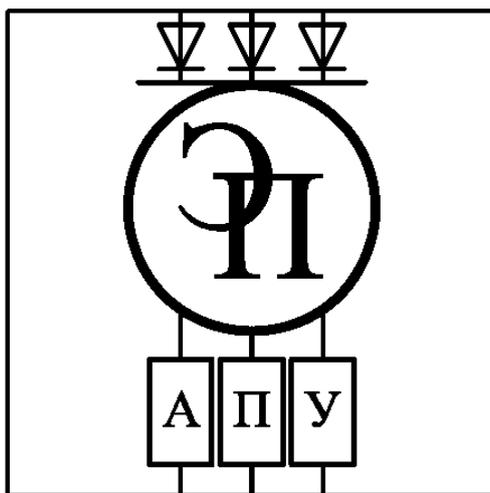


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации
к курсовому проектированию
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2022

УДК 62-83
ББК 31.291
Т33

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 предназначены к курсовому проектированию для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» очной и заочной форм обучения. Определена цель и содержание курсового проекта, приведены основные этапы проектирования электроприводов производственных механизмов и дана им краткая характеристика, а также задания на курсовое проектирование.

Учебно-методическое издание

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Ответственный за выпуск	С. М. Фурманов
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 99 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, 2022

Содержание

Введение.....	4
1 Содержание курсового проекта	5
2 Порядок проектирования и защиты курсового проекта	7
3 Этапы проектирования автоматизированного электропривода и их краткая характеристика	9
3.1 Постановка задачи на проектирование	9
3.2 Анализ и описание системы «электропривод – рабочая машина»	10
3.3 Анализ и описание системы «электропривод – сеть» и «электро- привод – оператор»	11
3.4 Выбор принципиальных решений.....	13
3.5 Расчет силового электропривода.....	17
3.6 Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода	19
3.7 Расчет переходных процессов в электроприводе за цикл работы.....	21
3.8 Проверка правильности расчета мощности и окончательный выбор двигателя.....	23
3.9 Разработка схемы электрической принципиальной.....	24
3.10 Заключение	24
4 Задания на курсовое проектирование	25
Список литературы	48

Введение

Целью дисциплины «Теория электропривода» является изучение студентами основных закономерностей электромеханического преобразования энергии, методов исследования механических свойств электроприводов (ЭП) и электродвигателей и расчета их характеристик в установившихся и переходных режимах, способов выбора электродвигателей для производственных машин и механизмов и оценки их энергетических показателей, принципов регулирования координат электропривода.

Целью курсового проектирования является углубление знаний и закрепление навыков по обоснованию выбора электропривода, отвечающего заданным требованиям, а также по выбору его основных элементов, расчёту механических и электромеханических характеристик, переходных процессов и энергетических показателей.

Студенты должны уметь производить выбор силовых элементов электропривода (двигателей, преобразователей и т. д.); разрабатывать структуры, наилучшим образом позволяющие реализовать комплекс технических требований; сопоставлять различные варианты электропривода, учитывая современные требования к электроприводу; уметь проводить анализ особенностей динамических характеристик электромеханических систем, как правило, с учётом упругих связей.

На выполнение курсового проекта отводится 60 ч, 1,5 зачетных ед.

По курсовому проектированию за последние десятилетия на кафедре написано достаточное количество методических указаний [3–9], изданных через редакционно-издательский отдел университета, которые не потеряли своей актуальности и на сегодняшний момент.

Целью данных методических рекомендаций является определить состав курсового проекта по дисциплине и дать краткую характеристику каждого из этапов проектирования.

Методические рекомендации содержат и задания на курсовое проектирование, составленные в 10 вариантах каждое.

1 Содержание курсового проекта

Курсовой проект состоит из пояснительной записки (объем 35–40 листов формата А4) и графической части (три листа формата А1).

Перечень подлежащих разработке в курсовом проекте вопросов включает следующее.

Содержание пояснительной записки.

- 1 Введение (постановка задачи по теме проекта).
 - 2 Анализ и описание системы «электропривод - рабочая машина».
 - 2.1 Количественная оценка вектора состояния или тахограммы требуемого процесса движения.
 - 2.2 Количественная оценка моментов и сил сопротивления.
 - 2.3 Составление расчетной схемы механической части электропривода.
 - 2.4 Построение нагрузочной диаграммы и механической характеристики рабочей машины.
 - 3 Анализ и описание системы «электропривод – сеть» и «электропривод – оператор».
 - 4 Выбор принципиальных решений.
 - 4.1 Построение механической части привода.
 - 4.2 Выбор типа привода (двигателя).
 - 4.3 Выбор способа регулирования координат.
 - 4.4 Оценка и сравнение выбранных вариантов.
 - 5 Расчет силового электропривода.
 - 5.1 Расчет исходных параметров и выбор двигателя.
 - 5.2 Расчет исходных параметров и выбор силовых преобразователей.
 - 6 Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода.
 - 7 Расчет переходных процессов в электроприводе за цикл работы.
 - 8 Проверка правильности расчета мощности и окончательный выбор двигателя.
 - 9 Разработка схемы электрической принципиальной.
 - 9.1 Разработка схемы силовых цепей, цепей управления и защиты.
 - 9.2 Выбор элементов схемы.
 - 10 Заключение.
- Перечень графического материала.*
- 1 Механическая характеристика рабочей машины. Оценочная диаграмма. Статические механические и электромеханические характеристики двигателя и привода (один лист формата А1, шифр Д1).
 - 2 Расчетная схема механической части привода. Нагрузочная диаграмма механизма. Графики переходных процессов за цикл работы (один лист формата А, шифр Д2).

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

Перечень этапов выполнения курсового проекта и количества баллов за каждый из них представлен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Этапы выполнения курсового проекта и рейтинговые баллы

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

2 Порядок проектирования и защиты курсового проекта

Успешное и качественное выполнение курсового проекта возможно только при соблюдении определённой 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.

В задании определяется срок сдачи студентом законченного курсового проекта, а также календарный график работы над проектом, т. е. сроки выполнения основных его разделов.

Курсовой проект выполняется путём самостоятельной работы студента с учебной и технической литературой и с использованием консультаций преподавателя – руководителя проекта.

Консультации проводятся по графику, утвержденному 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 (с обязательным представлением материалов по выполненным разделам проекта). Законченный проект не позднее 7 дней до защиты сдается на проверку руководителю проекта. Защита проекта производится перед комиссией, состоящей из преподавателей кафедры.

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 5...7 мин, основные положения доклада следует иллюстрировать схемами и графиками, представленными на чертежах графической части проекта.

При оценке курсового проекта комиссия принимает во внимание:

- обоснованность принятых в проекте технических решений;
- глубину проработки основных вопросов;
- качество оформления пояснительной записки и графической части проекта;
- умение сжато и технически грамотно доложить суть проекта и методику оригинальных решений в отведенное для доклада время;
- 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 и неоднозначно определенной задачей. Это скорее итеративный поиск или решение задачи многокритериальной оптимизации, предполагающей многошаговый повторяющийся процесс. Сложность обусловлена также тем, что нельзя наметить однозначный путь прямого решения задачи проектирования. Даже в самом простом случае неизбежны предварительные расчеты приводов с их последующей проверкой и уточнением. Поэтому глубокие теоретические знания необходимы, хотя и недостаточны, для эффективного проектирования электропривода. Нужен определенный опыт.

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.

Таким образом, 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) четкое 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.

Следует помнить, что чем четче и полнее сформулирована поставленная задача, тем меньше вероятность допустить ошибку и быстрее процесс нахождения оптимального варианта.

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 процесса 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 (зависимость 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.

Кроме того, именно 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 Анализ и описание системы «электропривод – сеть» и «электропривод – оператор»

Цель анализа системы «электропривод – сеть» – оценка влияния параметров питающей сети на работу электропривода.

В большинстве случаев источником питания силового электропривода является трехфазная сеть переменного напряжения, обладающая свойствами источника напряжения. Вместе с тем стандартами допускается изменение (колебание) напряжения и частоты. Это в значительной степени оказывает влияние, прежде всего на работу асинхронных двигателей (момент, развиваемый двигателем пропорционален квадрату напряжения), что должно быть учтено при расчете мощности двигателя.

Питание двигателей постоянного тока, даже если предусматривается параметрическое регулирование скорости, как правило, должно осуществляться от неуправляемых выпрямителей. Здесь важным вопросом является согласование выбора схемы выпрямления с требуемым значением выпрямленного напряжения (например, применение трансформаторных схем). Необходимо также иметь в виду то, что при использовании управляемых выпрямителей вопрос выбора схемы выпрямления и определение значений выпрямленного напряжения также является актуальным (недостаточный запас по напряжению может привести при большой скорости к переходу на работу со статическими характеристиками разомкнутой системы и низкими динамическими показателями; излишний запас по напряжению – к работе выпрямителя в зарегулированном режиме, что отрицательно скажется на энергетических показателях привода, а также потребует завышения мощности двигателя из-за пульсаций тока якоря).

Системы частотного регулирования машин переменного тока также требуют внимательного анализа параметров источника питания и их согласование с выходными параметрами, например, автономного инвертора напряжения (АИН). Особое внимание в данном случае следует обращать на фактическую реализацию принятого закона частотного управления. Это особенно актуально при работе, например, асинхронного двигателя, во второй зоне регулирования (при частотах, превышающих номинальные), т. к. в этом случае не всегда удастся поддерживать заданный поток, например, статора, что неизбежно приведет к перегреву электродвигателя. Кроме того, следует учитывать влияние регулируемого электропривода на нормированные параметры источника питания (например, коэффициент мощности).

В любом случае внимательный анализ системы «электропривод – сеть» является необходимым для правильного проектирования электропривода.

Анализ системы «электропривод – оператор» необходим для проектирования схемы управления электроприводом с той или иной степенью автоматизации; учета требований охраны труда и техники безопасности; соблюдения качества технологических процессов; повышения производительности рабочей машины средствами автоматизированного электропривода.

Не в меньшей степени этот анализ необходим и непосредственно при проектировании силового электропривода, а именно:

- 1) при выборе способа регулирования координат;
- 2) при выборе способов пуска и торможения привода;
- 3) при выборе рода тока и величины напряжения;
- 4) при определении конструкции механической части привода;
- 5) при выборе элементов (средств) защит и т. п.

Для принятия правильных решений по учету указанных требований, следует прежде всего изучить типовые решения по конструированию электроприводов заданного класса механизмов по специальной литературе.

3.4 Выбор принципиальных решений

3.4.1 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, и 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).

3.4.2 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 десять 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 релаксационным 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 коэффициент мощности сети.

При питании электродвигателя от контактной сети более чувствительным к падению напряжения является асинхронный электродвигатель, а менее чувстви-

тельным – 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 электроприводы 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:

- приводы электрошпинделей станков;
- групповые многодвигательные регулируемые ЭП;
- 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.

Производственные механизмы, работающие в тяжёлых динамических режимах, характеризуются в большей части частыми пусками, остановами, реверсами, причём, как правило, значительной статической нагрузкой на валу двигателя, если при этом требуется дополнительно регулирование скорости, то в таких механизмах, как правило, применяют асинхронные электроприводы с частотно-токовым и векторным частотным управлением.

3.4.3 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 расчета 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 расчету.

3.5 Расчет силового электропривода

3.5.1 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 режима 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 двигателя.

Безусловно, что 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.

При выборе двигателя по мощности на всех этапах проектирования следует особое внимание уделять требованиям энергосбережения. Можно наметить следующие пути энергосбережения, собственно, в электроприводе и в технологической сфере средствами электропривода.

Путь 1. Правильный выбор двигателя по мощности. Перегрузка и недогрузка электрических машин одинаково нежелательны: первая – снижает срок службы (приблизительно в 2 раза на каждые 10 °С перегрева изоляции выше допустимой); вторая – снижает КПД. Поэтому при окончательном выборе двигателя следует руководствоваться следующим правилом: если разница номинальной и расчётной мощностей больше, чем разница мощностей выбранного двигателя и ближайшего (по каталогу), имеющего меньшую мощность, следует повторить этапы проверки, если мощность оказалась меньше расчётной, следует перейти к двигателю с ближайшей большей мощностью и повторить расчеты.

Чаще всего на практике считается удовлетворительным результат, когда выбранный двигатель загружен не менее, чем на 70 % его номинальной мощности.

Путь 2. Повышение экономичности массового нерегулируемого электропривода – использование двигателей с улучшенными значениями коэффициента мощности и КПД. Здесь имеется в виду не только применение двигателей самых новых серий, но и правильный выбор их модификаций в зависимости от свойств рабочей машины, параметров нагрузки (например, использование АД с повышенным скольжением для уменьшения времени переходных процессов и потерь энергии в переходных процессах, в маховиковых приводах и нежелательное их использование при «спокойных» нагрузках, редких пусках и т. п.).

Путь 3. Специальные технические средства, обеспечивающие загрузку двигателя до номинальной при колебании нагрузки на валу (длительная работа с недогрузкой) – это, например, переключение АД с треугольника на звезду в приводе эскалатора; «расщепление» мощности – применение двух двигателей половинной мощности; специальные регуляторы и т. д.

Путь 4. Переход от нерегулируемого ЭП к регулируемому – это и экономия энергии в самом ЭП, и, что особенно важно, выбор наилучшего с точки зрения энергетики, технологического режима работы (оптимальные скорости резания, оптимальные графики движения и т. д.).

В заключении отметим, что строгое руководство данным алгоритмом расчета вовсе не предполагает однократный расчет, но, во-первых, позволяет малоопытному проектировщику избежать принципиальных ошибок, во-вторых, ускоряет, даже в случае многократных расчетов, выбор наиболее рационального электропривода.

В сущности расчет мощности двигателя по нагреву должен производиться путем определения наибольшей температуры перегрева его изоляции и сравнение ее с допустимой. Этот метод для практических расчетов либо затруднен (сложность построения кривой нагрева двигателя), либо вообще невозможен (предварительный выбор двигателя).

Поэтому на практике обычно применяют, считая его относительно точным, метод средних потерь. В этом методе в качестве мерила нагрева принимаются средние потери энергии или средняя мощность потерь за цикл работы.

Если постоянные потери двигателя не изменяются за цикл работы, сопротивления силового контура якоря, статора двигателя остаются неизменными за цикл работы.

Вместо метода средних потерь можно воспользоваться при оценке нагрева двигателя эквивалентным ему методом эквивалентного тока. Метод эквивалентного тока более грубый, чем метод средних потерь, поэтому применение его должно быть обосновано. Например, этим методом нельзя проверять по нагреву асинхронный короткозамкнутый двигатель с глубоким пазом или двойной бели-

чей клеткой, сопротивление ротора которого сильно меняется в пусковых и тормозных режимах (нужно использовать в этом и в других подобных случаях метод средних потерь).

Оба рассмотренных метода можно использовать для проверки двигателя по нагреву, но ими нельзя воспользоваться для предварительного выбора двигателя. В этом случае целесообразно использовать метод эквивалентного момента, который является производным от метода эквивалентного тока и дает удовлетворительные результаты в случае пропорциональности между током и моментом, причем коэффициент пропорциональности должен быть постоянным за весь цикл работы.

Впрочем, если на каком-то участке цикла этот коэффициент пропорциональности изменяется и это заранее известно, то можно это учесть, изменяя условно нагрузку на валу двигателя в ту или иную сторону.

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

Проверка двигателя по условиям пуска также осуществляется после его предварительного расчета и выбора по нагреву.

3.5.2 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 и 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, т. к. это влечёт удорожание его.

При выборе полупроводникового преобразователя электрической энергии студенты могут продемонстрировать свои знания, полученные при изучении дисциплины «Силовая преобразовательная техника».

3.6 Расчет статических механических и электромеханических характеристик двигателя и привода

Расчет 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 $\{\omega = f(I_a)\}$. 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: $M_s = M_e + \Delta M$, где ΔM – момент потерь вращения. В двигательном режиме работы момент электромагнитный M_s больше момента на валу M_e на величину ΔM , 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 $\{\omega = f(M_e)\}$. 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 $\{\omega = f(M_s)\}$, 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 ΔM 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. А 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 расчета естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик двигателей постоянного тока приведены в [1, 2, 5]. Большинство методов расчета требуют знаний, кроме каталожных данных двигателя, также его электрических параметров (активных и индуктивных сопротивлений 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 приближенные методы расчета, основанные лишь на данных, приведенных в каталогах (справочниках).

3.7 Расчет переходных процессов в электроприводе за цикл работы

Расчет и анализ переходных процессов является одним из важнейших этапов проектирования электропривода, т. к. 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 (или пренебрежимым) 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).

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, как правило, 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 ($n \geq 3$), а также нелинейных, последний метод представляется наиболее удобным.

3.8 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.

3.9 Разработка схемы электрической принципиальной

3.9.1 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. При разработке схемы силовых цепей необходимо учитывать положения, определенные при рассмотрении вопроса построения системы «электропривод – сеть», а при разработке схемы цепей управления – положения, определенные при рассмотрении вопроса построения системы «электропривод – оператор».

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

При выполнении этого раздела курсового проекта студенты могут показать свои знания, полученные при изучении дисциплины «Основы инженерного проектирования в специальности».

3.9.2 Выбор элементов схемы.

Все электротехнические элементы, представленные на схеме принципиальной студентом, должны быть рассчитаны и выбраны по техническим параметрам. Здесь студентам потребуются знания, полученные ими при изучении дисциплины «Электрические и электронные аппараты».

3.10 Заключение

Заключение – важный раздел курсового проекта. 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. Делает выводы.

4 Задания на курсовое проектирование

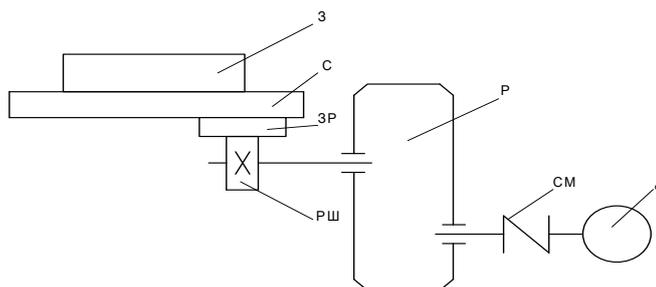
Задание 1. ЭП продольно-строгального станка

Продольно-строгальный станок (ПСС) относится к классу металлорежущих станков. Он служит 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. 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 $V_{пр}$, скорость вращения двигателя $W_{дв}$. Графики изменения усилий резания Fz в функции скорости прямого хода $V_{пр}$ и изменения КПД передач $КПД_{мех}$ в функции $V_{пр}$ представлены на рисунках 4.1 и 4.2.

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.1.



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

Рисунок 4.1 – Кинематическая схема ЭП продольно-строгального станка

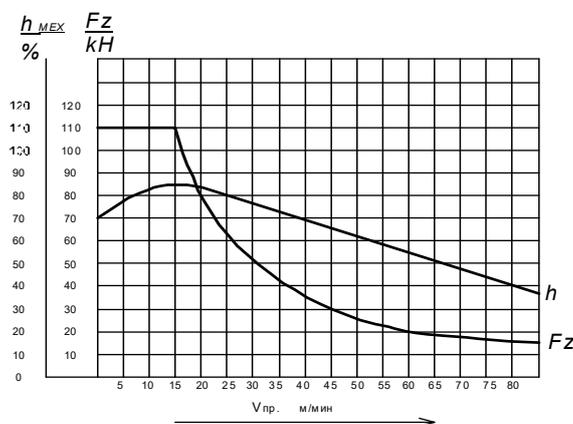


Рисунок 4.2 – Графики изменения усилий резания Fz в функции скорости прямого хода $V_{пр}$ и изменения КПД передач $КПД_{мех}$ в функции $V_{пр}$

Таблица 4.1 – Исходные данные к заданию 1

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_{np}	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
$W_{дв}$	рад/с	100	150	100	100	150	150	150	100	150	100
J	кг · м ²	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

Вертикальная составляющая усилия резания $F(y)$ составляет 30 % от $F(z)$ (то есть $F(y) = 0,3F(z)$).

Приняты следующие обозначения:

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 речной 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 $V_{вх} = V_{вых}$. Обычно $V_{вх} = 15$ м/мин.

С целью повышения производительности время разгона и торможения привода стола должны быть минимальными исходя из допустимого ускорения $A_{дон}$. Допустимое ускорение задается технологами исходя из качества обрабатываемого изделия: $A_{дон} = 5$ м/с².

Задание 2. ЭП центробежного насоса

Электропривод центробежного насоса получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.3).

Механическая характеристика центробежного насоса описывается уравнением

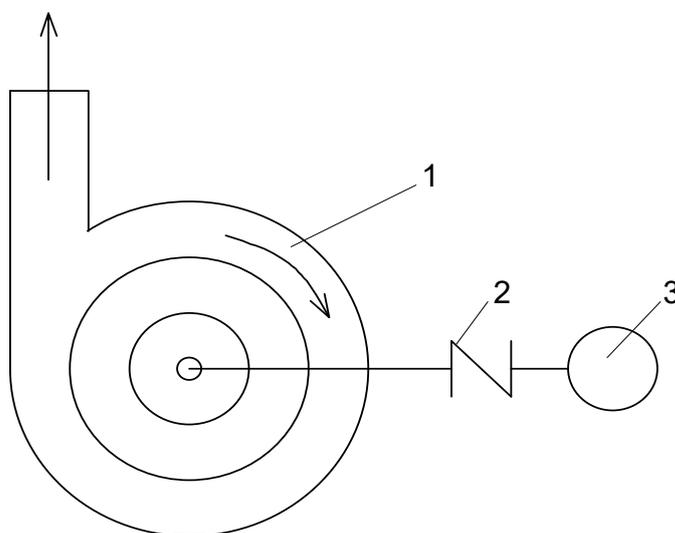
$$M = AM_{ном} + BM_{ном} (\omega/\omega_{ном})^2,$$

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 4.2.



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

Рисунок 4.3 – Кинематическая схема ЭП центробежного насоса

Таблица 4.2 – Исходные данные к заданию 2

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		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 ³ /с	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Q_2/QH	м ³ /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 ³ /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 ³ /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 ³ /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 ³ /с	0,1	0,15	0,2	0,5	0,4	0,6	0,2	0,3	0,8	0,2

Окончание таблицы 4.2

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
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
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 ²	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 ²	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

Приняты следующие обозначения:

$J_{нас}$ – момент инерции, приведенный к валу двигателя насоса, кг · м²;

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 , м³/с;

2) в течение T_2 – Q_2 , м³/с;

3) в течение T_3 – Q_3 , м³/с;

4) в течение T_4 – Q_4 , м³/с;

5) в течение T_5 – Q_5 , м³/с;

6) в течение T_6 – Q_6 , м³/с.

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

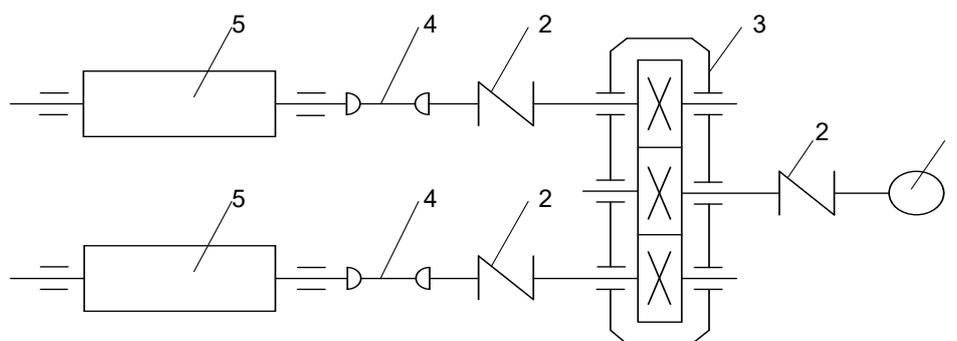
Центробежный насос связан с двигателем упругой муфтой, момент инерции которой J , а жесткость C .

Задание 3. ЭП прокатного стана горячей прокатки

Электропривод прокатного стана получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.4).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.3.

Прокатный стан производит прокатку брусков размером 60×80×25000 мм. В процессе работы стана время работы под нагрузкой чередуется со временем работы без нагрузки (на холостом ходу). Время работы без нагрузки составляет 80 % от времени работы под нагрузкой.



1 – электродвигатель; 2 – муфта упругая; 3 – редуктор; 4 – универсальные шпиндели; 5 – рабочие валки

Рисунок 4.4 – Кинематическая схема ЭП прокатного стана горячей прокатки

Таблица 4.3 – Исходные данные к заданию 3

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_{np}	м/с	1	1,2	1,4	1,6	2	0,8	2,2	1,4	1,6	1,1
M_n	кН · м	90	11	150	80	54	87	112	94	130	96
M_o	кН · м	6	13	9	10	13	8	14	12	18	10
R	м	0,2	0,24	0,36	0,18	0,14	0,31	0,26	0,24	0,31	0,28
$J_{ш}$	кг · м ²	1,15	1,31	1,48	1,56	2,14	2,18	2,66	3,14	3,29	3,56
J_m	кг · м ²	3,5	3,3	1,8	1,3	2,4	2,60	2,9	3,8	3,9	4
G	кН	1100	900	1150	1200	1300	1450	1600	1800	1300	1400
C	Н · м	80e7	30e7	35e7	0,6e7	6,3e7	10e7	4,4e7	4,3e6	32e7	3,1e6
I	–	5,5	6,1	6,1	6,1	5,23	4,13	3,59	3,57	3,57	3,59
KPD	%	86	87	91	78	82	81	91	87	79	84

Захват бруса рабочими валками происходит при скорости, равной 20 % от скорости прокатки. Разгон и торможение привода осуществляются на холостом ходу.

При разгоне и торможении привода $M_{дин}$ не должен превышать величину, равную $0,75M_c$, приведенного к валу двигателя. Момент инерции редуктора составляет 25 % от момента инерции двигателя.

Приняты следующие обозначения:

V_{np} – скорость прокатки;

R – радиус рабочих валков;

$J_{ш}$ – момент инерции шпинделя;

J_m – момент инерции муфты;

G – вес рабочего валка;

C – жесткость муфты;

I – передаточное число редуктора;

KPD – КПД механических передач;

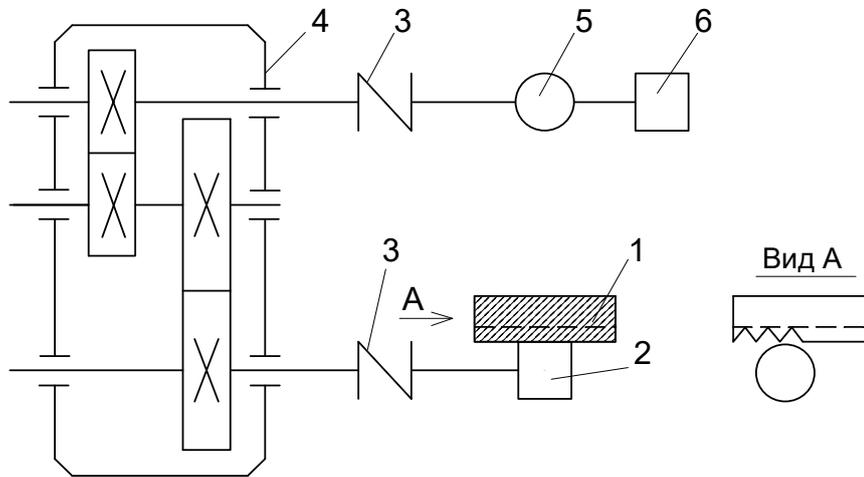
M_n – момент прокатки на оси каждого валка;

M_o – момент холостого хода, приведенный к валу двигателя.

Задание 4. ЭП толкателя заготовок

Электропривод толкателя заготовок получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.5).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.4.



1 – штанга; 2 – реечная шестерня; 3 – муфта; 4 – редуктор; 5 – электродвигатель; 6 – диск тормоза

Рисунок 4.5 – Кинематическая схема ЭП толкателя заготовок

Таблица 4.4 – Исходные данные к заданию 4

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H1$	м	0,5	0,35	0,4	0,45	0,55	0,55	0,35	0,3	0,4	0,35
$H2$	м	5,5	5	3,5	4	4,4	4,8	5,2	6	5,4	4,3
$H3$	м	0,3	0,25	0,3	0,25	0,35	0,35	0,3	0,25	0,25	0,35
R	м	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
$G1$	кН	20	16	18	17	19	15	20	31	19	16
$G2$	кН	100	94	95	94	80	85	96	84	100	87
$F1$	кН	0,64	0,58	0,84	0,87	0,76	0,68	0,72	0,6	0,84	0,8
$F2$	кН	25,4	24	22,4	23	26,2	24	26,5	26,8	28	22
$F3$	кН	1750	1500	1380	1290	1460	1680	1500	1700	1650	1420
N	шт.	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
I	–	31	27	36,2	32,6	29	30,1	28,6	31,4	25,6	28,4
KPD	%	84	80	85	87	82	87	88	84	89	81
V	м/с	0,52	0,48	0,42	0,6	0,38	0,54	0,42	0,48	0,54	0,49

Толкатель совершает возвратно-поступательные движения: ход вперед – подача заготовки в печь и ход назад – возвращение толкателя в исходное положение. При ходе вперед штанга толкателя разгоняется вхолостую. Пройдя путь $H1$, штанга встречает на подающем рольганге одну заготовку и начинает проталкивать ее по направлению к печи. Для увеличения производительности

скорость движения вперед повышается до 150 % от номинальной. При подходе заготовки к печи скорость снижается до номинальной.

Путь, проходимый во время переходного режима снижения скорости, должен быть рассчитан так, чтобы к моменту понижения скорости до номинальной заготовка подошла к порогу печи. Расстояние от точки соприкосновения толкателя с заготовкой до порога печи H_2 . Толкатель заталкивает одну заготовку в печь и этим приводит в движение все N заготовок, уже лежащие в печи. При этом крайняя заготовка выталкивается через порог печи и падает на приемный рольганг. При выталкивании заготовки из печи штангу толкателя нужно начать заблаговременно тормозить с таким расчетом, чтобы она остановилась, пройдя путь от порога печи, равный ширине одной заготовки. Пути, проходимые штангой толкателя, должны быть точно рассчитаны.

После остановки штанга разгоняется в обратном направлении до номинальной, а затем до скорости $1,5W_{ном}$. С такой скоростью штанга проходит обратный путь и затормаживается, дойдя до исходного положения.

Приняты следующие обозначения:

G_1 – вес одной заготовки;

H_3 – ширина заготовки;

G – вес штанги;

N – число заготовок, лежащих вплотную в печи;

R – радиус шестерни, входящей в зацепление с зубчатой рейкой штанги 1;

I – передаточное число редуктора;

KPD – КПД всей передачи;

V – номинальная скорость передвижения заготовки;

F_1 – усилие, необходимое для передвижения одной заготовки по рольгангу;

F_2 – усилие, необходимое при движении толкателя вхолостую;

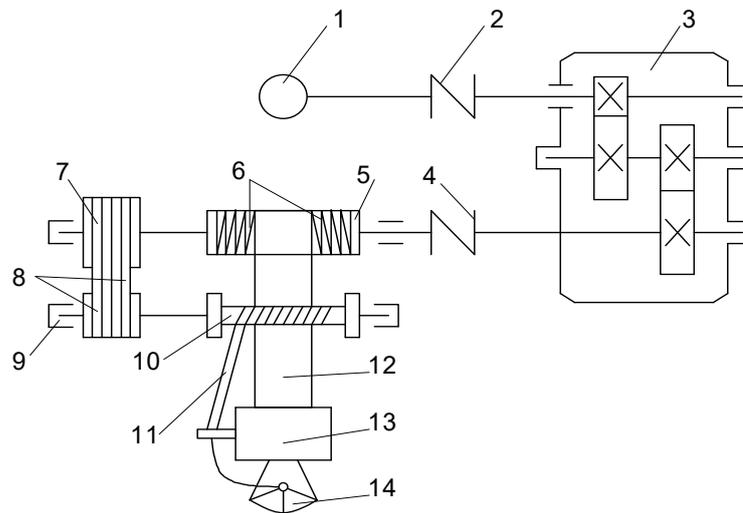
F_3 – усилие, необходимое при передвижении N заготовок, лежащих вплотную в печи.

Жесткость муфты – $6,3e + 08$ Н · м. Момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, считать равным 25 % от J двигателя. Момент инерции реечной шестерни – $0,69$ кг · м².

Задание 5. ЭП механизма подъема грейферного крана

Электропривод механизма подъема грейферного крана получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.6).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.5.



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 4.6 – Кинематическая схема ЭП механизма подъема грейферного крана

Таблица 4.5 – Исходные данные к заданию 5

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		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_1	м/с	0,24	0,21	0,2	0,23	0,22	0,21	0,24	0,2	0,2	0,22
V_2	м/с	0,3	0,31	0,32	0,31	0,3	0,33	0,5	0,35	0,35	0,33
V_3	м/с	0,06	0,05	0,05	0,05	0,5	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
$A_{доп}$	м/с ²	0,11	0,12	0,09	0,14	0,18	0,19	0,15	0,15	0,14	0,11
I_r	–	19,4	20,3	19,4	19,4	19,4	19,4	20,3	21,7	18,4	13,6
KPD_r	%	91	91	91	91	91	91	91	91	91	91
N	шт.	4	4	2	6	3	4	4	6	2	3
D_{δ}	м	0,5	0,4	0,6	0,65	0,45	0,7	0,8	0,35	0,5	0,65

Цикл работы грейферного крана, следующий:

- 1) опускание грейфера весом G_0 на высоту H ;
- 2) пауза;
- 3) подъем груза весом G на высоту H ;
- 4) опускание груза на высоту H_m ;
- 5) пауза;
- 6) подъем пустого грейфера на высоту H ;
- 7) пауза.

Время пауз одинаково и составляет K % от времени работы.

Приняты следующие обозначения:

V_1 – скорость подъема и спуска груза;

V_2 – скорость подъема и спуска грейфера;

I_r – передаточное число редуктора;

$KPDr$ – КПД редуктора (номинальный);

$D_б$ – диаметр барабана.

КПД полиспаста равен 89 %.

В процессе разгона и торможения ускорение не должно превышать значения $A_{доп}$.

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

Момент инерции муфты – $7,3 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Жесткость муфты – $13,7e + 7 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Число несущих канатов – N .

Жесткость 1 м каната – $1,93e + 6 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Ширина барабана – 1,1 м.

Передаточное отношение полиспаста – 2.

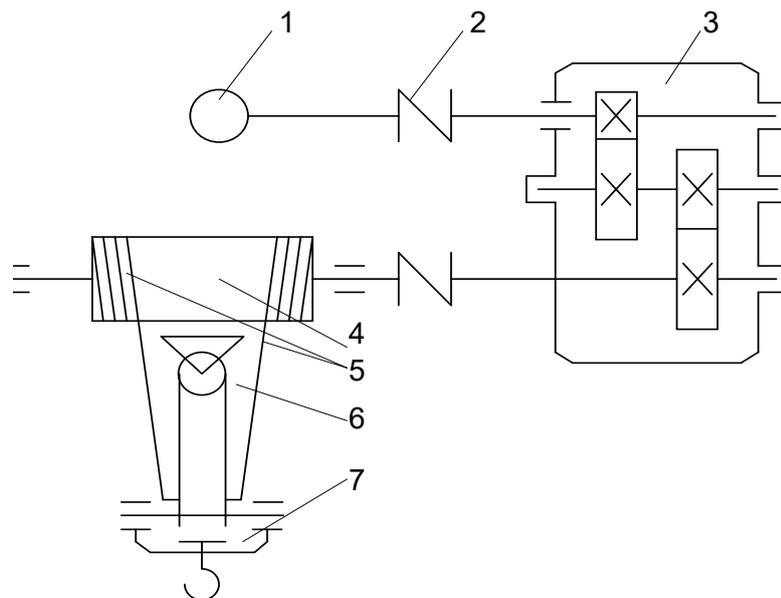
Неучтенный момент инерции элементов кинематической цепи, движущихся вращательно, считать как 10 % от суммарного момента инерции всех элементов кинематической цепи, приведенного к валу двигателя.

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

Задание 6. ЭП механизма подъема мостового крана

Электропривод механизма подъема мостового крана получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.7).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.6.



1 – электродвигатель; 2 – соединительная муфта; 3 – редуктор; 4 – барабан; 5 – канат; 6 – полиспаст; 7 – грузозахватывающее устройство

Рисунок 4.7 – ЭП передвижения мостового крана

Таблица 4.6 – Исходные данные к заданию 6

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H	м	14	12	11	10	8	14	10	13	11	16
H_m	м	4,8	5,6	6,2	6,2	7,4	6,2	5	5	5	5,5
V	м/с	0,3	0,28	0,21	0,17	0,24	0,2	0,2	0,27	0,19	0,26
K	%	75	75	80	80	75	75	85	85	80	80
I_p	–	25,1	27,6	29,6	21,2	24,5	27,1	20,3	22	36	25,5
I_n	–	4	4	4	4	2	2	4	4	2	4
KPD_p	%	92	93	96	98	91	93	97	96	94	96
KPD_n	%	0,87	0,87	0,88	0,86	0,87	0,89	0,86	0,85	0,84	0,82
D_{δ}	м	0,4	0,6	0,5	0,4	0,38	0,3	0,44	0,46	0,5	0,52
R_u	м	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
G_{δ}	кН	2,5	2,2	2,1	1,8	1,75	2,4	2,35	2,24	2,2	2,31
G_0	кН	30	33	29	25	24	20	33	38	38	20
G	кН	100	98	97	110	120	96	174	76	160	140
$A_{доп}$	м/с ²	0,11	0,18	0,13	0,15	0,17	0,14	0,12	0,16	0,16	0,12

Полный цикл работы механизма подъема мостового крана состоит из следующих операций:

- 1) спуск грузозахватывающего устройства весом G_0 на высоту H ;
- 2) подъем груза на высоту H_m ;
- 3) опускание груза на высоту H_m ;
- 4) подъем грузозахватывающего устройства на высоту H .

Приняты следующие обозначения:

G – грузоподъемность крана;

V – скорость подъема;

I_p – передаточное число редуктора;

I_n – передаточное число полиспаста;

KPD_p – КПД редуктора;

KPD_n – КПД полиспаста;

D_{δ} – диаметр барабана;

R_u – радиус инерции барабана;

G_{δ} – вес барабана.

Жесткость муфты – $8,1e + 7$ Н · м.

Момент инерции муфты – $0,45$ кг · м².

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

Скорость опускания груза составляет K % от скорости подъема.

Время работы чередуется с временем пауз, которое составляет 56 % от времени работы.

Неучтенный момент инерции составляет 8 % от суммарного момента инерции установки.

При разгоне и торможении ускорение не должно превышать допустимое значение $A_{доп}$.

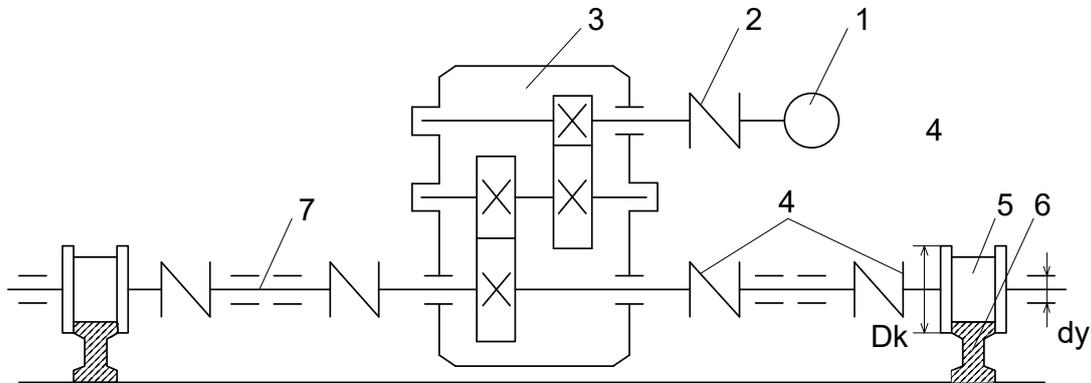
Жесткость 1 м каната – $1,65e + 6$ Н · м.

Весом каната можно пренебречь.

Задание 7. ЭП передвижения мостового крана

Электропривод передвижения мостового крана получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.8).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.7.



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 4.8 – Кинематическая схема ЭП передвижения мостового крана

Таблица 4.7 – Исходные данные к заданию 7

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		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 ²	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
$MU1$	–	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
$D_{ц}$	м	0,2	0,22	0,18	0,24	0,02	0,2	0,2	0,21	0,22	0,18
$MU2$	–	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

Мостовой кран в процессе работы совершает передвижения, время работы чередуется с временем паузы.

Приняты следующие обозначения:

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;

$MU1$ – коэффициент трения в опорах ходовых колес;

$D_{ц}$ – диаметр цапфы (подшипников) колес;

$MU2$ – 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 (количество колес – 4) – 0,065 м.

Цикл работы механизма передвижения следующий:

1) передвижение незагруженного крана на расстояние H ;

2) пауза;

3) передвижение загруженного крана на расстояние H в обратную сторону;

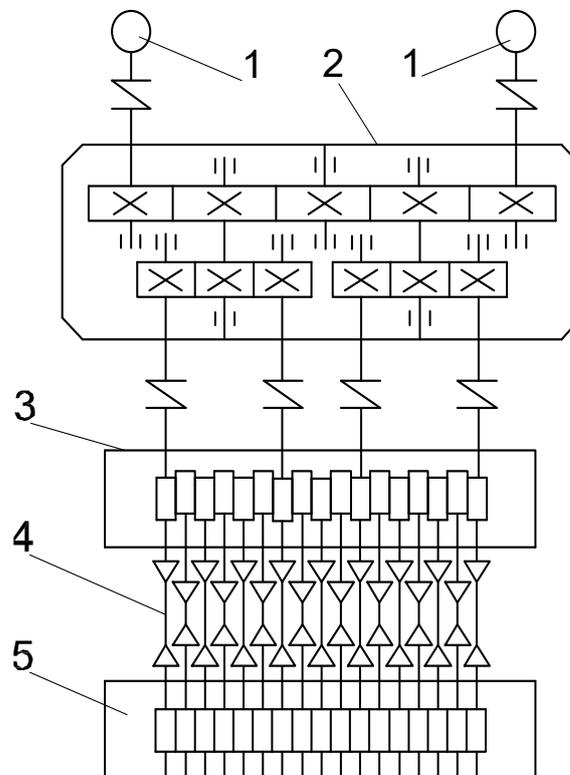
4) пауза.

Время паузы составляет K % от времени работы. Момент инерции муфты – $12,4 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Жесткость муфты – $3,4e + 7 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Жесткость соединительного вала считать равной бесконечности. Момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, составляет 30 % от момента инерции двигателя.

Задание 8. ЭП листоправильного стана

Электропривод листоправильного стана получает питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.9).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.8.



1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – шестеренная клеть; 4 – универсальные шпиндели; 5 – рабочая клеть

Рисунок 4.9 – Кинематическая схема ЭП листоправильного стана

Таблица 4.8 – Исходные данные к заданию 8

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	–	2,16	2,35	3,12	2,22	2	2,1	2,5	1,67	1,87	2,2
M_c	кН · м	6	5	4,8	5,2	6,2	5,8	5,2	4,6	6,1	6,8
M_0	кН · м	0,18	0,16	0,14	0,13	0,18	0,17	0,15	0,12	0,18	0,12
KPD_m	%	82	76	81	79	84	83	76	75	82	74
V_1	м/с	0,85	0,9	0,84	0,9	0,12	1,31	0,8	1,45	1,2	1
V_2	м/с	3	2,2	1,8	3	2,8	2,4	2,6	2,4	2,3	2,4
PB	%	70	75	68	66	80	75	90	80	64	75

По технологическим причинам привод листопрямильного стана должен обеспечивать правку листов при различных скоростях в заданном диапазоне (D). Режим работы правильной машины повторно-кратковременный. Кроме рабочего режима, электропривод должен обеспечивать режим наладки на холостом ходу при пониженной скорости, составляющей 10 % от номинальной рабочей скорости. Общий суммарный статический момент, отнесенный к рабочим валкам, при максимальной нагрузке составляет M_c . Момент холостого хода, приведенный к валу двигателя, составляет M_0 .

Приняты следующие обозначения:

V_1 – минимальная скорость правки;

V_2 – максимальная скорость правки.

Количество рабочих роликов – 17; опорных роликов – 15; шаг роликов – 100 мм; диаметр рабочих и опорных роликов – 90 мм; длина бочки рабочего и опорного роликов – 2800 мм.

КПД механизма считать неизменным и равным KPD_m .

PB – продолжительность включения механизма, %.

Момент инерции муфт между двигателем и редуктором $J_1 = 16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции муфт между редуктором и шестеренной клетью $J_2 = 40,2 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции одного шпинделя $J_3 = 0,003 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции редуктора, приведенный к валу двигателя, составляет 30 % от момента инерции двигателя.

Параметры листа следующие: ширина – от 750 до 1600 мм; толщина – от 0,75 до 30 мм; длина – от 2000 до 8000 мм.

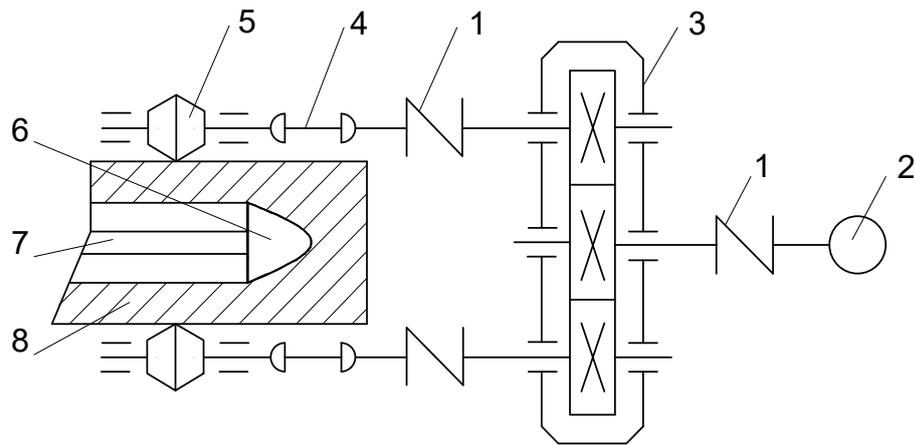
Статический момент правки листа зависит от его толщины. При правке более тонких листов статический момент меньше, а скорость правки выше. Эта зависимость близка к параболической.

Процесс правки листов происходит при постоянной мощности.

Задание 9. ЭП прошивного стана трубопрокатного агрегата

Электропривод прошивного стана получает питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.10).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.9.



1 – муфта; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – шпиндель; 5 – рабочий валок;
6 – оправка; 7 – стержень; 8 – заготовка

Рисунок 4.10 – Кинематическая схема ЭП прошивного стана трубопрокатного агрегата

Таблица 4.9 – Исходные данные к заданию 9

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
M_c	кН · м	14	12,1	9,4	15,5	16,4	9,8	13,4	9,6	16,6	16
M_0	кН · м	1,1	1,4	1,25	1,8	0,9	0,95	1,12	1,18	1,2	1,3
D	–	5	6	4	5	6	6	4	5	6	4
T	с	30	18	56	60	34	18	44	26	36	17
T_m	с	18	9	24	48	22	10	22	14	13	8
$W_{вн}$	рад/с	13	7	8,6	9,4	12,6	13	8,9	16	9,4	10
W_{max}	рад/с	30	21	18	31	33	35	24	18	15	30
I	–	3,65	4,21	5,18	3,12	4,53	2,98	4,13	4	3,78	3,25
D	мм	100	70	80	90	115	140	115	120	90	125
KPD	%	85	92	84	87	91	90	86	88	86	91

Рабочий цикл привода представляет собой чередование работы привода под нагрузкой и без нагрузки (на холостом ходу). Продолжительность цикла T , продолжительность прошивки T_m . Пуск двигателя и торможение осуществляется на холостом ходу. Статический момент холостого хода, приведенный к валу двигателя, равен M_0 .

По технологии необходимо регулировать скорость в диапазоне D . Статический момент M_c на оси валков должен быть обеспечен во всем диапазоне регулирования.

Приняты следующие обозначения:

$W_{вн}$ – номинальная скорость валков;

W_{max} – максимальная скорость валков;

I – передаточное число редуктора;

KPD – КПД передач (считать неизменным в процессе работы);

D – наружный диаметр изготовленных труб.

Диаметр валка по бочке – 700 мм; длина рабочей части валка – 500 мм; угол образующей конуса – $3^{\circ}30''$; длина заготовки – 2000 мм; угол наклона оси валка к оси прошивки – 15 град.

Момент инерции муфты – $16 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции шпинделя – $12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции прочих элементов кинематической схемы, приведенный к валу двигателя, составляет 20 % от момента инерции двигателя.

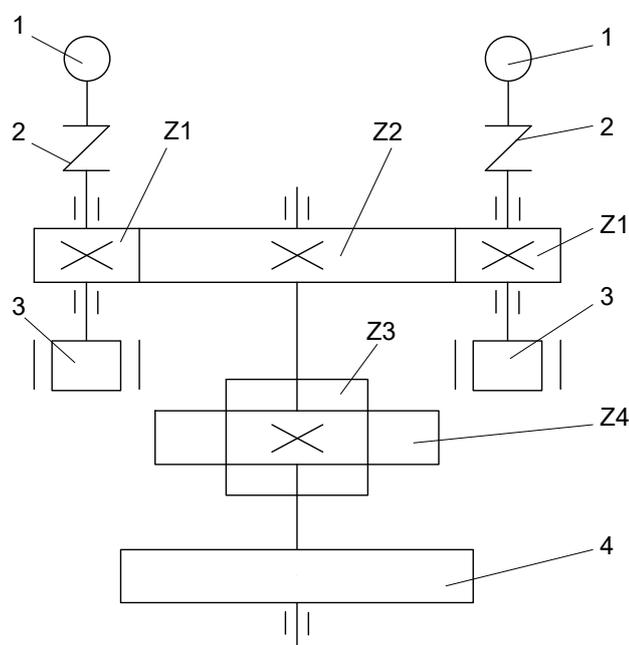
Жесткость муфты $C = 17,3e + 6 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Жесткость шпинделя $C = 13,4e + 8 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Задание 10. ЭП механизма передвижения слитковоза

Электропривод получает питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.11).

Исходные данные к заданию представлены в таблицах 4.10 и 4.11.



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

Рисунок 4.11 – Кинематическая схема ЭП механизма передвижения слитковоза

Таблица 4.10 – Исходные данные к заданию 10

Элемент кинематической схемы	Обозначение	$D_{нар}$, мм	$D_{вн}$, мм	H , мм	Количество зубьев
Шестерня	Z1	128	100	170	16
Колесо	Z2	992	150	170	124
Шестерня	Z3	448	100	200	28
Колесо	Z4	800	100	200	50
Ходовое колесо	4	1050	150	80	Два колеса

Таблица 4.11 – Исходные данные к заданию 10

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V1$	м/с	2,83	3,8	2,82	3,9	3,85	2,84	2,76	3,84	2,81	3,86
$T1$	с	50	50	40	50	45	45	50	50	40	40
$T2$	с	60	50	40	30	30	60	50	40	30	60
L	м	130	150	160	170	180	130	140	180	160	150
$G1$	кН	800	700	750	600	800	650	600	750	750	700
$G2$	кН	250	200	150	250	300	250	300	250	150	200
$MU1$	–	0,1	0,11	0,13	0,1	0,12	0,11	0,13	0,12	0,11	0,1
$MU2$	–	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
KPD	о. е.	0,87	0,9	0,92	0,88	0,87	0,9	0,83	0,86	0,81	0,76
$J1$	кг · м ²	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
$J2$	кг · м ²	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

После загрузки слитка в люльку слитковоз разгоняется до скорости $V1$ и направляется к приемному рольгангу. Для обеспечения требуемой точности останова $\pm M$ при подходе слитковоза к рольгангу скорость понижается до величины $V2$, 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 $T1$, обусловленную выгрузкой слитка, слитковоз разгоняется до скорости $1,4V1$ и с повышенной скоростью направляется за новым слитком.

При подходе к нагревательному колодцу производится переход на пониженную скорость $V2$, затем торможение и останов в точно назначенном месте путем наложения механического тормоза.

Спустя паузу $T2$ цикл повторяется.

Полная длина хода слитковоза в одну сторону – L .

Вес слитковоза – $G1$, вес слитка – $G2$.

Коэффициент трения качения ходового колеса о рельс – $MU1$.

Коэффициент трения скольжения в подшипниках ходовых колес – $MU2$.

Радиус цапфы оси катков $R_{ц} = 102,5$ мм.

Коэффициент, учитывающий трение реборды колеса о рельс, – K .

КПД редуктора – KPD .

Момент инерции муфты – $J1$.

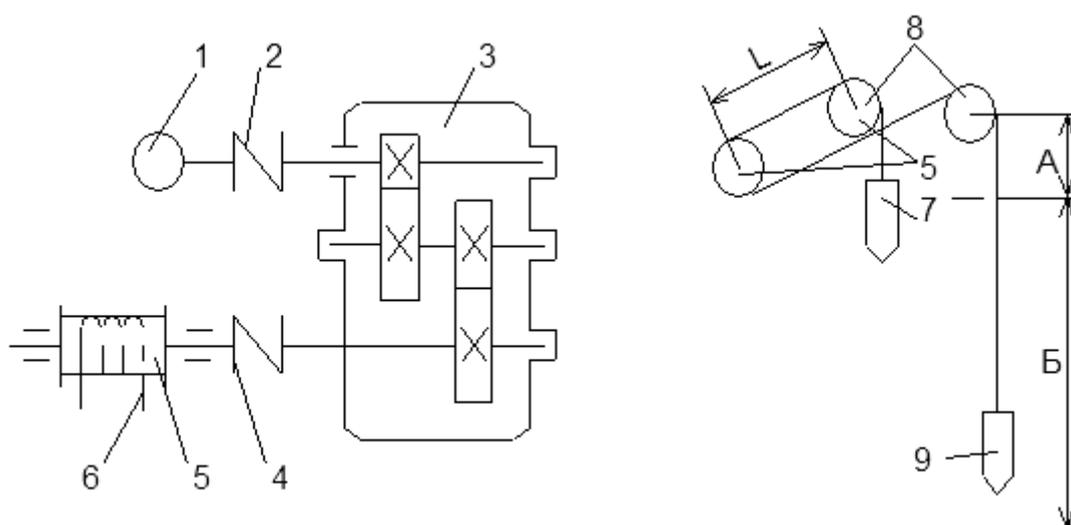
Жесткость муфты – $C = 7,6e + 9$ Н · м.

Момент инерции тормозного диска – $J2$.

Задание 11. ЭП скипового шахтного подъёмника

Электропривод получает питание от сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 10 кВ (рисунок 4.12).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.12.



1 – электродвигатель ЭД; 2 – соединительная муфта СМ1; 3 – цилиндрический двухступенчатый редуктор ЦР; 4 – соединительная муфта СМ1; 5 – барабан Б; 6 – канат К; 7 – порожний шип Сп; 8 – направляющие шкивы Ш; 9 – грузеный шип Сг; А – верхняя площадка; В – нижняя площадка

Рисунок 4.12 – ЭП скипового шахтного подъемника

Таблица 4.12 – Исходные данные к заданию 11

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		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
L	кг · м ²	20	32	44	18	36	22	28	32	24	26
C_1	кН	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	о. е.	0,9	0,82	0,78	0,92	0,86	0,78	0,84	0,78	0,94	0,9
KPD_m	о. е.	0,94	0,97	0,99	0,84	0,87	0,98	0,91	0,89	0,94	0,97
A_1	м/с ²	0,55	0,45	0,3	0,25	0,6	0,5	0,3	0,25	0,3	0,45
A_2	м/с ²	1	0,8	0,75	0,9	1	1,1	0,6	0,8	1	0,75
A_3	м/с ²	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
D_s	м	0,2	0,35	0,1	0,3	0,25	0,15	0,05	0,15	0,3	0,35

Скиповый шахтный подъемник имеет следующие данные:

- 1) грузоподъемность скипа – G_0 ;
- 2) вес порожнего скипа – G_1 ;
- 3) вес 1 м троса – G_m ;
- 4) диаметр барабана – D_1 ;
- 5) диаметр направляющих шкивов – D_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 .

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

Скиповый шахтный подъемник предназначен для подъема породы из шахты (то есть 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 ;

- 14) длина разгрузочного участка – H ;
- 15) время разгрузки и загрузки одинаково – T_1 ;
- 16) скорость скипа максимальная – V_1 ;
- 17) скорость выхода скипа на разгрузочную кривую – V_2 .

Установка должна предусматривать режим ревизии;

- 18) скорость при ревизии – V_3 ;
- 19) скорость после первой ступени разгона – 1,5 м/с.

Привод должен обеспечивать аварийный останов;

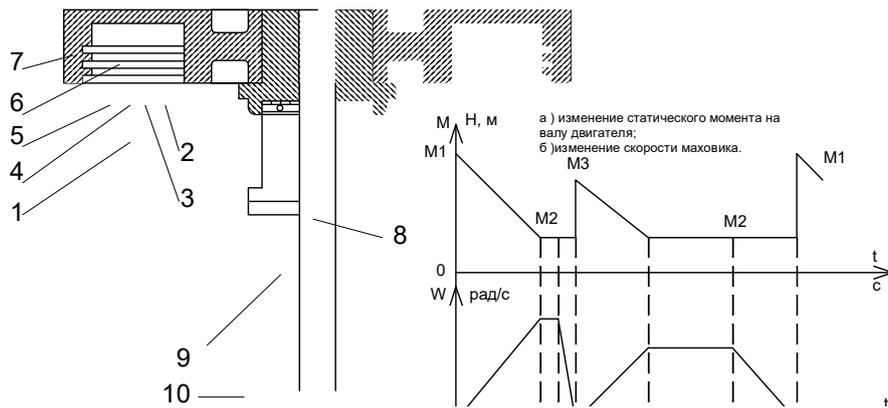
- 20) точность останова скипа – $\pm D_s$.

Задание 12. ЭП фрикционного бездискового пресса

Электропривод получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.13).

Исходные данные к заданию представлены в таблицах 4.13 и 4.14.

Средняя продолжительность включения пресса $ПВ$, сила давления пресса P , вес поступательно движущихся частей (ползуна, гайки) G , максимальный ход ползуна L , ход ползуна за один оборот маховика L_m , передаточное отношение от вала двигателя к шпинделю при холостом ходе I_o , при рабочем ходе I_p . Движение ползуна вниз происходит с увеличенной скоростью, вверх – замедленно.



1 – электродвигатель; 2 – зубчатое колесо рабочего хода; 3 – промежуточное зубчатое колесо; 4 – ведущее зубчатое колесо; 5 – зубчатое колесо холостого хода; 6 – фрикционный ролик; 7 – маховик; 8 – шпиндель; 9 – гайка трехходовая; 10 – ползун

Рисунок 4.13 – Кинематическая схема ЭП фрикционного бездискового пресса

Таблица 4.13 – Данные по элементам кинематической цепи

Наименование элемента	Обозначение на рисунке 4.14	Число зубьев	Диаметр, мм	Ширина, мм
Ведущее зубчатое колесо	4	30	120	35
Промежуточное зубчатое колесо	3	47	188	35
Зубчатое колесо рабочего хода	2	36	144	35
Зубчатое колесо холостого хода	5	55	220	35
Фрикционный ролик	6	–	215	100
Шпиндель	8	–	250	2200

Таблица 4.14 – Исходные данные к заданию 12

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M1$	Н · м	220	240	230	220	230	240	220	240	220	240
$M2$	Н · м	20	25	21	23	21	23	25	23	24	25
$M3$	Н · м	160	140	150	140	160	140	150	160	140	150
$T1$	с	2	1,9	1,4	1,2	1,6	1,3	1,6	1,4	1,8	2
$T2$	с	2,2	2,4	2,6	2,8	2,6	2,8	2,4	2	2,2	2,8
$T3$	с	2,4	2,6	2,8	3	2,8	3	2,6	2,2	2,4	3
$T4$	с	4	3,8	3,7	3,5	4	4	3,5	3,4	3,6	4,2
$T5$	с	5	5,1	4,8	4,5	4,4	4,7	4,9	5,1	5	4,9
$T6$	с	5,5	5,8	5,7	5,1	5,4	5,1	5,3	5,5	5,8	5,4
$W1$	рад/с	17,4	17	16,4	17,2	17,8	17,6	16,9	16,4	17	16,5
$W2$	рад/с	11	11,4	10,4	12,5	10,9	10,8	10,7	9,6	10,2	10,3
$ПВ$	%	23	25	25	20	28	27	26	25	23	20
P	Н	40	50	60	50	50	40	45	60	55	60
G	кН	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
L	м	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	0,5
L_m	м	0,16	0,17	0,16	0,17	0,16	0,16	0,16	0,17	0,16	0,16
I_o	–	8,24	8,24	8,45	8,24	8,49	8,37	8,9	6,17	6,24	8,17
I_p	–	12,4	12,8	13,3	13,4	14,4	14,4	14,4	8,33	13,9	14,8

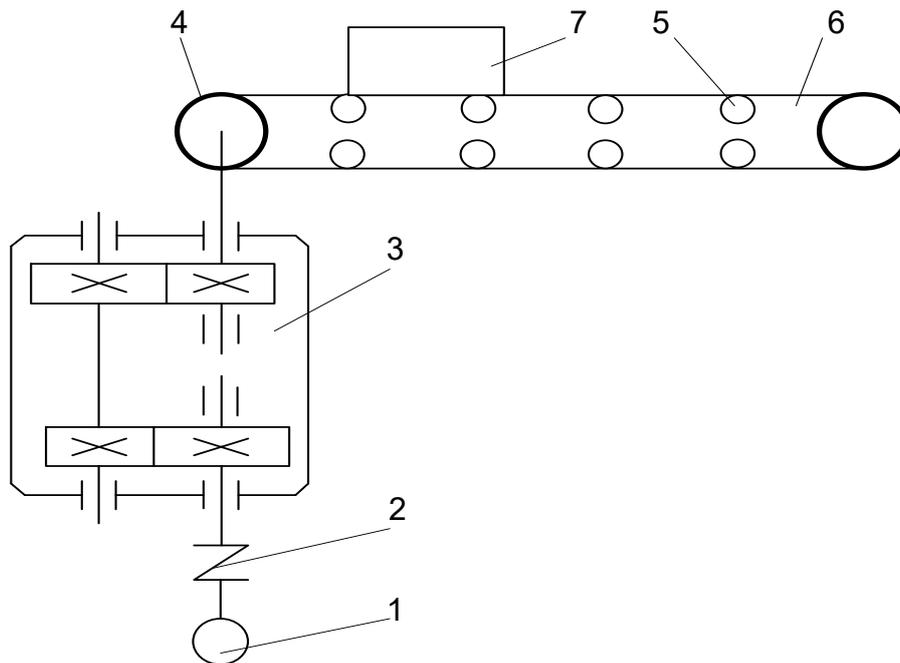
Рабочий цикл состоит из:

- 1) ($T_0 - T_1$) – разгон маховика до скорости (W_1);
- 2) ($T_1 - T_2$) – двигатель отключен от маховика и нагружен моментом холостого хода;
- 3) ($T_2 - T_3$) – брикетирование за счет энергии маховика. Отдав всю энергию маховик останавливается;
- 4) ($T_3 - T_4$) – разгон маховика в обратную сторону до скорости W_2 , ползун поднимается вверх;
- 5) ($T_4 - T_5$) – двигатель поддерживает скорость вращения маховика равной W_2 ;
- 6) ($T_5 - T_6$) – двигатель продолжает вращаться на холостом ходу, маховик затормаживается механическим тормозом и останавливается.

Задание 13. ЭП конвейера

Электропривод получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.14).

Исходные данные к заданию представлены в таблице 4.15.



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

Рисунок 4.14 – Кинематическая схема ЭП конвейера

Таблица 4.15 – Исходные данные к заданию 13

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		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	о. е.	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
$D_в$	м	0,8	0,8	0,4	0,6	0,5	0,6	0,8	0,4	0,4	0,5

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 останова 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 метра ленты – $C_l = 8,5e + 7 \text{ Н/м}$;
- 14) диаметры валков приводной и натяжной станции одинаковы – $D_в$;
- 15) ширина конвейера (валков) – $1,2 \text{ м}$;
- 16) длина конвейера – L .

Задание 14. ЭП эксцентрикового пресса

Электропривод пресса получает питание от трехфазной сети переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 380 В (рисунок 4.15).

Исходные данные к заданию представлены в таблицах 4.16 и 4.17.

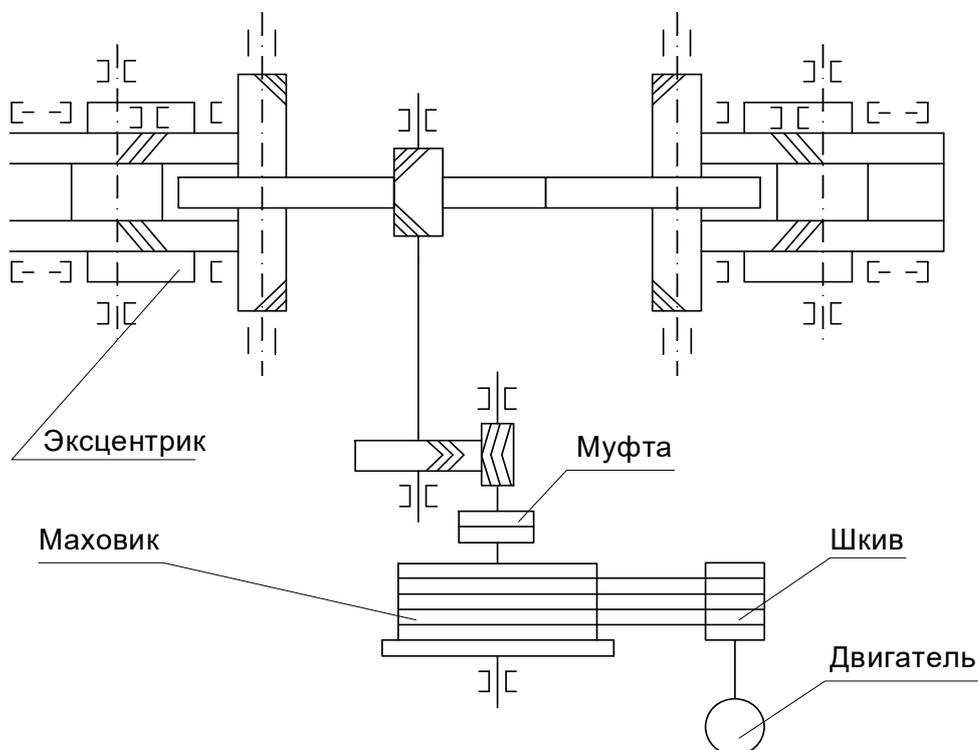


Рисунок 4.15 – Кинематическая схема ЭП эксцентрикового пресса

Таблица 4.16 – Исходные данные к заданию 14

Спуск 1							
α , град	0	15	20	40	60	80	100
M_c	195	0	-50	-210	-300	-325	-260
Спуск 2							
α , град	108	110	118	129	135	136,5	150
M_c	0	205	3210	3300	2906	2330	810
Подъем 1							
α , град	160	180	200	220	240	260	280
M_c	25	147	298	410	523	610	645
Подъем 2							
α , град	300	320	340	350			
M_c	531	411	312	223			

Таблица 4.17 – Исходные данные к заданию 14

Параметр	Единица измерения	Вариант									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I_p	–	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77
I_1	–	3,22	3,72	4,02	3,52	3,32	3,12	3,05	3,05	3,82	4,12
I_2	–	3,84	4,44	4,54	4,14	4	3,72	3,94	4,44	4,74	4,24
I_3	–	5,5	6	6,3	5,8	5,29	6,3	5,8	5,6	6,2	6,4
J_m	кг · м ²	1,5	1,9	2,1	1,6	2,1	2	1,7	2,1	2	1,8
$J_{ш}$	кг · м ²	0,12	0,11	0,14	0,1	0,13	0,12	0,11	0,11	0,13	0,12
PB_{cp}	%	50	40	60	70	40	60	50	70	40	70
N	ход/мин	5	5,4	5,5	6	6,1	5,15	5,25	4,8	6,8	4

Вал электродвигателя через клиноременную передачу соединяется с маховиком, сидящим на промежуточном валу. Соединение этого вала с редуктором осуществляется электропневматической муфтой.

Зависимость статического момента, приведенного к валу двигателя, в функции угла поворота эксцентрика приведена в таблице 4.16.

I_p, I_1, I_2, I_3 – передаточные числа.

Средняя продолжительность включения пресса – PB_{cp} .

Ползун совершает N ходов в минуту. Момент инерции отключаемой части, приведенный к валу двигателя J_m . Приведенные моменты инерции эксцентрика и ползуна незначительны и ими можно пренебречь. Момент инерции шкива $J_{ш}$. Статический момент во время отключения муфты составляет 25 % от среднего статического момента на валу двигателя. Пресс с редуктором во время пуска двигателя отключают муфтой.

Список литературы

- 1 **Москаленко, В. В.** Электрический привод: учебник / В. В. Москаленко. – Москва: ИНФРА-М, 2022. – 364 с.
- 2 **Онищенко, Г. Б.** Теория электропривода: учебник / Г. Б. Онищенко. – Москва: ИНФРА-М, 2018. – 384 с.: ил.
- 3 Теория электропривода: методические указания по курсовому проектированию и для проведения практических занятий для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»: в 5 ч. / Сост. М. П. Слука, Г. С. Ленецкий, Л. Г. Черная. – Могилев: МГТУ, 2003. – Ч. 1. – 48 с.
- 4 Теория электропривода: методические указания и задания по контрольным работам и курсовому проектированию для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заочной формы обучения: в 5 ч. / Сост. М. П. Слука, Л. Г. Черная, Д. С. Каплун. – Могилев: МГТУ, 2004. – Ч. 2. – 47 с.
- 5 Теория электрического привода: методические указания по курсовому проектированию и для проведения практических занятий для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»: в 5 ч. / Сост. М. П. Слука, Л. Г. Черная, М. С. Максимович. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 3. – 41 с.
- 6 Теория электрического привода: методические указания по курсовому проектированию и для проведения практических занятий для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»: в 5 ч. / Сост. М. П. Слука, Л. Г. Черная, М. С. Максимович. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 4. – 32 с.
- 7 Теория электрического привода: методические указания по курсовому проектированию и для проведения практических занятий для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»: в 5 ч. / Сост. М. П. Слука, Л. Г. Черная, М. С. Максимович. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 5. – 28 с.
- 8 Применение пакета MATLAB при моделировании ЭМС: методические указания к курсовому и дипломному проектированию по дисциплинам «Теория автоматического управления. Теория электропривода. Системы управления электроприводами. Силовая преобразовательная техника. Дипломное проектирование» для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» / Сост. Б. Б. Скарыно. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 36 с.