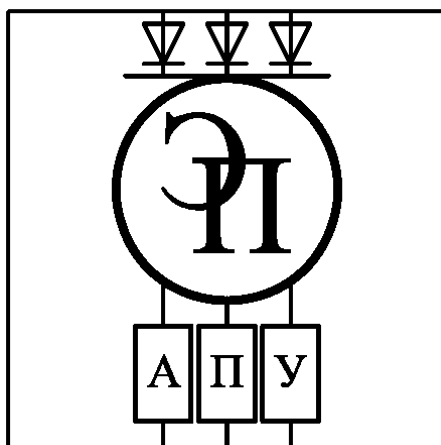


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»

# ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

*Методические рекомендации к курсовому проектированию  
для студентов специальности  
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов  
и производств» дневной и заочной форм обучения*



Могилев 2026

УДК 62-83  
ББК 31.291  
Т33

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» «22» декабря 2025 г., протокол № 5

Составитель ст. преподаватель А. С. Третьяков

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

Методические рекомендации к курсовому проектированию предназначены для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» дневной и заочной форм обучения. Определены цель и содержание курсового проекта, приведены основные этапы проектирования электроприводов производственных механизмов и дана их краткая характеристика.

Учебное издание

## ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

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

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

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования  
«Белорусско-Российский университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 07.03.2019.  
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский  
университет, 2026

## Содержание

Введение.....	4
1 Содержание курсового проекта .....	5
2 Порядок проектирования и защиты курсового проекта .....	6
3 Этапы проектирования автоматизированного электропривода и их краткая характеристика .....	7
4 Задания на курсовое проектирование .....	22
Список литературы .....	29

## Введение

Целью дисциплины «Теория электропривода» является изучение студентами основных закономерностей электромеханического преобразования энергии, методов исследования механических свойств электроприводов и электродвигателей и расчёта 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.

По курсовому проектированию за последнее десятилетие на кафедре написано достаточное количество методических рекомендаций [3–9], изданных через редакционно-издательский отдел университета, которые не потеряли своей актуальности и на сегодняшний день.

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

В разд. 4 представлены примеры заданий на курсовое проектирование. Полный состав вариантов заданий на курсовое проектирование представлен в а. 207/2.

## 1 Содержание курсового проекта

Курсовой проект состоит из пояснительной записки (объём 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 систем «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 включает следующее.

- 1 Механическая характеристика рабочей машины. Оценочная диаграмма. Статические механические и электромеханические характеристики двигателя и привода (один лист формата А1, шифр Д1).
- 2 Расчётная схема механической части привода. Нагрузочная диаграмма механизма. Графики переходных процессов за цикл работы (один лист формата А1, шифр Д2).
- 3 Кинематическая схема установки. Схема электрическая принципиальная привода (один лист формата А1, шифр Д3).

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 систем «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, утверждённому кафедрой. Посещение консультаций для студентов является обязательным, независимо от того, имеются ли у студента вопросы и неясности по выполнению проекта или нет. При этом студент на консультациях обязан отчитываться перед руководителем проекта о выполнении графика проектирования (с обязательным представлением материалов по выполненным разделам проекта). Законченный проект не позд-

нее 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 недоста-

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

Следует помнить, что чем чётче 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 систем «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 согласования 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 ра-

боте, 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 реостатным регулированием, а также систем электрического и электромеханического каскадов. Для производственных механизмов, работающих при длительной нагрузке и не требующих электрического регулирования скорости, используются электродвигатели переменного тока. Здесь наибольшее применение получили асинхронные короткозамкнутые двигатели различных модификаций и исполнений. Недостатками применения таких электродвигателей являются большие пусковые токи при прямом включении и относительно большие потери при большой частоте включения.

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором применяются лишь в относительно мощных маховиковых приводах, где асинхронный электродвигатель

при пуске будет иметь недопустимо большие потери, а при работе недостаточно большое скольжение, требующееся для уменьшения размеров маховика. Электродвигатели с фазным ротором предпочтительны также, по сравнению с короткозамкнутыми, тогда, когда при значительных массах пуск происходит при больших значениях нагрузки, а также когда требуется интенсивное динамическое торможение.

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

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

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

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

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

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

В зависимости от требований конкретного механизма набор решений может оказаться очень широким – от простейших дешевых и надежных массовых регулируемых приводов, например по системе «параметрический источник тока – двигатель», до прецизионных дорогих приводов с развитым микропроцессорным управлением. Кроме того, следует учитывать энергетический аспект выбора способа регулирования скорости: минимальный габарит двигателя и его полное использование по нагреву имеет место, когда способ регулирования скорости по показателю допустимой нагрузки соответствует зависимости нагрузки от скоро-

сти. 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).

Трёхфазные 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 расчёта экономической эффективности новой разработки.

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

Выбранный вариант привода подлежит последующему расчёту.

### ***3.5 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), и 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 расчёты.

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 заключение 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 сравнения 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 беличьей 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, ко-

торый является производным от метода эквивалентного тока и даёт удовлетворительные результаты в случае пропорциональности между током и моментом, причём 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 расчёта мощности по нагреву и выбора двигателя.

Проверка двигателя по условиям пуска также осуществляется после его предварительного расчёта 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**

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

Статическая электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость угловой скорости двигателя от тока в установившемся режиме работы  $\{\omega = f(I_{я})\}$ . 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  $M_{э}$  или на валу  $M_{в}$ ) в установившемся режиме работы. Моменты электромагнитный  $M_{э}$  и на валу  $M_{в}$  связаны соотношением  $M_{э} = M_{в} + \Delta M$ , где  $\Delta M$  – момент потерь вращения. В двигательном режиме работы момент электромагнитный  $M_{э}$

больше момента на валу  $M_g$  на величину  $\Delta M$ , а в тормозных режимах (рекуперативное торможение, торможение противовключением и динамическое торможение) меньше.

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

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

Нужно помнить, что регулирование, например, скорости – суть получения необходимого семейства искусственных механических характеристик. 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 расчёта естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик двигателей постоянного тока приведены в [1, 2, 5]. Большинство методов расчёта требуют знаний, кроме каталожных данных двигателя, также его электрических параметров (активных и индуктивных сопротив-

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

### ***3.7 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 отрабатывает 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, определённые при рассмотрении вопроса построения системы «электропривод – сеть», а при разработке схемы цепей управления – положения, определённые 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. Они служат для обработки металлов резанием. Обработка заготовки производится путем снятия стружки, в результате чего заготовка принимает форму, близкую к требуемой (черновая обработка) или совпадающую с ней (чистовая обработка).

В ПСС главным движением является передвижение стола, на котором крепится обрабатываемая заготовка. 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  $F(z)$  в функции скорости прямого хода  $V_{пр}$  и изменения КПД передач  $KПД_{мех}$  в функции  $V_{пр}$  представлены на рисунке 4.1.

Вертикальная составляющая усилия резания  $F(y)$  составляет 30 % от  $F(z)$  (т. е.  $F(y) = 0,3 \cdot F(z)$ ).

$M_u$  – коэффициент трения стола о направляющие;

$G_{ст}$  – вес стола, кН;

$V_{обр}$  – скорость обратного хода стола, м/с;

$L$  – длина хода стола, м;

$L_m$  – длина обрабатываемых заготовок, м;

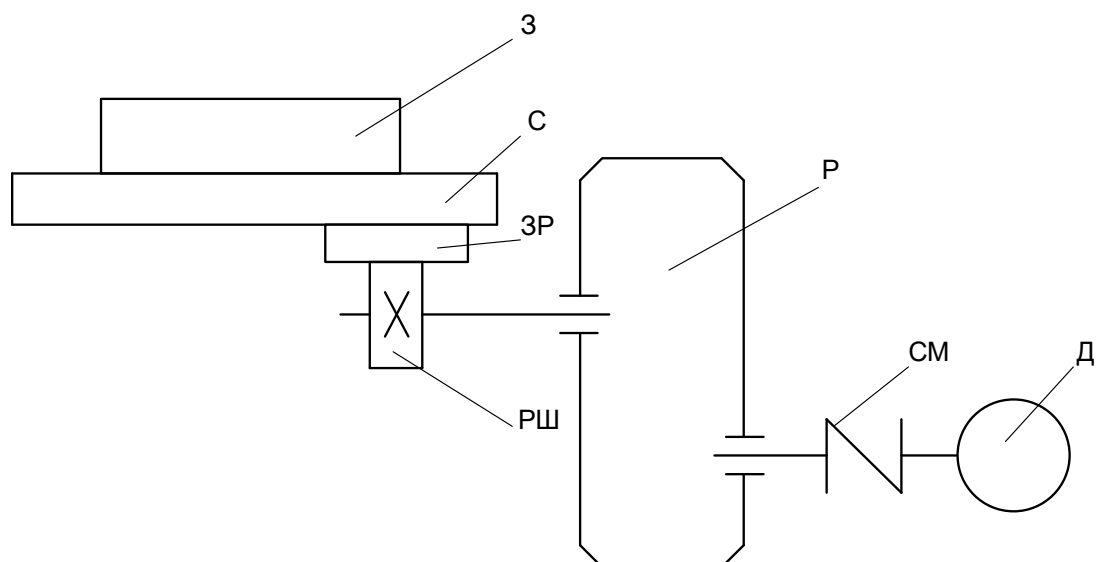
$D$  – диаметр делительной окружности, м;

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

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, кг · м<sup>2</sup>;

$C$  – жёсткость муфты, Н·м.



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

Исходные данные к заданию 1 приведены в таблице 4.1. На рисунке 4.2 представлены графики изменения усилий резания  $F(z)$  в функции скорости прямого хода  $V_{пр}$  и изменения КПД передач  $KПД_{мех}$  в функции  $V_{пр}$

Таблица 4.1 – Исходные данные к заданию 1

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

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.

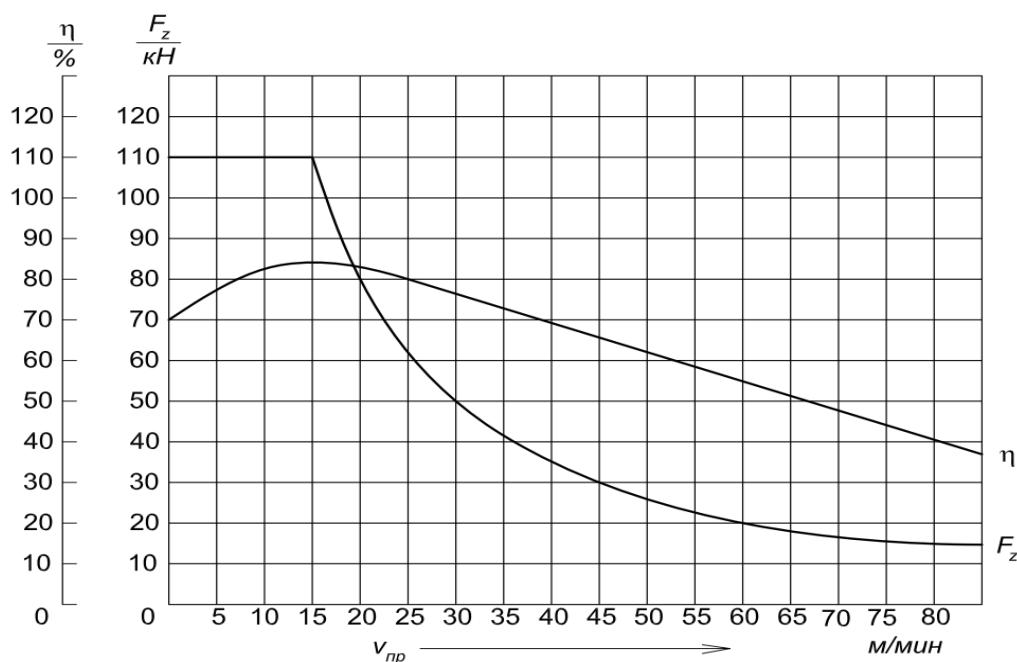


Рисунок 4.2 – Графики изменения усилий резания  $F(z)$  в функции скорости прямого хода  $V_{пр}$  и изменения КПД передач  $KПД_{мех}$  в функции  $V_{пр}$

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 должно быть минимальным исходя из допустимого ускорения. Допустимое ускорение задается технологами исходя из качества обрабатываемого изделия ( $A_{дон} = 5$  м/с<sup>2</sup>).

### 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

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

где  $A, B$  – коэффициенты;

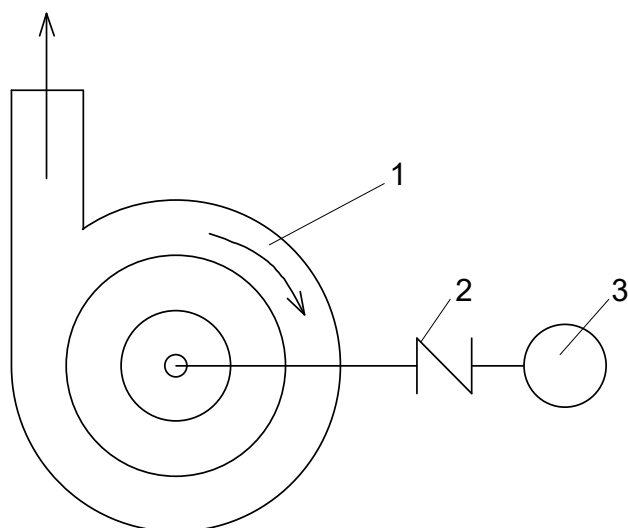
$M_{ном}$  – номинальный момент на валу двигателя, Н·м;

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

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

$KPD$  – КПД насоса.

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	Номер варианта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$A$	–	0,05	0,15	0,2	0,1	0,3	0,08	0,07	0,04	0,09	0,1
$B$	–	0,9	0,75	0,8	0,85	0,7	0,78	0,84	0,76	0,82	0,9
$M_{ном}$	Н·м	1000	1800	950	1700	1100	800	1350	1400	1250	850
$\omega_{ном}$	рад/с	75	103	152	75	103	152	75	75	103	152
$T$	мин	80	60	75	70	65	70	80	85	46	55
$Q_1/QH$	м <sup>3</sup> /с	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$Q_2/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,25	0,4	0,3	0,5	0,2	0,4	0,3	0,25	0,4	0,35
$Q_3/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,8	0,8	0,5	0,25	0,6	0,7	0,8	0,5	0,2	0,8
$Q_4/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,35	0,2	0,8	0,9	0,8	0,1	0,1	0,8	0,6	0,25
$Q_5/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,6	0,4	0,9	0,3	0,6	0,4	0,5	0,4	0,3	0,5
$Q_6/QH$	м <sup>3</sup> /с	0,1	0,15	0,2	0,5	0,4	0,6	0,2	0,3	0,8	0,2
$T_1$	мин	10	13	15	11	4	9	10	22	7	10
$T_2$	мин	10	7	13	18	15	11	10	18	8	13
$T_3$	мин	15	10	8	9	12	13	20	13	9	8
$T_4$	мин	18	8	17	12	14	17	15	10	12	7
$T_5$	мин	17	12	12	5	8	2	13	17	6	12
$T_6$	мин	10	10	10	15	9	18	22	5	4	5
$J$	кг·м <sup>2</sup>	0,04	0,06	0,08	0,03	0,02	0,05	0,08	0,06	0,05	0,03
$C$	Н·м	7,3e6	11,5e6	13e6	0,8e6	7,5e6	12,5e6	130e6	40e6	3,7e6	28e6
$J_{нас}$	кг·м <sup>2</sup>	0,7	0,45	0,8	0,36	0,59	0,64	0,78	0,42	0,59	0,38
$KPD$	%	92	87	91	85	93	79	84	87	91	94

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

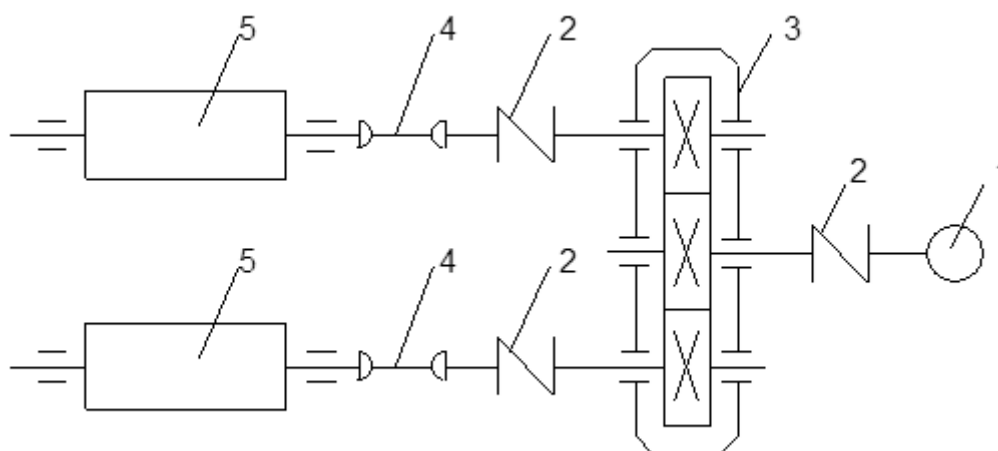
- 1) в течение первого периода длительностью  $T_1$  производительность составляет  $Q_1, \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- 2) в течение второго  $T_2 - Q_2, \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- 3) в течение третьего  $T_3 - Q_3, \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- 4) в течение четвертого  $T_4 - Q_4, \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- 5) в течение пятого  $T_5 - Q_5, \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- 6) в течение шестого  $T_6 - Q_6, \text{ м}^3/\text{с}$ .

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

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

### 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).



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

Рисунок 4.4 – Кинематическая схема ЭП прокатного стана горячей прокатки

Прокатный стан производит прокатку брусков следующих размеров ( $60 \times 80 \times 25000$ ) 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.

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

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

$V_{np}$  – скорость прокатки, м/с;

$R$  – радиус рабочих валков, м;

$J_{ш}$  – момент инерции шпинделя, кг·м<sup>2</sup>;

$J_m$  – момент инерции муфты, кг·м<sup>2</sup>;

$G$  – вес рабочего валка, кН;

$C$  – жесткость муфты, Н·м;

$I_p$  – передаточное число редуктора;

$KPD$  – КПД механических передач;

$M_n$  – момент прокатки на оси каждого валка, Н·м;

$M_0$  – момент холостого хода, приведенный к валу двигателя, Н·м (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Исходные данные к заданию 3

Параметр	Единица измерения	Номер варианта									
		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
$M_0$	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 <sup>2</sup>	1,15	1,31	1,48	1,56	2,14	2,18	2,66	3,14	3,29	3,56
$J_m$	кг·м <sup>2</sup>	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
$I_p$	–	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

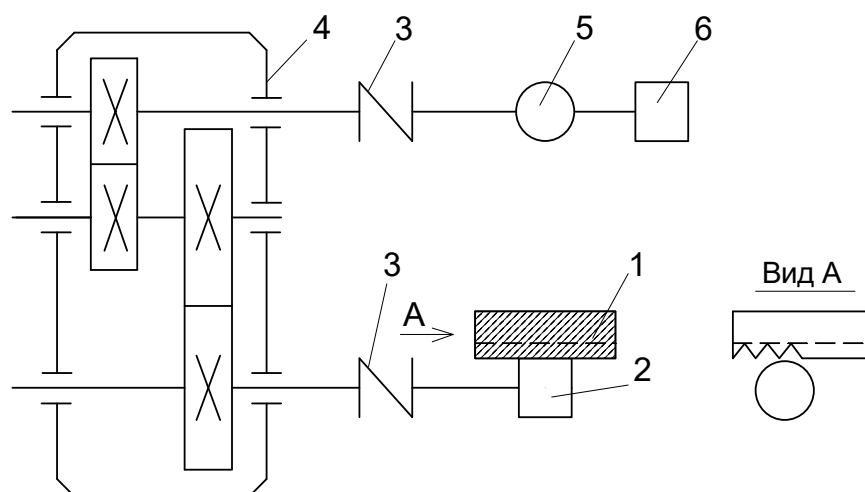
#### Задание 4. ЭП толкателя заготовок

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

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.



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

Рисунок 4.5 – Кинематическая схема ЭП толкателя заготовок

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

$G_1$  – вес одной заготовки, кН;

$H_3$  – ширина заготовки, м;

$G$  – вес штанги, кН;

$N$  – число заготовок, лежащих вплотную в печи, шт.;

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

$I$  – передаточное число редуктора;

$KPD$  – КПД всей передачи;

$V$  – номинальная скорость передвижения заготовки, м/с;

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

$F_2$  – усилие, необходимое при движении толкателя вхолостую, кН;

$F_3$  – усилие, необходимое при передвижении  $N$  заготовок, лежащих вплотную в печи, кН (таблица 4.4).

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·м<sup>2</sup>.

Таблица 4.4 – Исходные данные к заданию 4

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

### Список литературы

- 1 **Москаленко, В. В.** Электрический привод : учебник / В. В. Москаленко. – М. : ИНФРА-М, 2022. – 364 с.
- 2 **Онищенко, Г. Б.** Теория электропривода : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : ИНФРА-М, 2018. – 384 с.: ил.
- 3 Теория электропривода : метод. 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. – Могилев : МГТУ, 2003. – Ч. 1. – 48 с.
- 4 Теория электропривода : метод. указания и задания по контрольным работам и курсовому проектированию для студентов заочной формы обучения специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» : в 5 ч. / сост. М. П. Слука. – Могилев : МГТУ, 2004. – Ч. 2. – 47 с.
- 5 Теория электрического привода : метод. 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. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 3. – 41 с.
- 6 Теория электрического привода : метод. 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. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 4. – 32 с.
- 7 Теория электрического привода : метод. 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.

ка. – Могилев: Бел.-Рос. ун-т, 2006. – Ч. 5. – 28 с.

8 Применение пакета MATLAB при моделировании ЭМС : метод. 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 : Бел.-Рос. ун-т, 2008. – 36 с.

9 **Фираго, Б. И.** Расчёты по электроприводу производственных машин и механизмов : учеб. пособие для вузов / Б. И. Фираго. – Мн. : Техноперспектива, 2012. – 639 с.: ил.

10 **Онищенко, Г. Б.** Теория электропривода : учебник / Г. Б. Онищенко. – М. : ИНФРА-М, 2026. – 294 с.