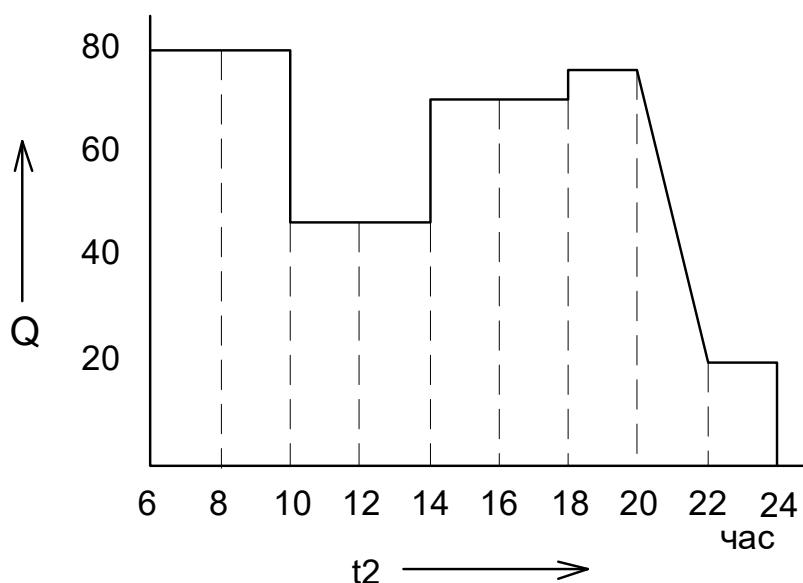


Рисунок 6 – Изменение нагрузки на эскалаторе в течение суток

Таблица 9 – Исходные данные к заданию 5

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A_{дон}$	м/с <sup>2</sup>	0,5	0,6	0,55	0,75	0,4	0,48	0,52	0,68	0,6	0,54
$V_{л}$	м/с	0,9	0,8	0,7	0,75	0,85	0,75	0,85	0,9	0,9	0,7
$G_{л}$	кН	1,3	1,4	1,32	1,42	1,36	1,4	1,38	1,46	1,35	1,45
$G_{ц}$	кН	0,34	0,36	4	0,38	0,32	0,4	0,36	0,38	0,42	0,39
$D_3$	М	2,3	1,7	1,9	1,9	2,4	1,82	2,22	1,64	2,1	1,72
$J_1$	кг·м <sup>2</sup>	270	250	240	250	270	240	270	260	260	280
$J_2$	кг·м <sup>2</sup>	80	85	95	80	90	95	80	90	95	85
$KPD$	%	70	72	74	68	80	76	68	70	76	78
$A$	м	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
$B$	м	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
$H$	м	50	40	45	55	55	40	45	55	50	45
$Z_1$	–	100	110	108	106	96	98	112	98	96	80
$Z_3$	–	100	110	108	106	96	98	112	98	96	80
$Z_5$	–	100	110	108	106	96	98	112	98	96	80
$Z_2$	–	25	23	30	18	20	22	28	18	22	26
$Z_4$	–	25	23	30	18	20	22	28	18	22	26
$Z_6$	–	25	23	30	18	20	22	28	18	22	26

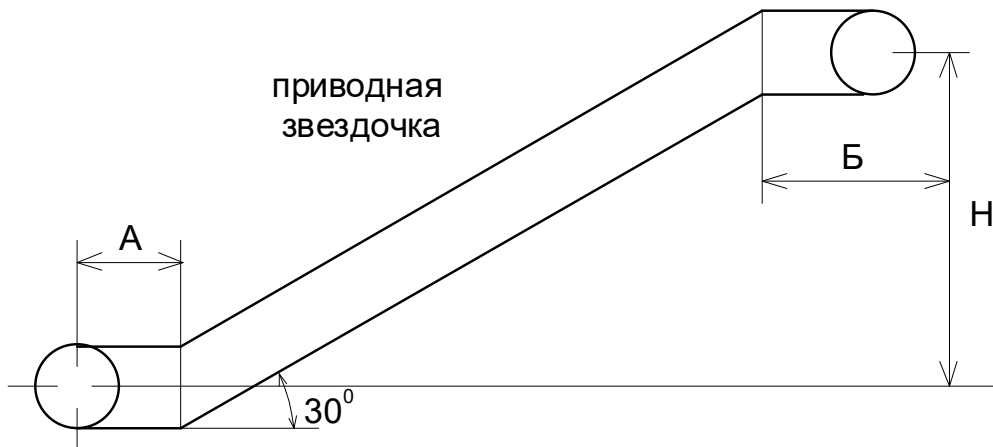


Рисунок 7 – Геометрическая трасса полотна эскалатора метрополитена

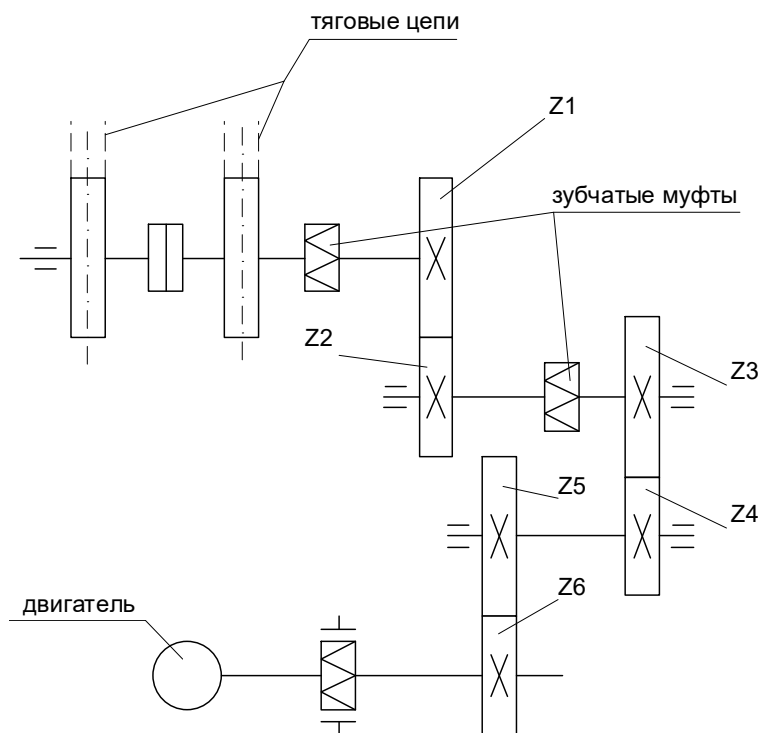


Рисунок 8 – Кинематическая схема ЭП эскалатора метрополитена

### Задание 6. ЭП центробежного насоса

Электропривод центробежного насоса получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Механическая характеристика центробежного насоса описывается уравнением

$$M = A \cdot M_{ном} + B \cdot M_{ном} \cdot (\omega/\omega_{ном})^2,$$

где  $A, B$  – коэффициенты;

$M_{ном}$  – номинальный момент на валу двигателя, Н·м;

$\omega_{ном}$  – номинальная частота вращения, рад/с.

Значения коэффициентов  $A, B$ , а также  $M_{ном}$ ,  $\omega_{ном}$  приведены в таблице 2.10.

$J_{нас}$  – момент инерции, приведенный к валу двигателя насоса, кг·м<sup>2</sup>.

$KPD$  – КПД насоса.

По техническому заданию необходимо предусмотреть аварийный останов. По технологическим требованиям насос в течение регулировочного периода длительностью  $T$  должен регулировать свою производительность следующим образом:

1) в течение первого периода длительностью  $T_1$  производительность составляет  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/с;

2) в течение второго  $T_2 - Q_2$ , м<sup>3</sup>/с;

3) в течение третьего  $T_3 - Q_3$ , м<sup>3</sup>/с;

4) в течение четвертого  $T_4 - Q_4$ , м<sup>3</sup>/с;

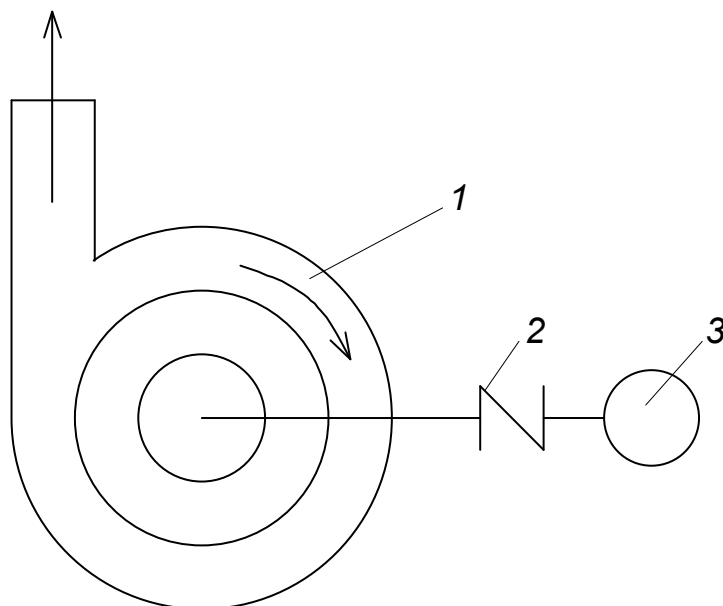
5) в течение пятого  $T_5 - Q_5$ , м<sup>3</sup>/с;

6) в течение шестого  $T_6 - Q_6$ , м<sup>3</sup>/с.

По техническим требованиям во время разгона, торможения и регулирования производительности момент динамический не должен превышать  $0,75 \cdot M_{ном}$ .

Центробежный насос связан с двигателем упругой муфтой, момент инерции которой  $J$ , а жесткость  $C$ .

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 9. Исходные данные для расчета приведены в таблице 10.



1 – насос; 2 – соединительная муфта; 3 – электродвигатель

Рисунок 9 – Кинематическая схема ЭП центробежного насоса

Таблица 10 – Исходные данные к заданию 2

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A$	–	0,05	0,15	0,2	0,1	0,3	0,08	0,07	0,04	0,09	0,1
$B$	–	0,9	0,75	0,8	0,85	0,7	0,78	0,84	0,76	0,82	0,9
$M_{ном}$	Н·м	1000	1800	950	1700	1100	800	1350	1400	1250	850
$\omega_{ном}$	рад/с	75	103	152	75	103	152	75	75	103	152
$T$	мин	80	60	75	70	65	70	80	85	46	55
$Q_1/QH$	м <sup>3</sup> /с	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$Q_2/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,25	0,4	0,3	0,5	0,2	0,4	0,3	0,25	0,4	0,35
$Q_3/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,8	0,8	0,5	0,25	0,6	0,7	0,8	0,5	0,2	0,8
$Q_4/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,35	0,2	0,8	0,9	0,8	0,1	0,1	0,8	0,6	0,25
$Q_5/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,6	0,4	0,9	0,3	0,6	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5
$Q_6/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,1	0,15	0,2	0,5	0,4	0,6	0,2	0,3	0,8	0,2
$T_1$	мин	10	13	15	11	4	9	10	22	7	10
$T_2$	мин	10	7	13	18	15	11	10	18	8	13



Окончание таблицы 10

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_3$	мин	15	10	8	9	12	13	20	13	9	8
$T_4$	мин	18	8	17	12	14	17	15	10	12	7
$T_5$	мин	17	12	12	5	8	2	13	17	6	12
$T_6$	мин	10	10	10	15	9	18	22	5	4	5
$J$	кг·м <sup>2</sup>	0,04	0,06	0,08	0,03	0,02	0,05	0,08	0,06	0,05	0,03
$C$	Н·м	7,3e6	11,5e6	13e6	0,8e6	7,5e6	12,5e6	130e6	40e6	3,7e6	28e6
$J_{нас}$	кг·м <sup>2</sup>	0,7	0,45	0,8	0,36	0,59	0,64	0,78	0,42	0,59	0,38
$KPD$	–	92	87	91	85	93	79	84	87	91	94

### Задание 7. ЭП высотного лифта

Электропривод лифта получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Грузоподъемность лифта –  $G_1$ .

Вес кабины –  $G_2$ .

Скорость перемещения кабины –  $V$ .

Максимальная скорость подъема –  $H$ .

Максимальное количество остановок –  $N$ .

Точность останова –  $\pm M$ .

При пуске, переходе на положительную скорость и торможении привода ускорение и рывок не должны превышать допустимых величин.

Приведенный момент инерции вращающихся частей кинематической схемы (кроме двигателей) составляет 25 % от  $J$  двигателя.

Жесткость 1 м каната –  $C = 2,5e + 6$  Н·м.

Коэффициент загрузки лифта –  $K_1$ .

КПД системы –  $KPD$ .

Число несущих канатов –  $K_2$ .

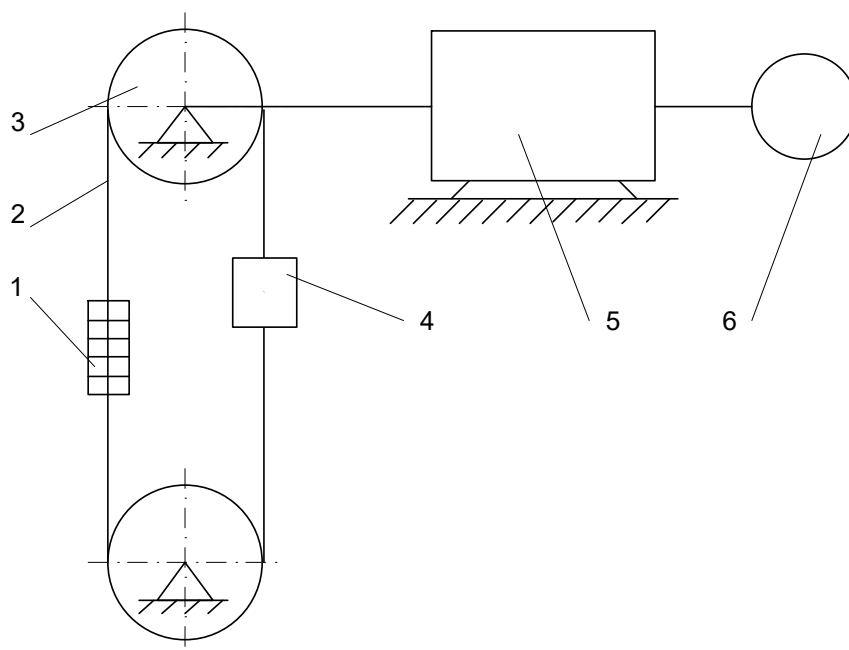
Вес погонного метра каната –  $G_3$ .

Передаточное число редуктора –  $I$ .

Радиус несущего канатного шкива –  $R$ .

Электропривод лифта должен обеспечивать нормальную работу и режим наладки при скорости 25 % от номинальной.

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 10. Исходные данные для расчета приведены в таблице 11.



1 – противовес; 2 – канаты; 3 – ведущий шкив; 4 – кабина; 5 – редуктор; 6 – двигатель; 7 – ведомый шкив

Рисунок 10 – Кинематическая схема ЭП высотного лифта

Таблица 11 – Исходные данные к заданию 7

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_1$	кН	10	15	7,5	15	10	18	21	15	25	21
$G_2$	кН	19	28	11,8	32,2	18	38	33,6	34	44,5	35
$G_3$	Н	18,4	20	14,8	23,5	16,3	25	28,5	23,5	28,5	28,5
$H$	м	45	60	70	80	70	80	90	70	100	135
$N$	–	12	16	20	22	20	22	25	20	30	40
$M$	мм	20	25	20	25	30	25	20	32	25	35
$K_1$	–	0,85	0,8	0,78	0,75	0,78	0,73	0,8	1	0,8	0,9
$K_2$	–	4	4	4	4	6	6	6	4	6	6
$KPD$	–	0,8	0,8	0,85	0,78	0,83	0,76	0,8	0,84	0,75	0,8
$V$	м/с	1,5	2	2,5	1	2	1	1,5	2	0,71	2
$I$	–	21,2	18,2	18,3	45,6	24,2	51,3	34,2	27,1	80,5	28,5
$R$	м	0,56	0,64	0,8	0,8	0,85	0,9	0,9	0,95	1	1

### Задание 8. Электропривод клетьевого шахтного подъемника

Электропривод клетьевого шахтного подъемника получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

В процессе разгона, перехода на пониженную скорость и торможения должно быть выдержано допустимое ускорение  $A_{дон}$ .

Электропривод клетьевого подъемника должен обеспечивать режим ревизии и наладки, т. е. обеспечивать работу на скорости  $V_2$ .

Клетевой шахтный подъемник предназначен для перемещения по уровню людей.

Скорость движения клетки –  $V_1$ .

Высота подъема (опускания) –  $H$ .

Вес пустой клетки –  $G_0$ .

Грузоподъемность клетки –  $G_1$ .

Коэффициент загрузки клетки –  $K$ .

Вес барабана –  $G_2$ .

Вес направляющих шкивов –  $G_3$ .

Вес 1 м троса –  $G$ .

Жесткость 1 м каната –  $2,3e + 8$  Н·м.

Момент инерции муфты –  $1,2$  кг·м<sup>2</sup>.

Момент инерции тормозного шкива –  $4,8$  кг·м<sup>2</sup>.

Жесткость муфты –  $2,7e + 9$  Н·м.

Диаметр барабана –  $D$ .

Диаметр направляющих шкивов –  $D_1$ .

Скорость вращения двигателя –  $\omega_{об}$ .

Число несущих канатов –  $K_1$ .

Расстояние между осью барабана и осями направляющих шкивов –  $L$ .

Момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, составляет 40 % от момента инерции двигателя.

Противовес уравнивает порожнюю клеть и 20 % груза.

Тормозной момент тормоза равен  $1,5 \cdot M_{ном}$  двигателя.

В процессе работы шахтного подъемника время работы чередуется с временем пауз. Время пауз составляет 40 % от времени работы.

Для обеспечения точного останова  $\pm M$  подъемник за 3 м до остановочного пункта переходит на пониженную скорость, рассчитываемую исходя из заданной точности останова, затем электрически тормозится и накладывается механический тормоз.

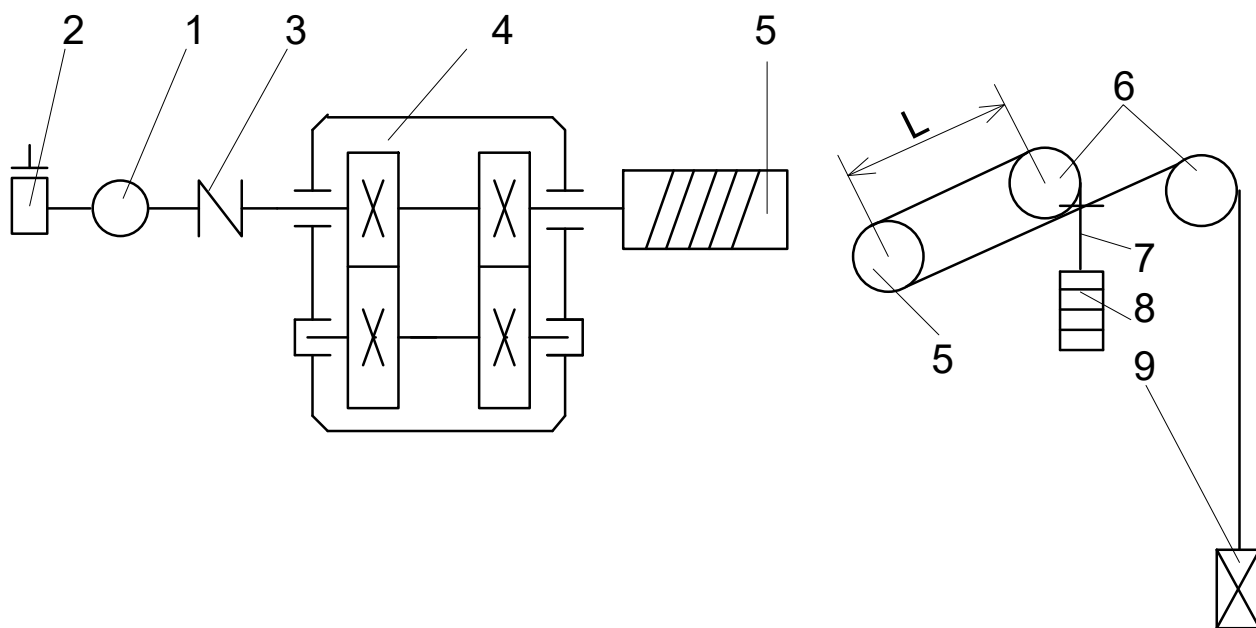
Кинематическая схема установки представлена на рисунке 11. Исходные данные для расчета приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Исходные данные к заданию 8

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_1$	м/с	0,8	1,2	1,4	1	0,9	1,5	1,3	1,7	0,75	0,6
$H$	м	80	48	120	60	43	57	69	70	24	18
$G_0$	кН	46	54	82	44	32	64	35	45,5	56,5	63
$G_1$	кН	10	19	15,6	12,8	14,9	26	28	19,5	17	16,5

Окончание таблицы 11

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K$	–	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,8	0,9	0,8	0,7	0,6
$G_2$	кН	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
$G_3$	кН	3,2	3,4	3,6	3,8	4,2	4,4	3,2	3,6	4,4	5
$G$	Н	20	24	25	30	22	24	32	26	35	30
$L$	м	5	5	5	5	6	6	6	6	5,5	5,5
$K_1$	–	4	2	4	2	6	6	2	4	3	4
$D$	м	1,4	1,8	1,7	2,2	2,1	1,6	1,2	1,4	1	1,2
$D_1$	м	0,8	0,75	0,75	0,9	1	0,85	0,9	0,7	0,6	0,8
$M$	мм	50	50	60	70	50	50	60	25	45	75
$A_{дон}$	м/с <sup>2</sup>	0,3	0,25	0,24	0,35	0,4	0,21	0,27	0,31	0,41	0,29
$V_2$	м/с	0,2	0,25	0,35	0,3	0,24	0,28	0,32	0,3	0,26	0,25
$\omega_{об}$	рад/с	150	150	150	100	100	180	100	100	100	150



1 – электродвигатель; 2 – тормозной шкив; 3 – муфта; 4 – редуктор; 5 – барабан; 6 – направляющие шкивы; 7 – канат; 8 – противовес; 9 – клеть

Рисунок 11 – Кинематическая схема ЭП клетьевого шахтного подъемника

### Задание 9. Электропривод механизма подъема грейферного крана

Электропривод механизма подъема грейферного крана получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В.

Цикл работы грейферного крана, следующий:

1) опускание грейфера весом  $G_0$  на высоту  $H$ ;

- 2) пауза;
- 3) подъем груза весом  $G$  на высоту  $H_m$ ;
- 4) опускание груза на высоту  $H_m$ ;
- 6) пауза;
- 7) подъем пустого грейфера на высоту  $H$ ;
- 8) пауза.

Время пауз одинаково и составляет  $K$  % от времени работы.

Технические данные ЭП механизма подъема грейферного крана:

- 1)  $V_1$  – скорость подъема и спуска груза;
- 2)  $V_2$  – скорость подъема и спуска грейфера;
- 3)  $I$  – передаточное число редуктора;
- 4)  $KPD_r$  – КПД редуктора номинальный;
- 5) КПД полиспаста равен 89 %;
- 6)  $D_6$  – диаметр барабана;
- 7) момент инерции муфты равен  $7,3 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ ;
- 8) жесткость муфты –  $13,7e + 7 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 9) число несущих канатов –  $N$ ;
- 10) жесткость 1 м каната –  $1,93e + 6 \text{ Н}\cdot\text{м}$ ;
- 11) ширина барабана – 1,1 м.

В процессе разгона и торможения ускорение не должно превышать значение  $A_{дон}$ .

Момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, составляет 35 % от момента инерции двигателя.

Передаточное отношение полиспаста равно 2.

Неучтенный момент инерции элементов кинематической цепи, движущихся вращательно, считать, как 10 % от суммарного момента инерции всех элементов кинематической цепи, приведенного к валу двигателя.

Для мягкой посадки груза электропривод переходит на пониженную скорость, составляющую 25 % от скорости опускания груза.

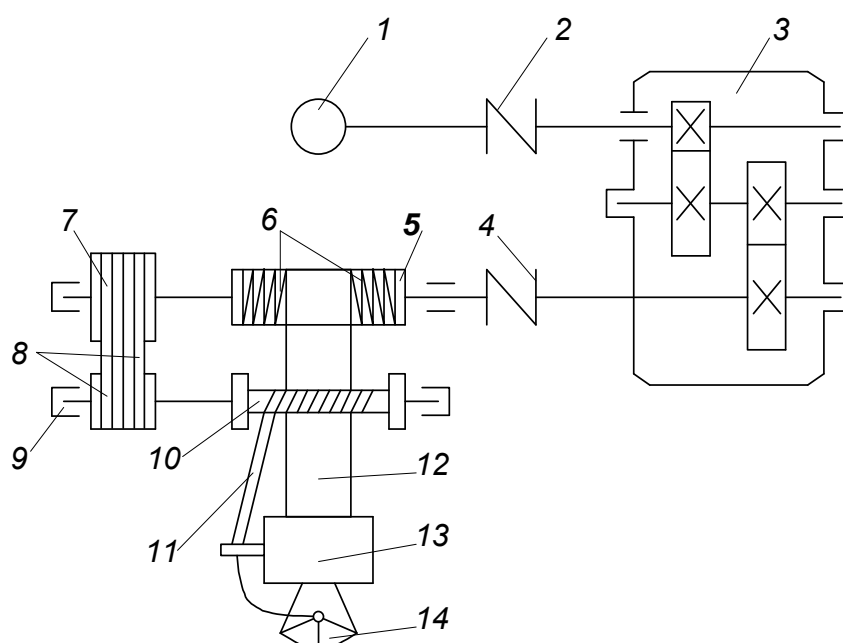
Кинематическая схема установки представлена на рисунке 12. Исходные данные для расчета представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Исходные данные к заданию 5

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_0$	кН	40	44	50	50	50	46	41	30	25	15
$G$	кН	150	140	110	120	130	140	150	140	11	90
$H$	м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$H_m$	м	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
$K$	–	60	55	50	60	40	45	50	35	70	75
$V_2$	м/с	0,3	0,31	0,32	0,31	0,3	0,33	0,35	0,35	0,35	0,33
$V_1$	м/с	0,24	0,21	0,2	0,23	0,22	0,21	0,24	0,2	0,2	0,22

## Окончание таблицы 13

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_0$	кН	40	44	50	50	50	46	41	30	25	15
$G$	кН	150	140	110	120	130	140	150	140	11	90
$H$	м	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
$H_m$	м	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
$K$	–	60	55	50	60	40	45	50	35	70	75
$V_2$	м/с	0,3	0,31	0,32	0,31	0,3	0,33	0,35	0,35	0,35	0,33
$V_1$	м/с	0,24	0,21	0,2	0,23	0,22	0,21	0,24	0,2	0,2	0,22



1 – электродвигатель; 2 – соединительная муфта; 3 – редуктор двухступенчатый; 4 – соединительная муфта; 5 – канатный барабан; 6 – канат; 7 – ведущий шкив; 8 – ремень; 9 – ведомый шкив; 10 – кабельный барабан; 11 – кабель; 12 – полиспаст; 13 – крюковая подвеска; 14 – грейфер

Рисунок 12 – Кинематическая схема ЭП механизма подъема грейферного крана

### Задание 10. Электропривод механизма передвижения мостового крана

Электропривод передвижения мостового крана получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В. Мостовой кран в процессе работы совершает передвижения, время работы чередуется с временем паузы.

$H$  – расстояние, на которое перемещается кран.

$V$  – номинальная скорость перемещения.

$A_{дон}$  – допустимое ускорение при разгоне и торможении.

$G_0$  – общий вес незагруженного крана.

$G$  – вес груза.

$MU_1$  – коэффициент трения в опорах ходовых колес.

$D_u$  – диаметр цапфы (подшипников) колес.

$MU_2$  – коэффициент, учитывающий трение реборд колес о рельсы.

$F$  – коэффициент трения качения.

$I$  – передаточное число редуктора.

$KPD$  – общий КПД передач.

$D_k$  – диаметр ходового колеса.

Ширина ходового колеса – 0,065 м (количество колес – 4).

Цикл работы механизма передвижения следующий:

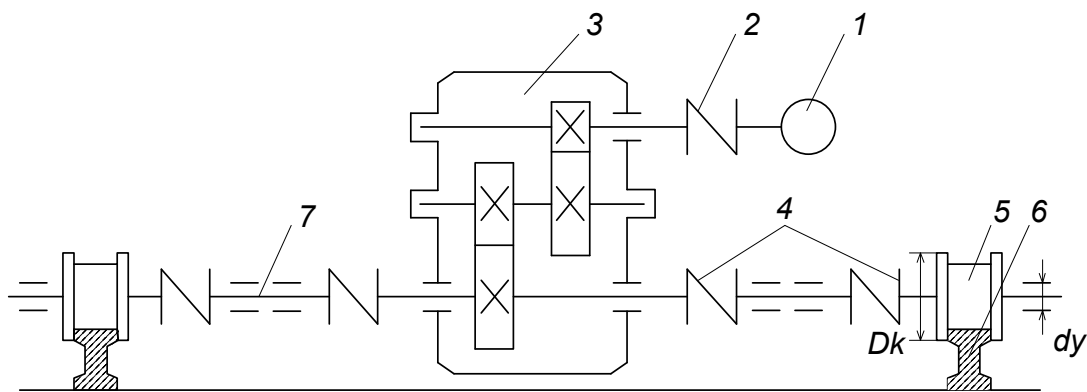
- 1) передвижение не загруженного крана на расстояние  $H$ ;
- 2) пауза;
- 3) передвижение загруженного крана на расстояние  $H$  в обратную сторону;
- 4) пауза.

Время паузы составляет  $K$  % от времени работы. Момент инерции муфты – 12,4 кг·м<sup>2</sup>. Жесткость муфты – 3,4е + 7 Н·м. Жесткость соединительного вала считать равной бесконечности. Момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, составляет 30 % от момента инерции двигателя.

Кинематическая схема установки представлена на рисунке 13. Исходные данные для расчета приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Исходные данные к заданию 10

Параметр	Размерность	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H$	м	75	60	54	62	80	46	24	32	27	63
$V$	м/с	1,2	1,6	1,4	1,32	1,08	1,08	1,2	1,3	1,5	1,6
$A_{дон}$	м/с <sup>2</sup>	0,13	0,19	0,18	0,2	0,15	0,2	0,24	0,26	1,25	0,15
$G_0$	кН	460	480	490	465	445	489	505	500	450	405
$G$	кН	50	60	75	90	48	54	73	62	90	84
$MU_1$	–	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
$D_u$	м	0,2	0,22	0,18	0,24	0,02	0,2	0,2	0,21	0,22	0,18
$MU_2$	–	1,4	1,5	1,55	1,66	1,71	1,68	2	1,97	1,91	1,81
$F$	м	0,7e-3	0,7e-3	0,7e-3	0,7e-3	0,75e-3	0,8e-3	0,81e-3	0,91e-3	0,9e-3	0,94e-3
$K$	–	33	65	70	60	40	34	45	50	50	55
$I$	–	18,3	18	18,1	25,1	24,3	18	25,1	24,1	25	18,2
$KPD$	–	83	81	82	84	87	88	86	85	84	80
$D_k$	м	0,6	0,8	0,7	0,66	0,54	0,54	0,6	0,65	0,75	0,8



1 – электродвигатель; 2 – соединительная муфта СМ; 3 – редуктор двухступенчатый цилиндрический Р; 4 – соединительные муфты СМ2, СМ3; 5 – колесо К; 6 – рельс; 7 – соединительный вал

Рисунок 13 – Кинематическая схема ЭП механизма передвижения мостового крана

## Список литературы

- 1 **Онищенко, Г. Б.** Электрический привод: учебник / Г. Б. Онищенко. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Академия, 2013. – 288 с.
- 2 **Шичков, Л. П.** Электрический привод: учебник и практикум для академического бакалавриата / Л. П. Шичков. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Юрайт, 2018. – 330 с.
- 3 **Фираго, Б. И.** Теория электропривода: учебное пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – 2-е изд. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
- 4 **Ключев, В. И.** Теория электропривода: учебник для вузов / В. И. Ключев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.
- 5 **Ильинский, Н. Ф.** Общий курс электропривода / Н. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. – Москва: Энергоатомиздат, 1992. – 543 с.
- 6 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 364 с.
- 7 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебное пособие / В. В. Москаленко. – Москва: Мастерство; Высшая школа, 2000. – 368 с.
- 8 **Фираго, Б. И.** Векторные системы управления электроприводами: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго, Д. С. Васильев. – Минск: Вышэйшая школа, 2016. – 158 с.: ил.
- 9 **Фираго, Б. И.** Расчеты по электроприводу производственных машин и механизмов: учебное пособие для вузов по специальности «Автоматизированные электроприводы» / Б. И. Фираго. – Минск: Техноперспектива, 2012. – 639 с.