

Высшее профессиональное образование

---

БАКАЛАВРИАТ

Г. А. ИВАНОВ

# РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА

*Учебное пособие*

*для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению подготовки  
«Технологические машины и оборудование»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2012

УДК 62-86(075.8)  
ББК 34.445я73  
И20

Рецензенты:

зав. кафедрой «Машиноведение и детали машин»  
Московского авиационного института, проф., д-р техн. наук *В. В. Фирсанов*;  
доц. кафедры «Детали машин» Московского государственного  
индустриального университета (МГИУ), канд. техн. наук *М. Б. Иваний*

**Иванов Г. А.**

И20 Расчет и конструирование механического привода : учеб.  
пособие для студ. учреждений высш. проф. образования /  
Г. А. Иванов. — М. : Издательский центр «Академия»,  
2012. — 384 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-5729-3

Учебное пособие создано в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование» (квалификация «бакалавр»).

Изложены основные положения и методика проектирования механических передач. Методика проектирования предложена в том порядке, в котором следует работать при выполнении курсового проекта. Приведены принципы кинематического расчета приводных устройств, методы расчета на прочность и основы конструирования деталей и узлов редукторов и коробок передач, помещены необходимые справочные материалы, а также рекомендации по выполнению и оформлению учебной конструкторской документации.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования. Может быть полезно аспирантам, преподавателям и всем желающим ознакомиться с методикой проектирования механических передач.

УДК 62-86(075.8)  
ББК 34.445я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым  
способом без согласия правообладателя запрещается*

© Иванов Г. А., 2012  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2012  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2012

ISBN 978-5-7695-5729-3

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие предназначено для студентов, выполняющих курсовой проект по дисциплине «Детали машин и основы конструирования». Трудоемкость курсового проекта определяется Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования. Содержание и объем пособия соответствуют рабочей программе по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование».

В учебном пособии приведены основные принципы расчета и конструирования отдельных узлов и деталей редукторов и коробок передач. Методика проектирования изложена в том порядке, в котором следует работать при выполнении курсового проекта. Все сведения, необходимые для очередного этапа расчетов и конструирования, расположены в одном месте.

Настоящее учебное пособие предназначено для проектирования приводов общего назначения с механическими передачами, обеспечивающими вращательное движение рабочих органов.

При написании учебного пособия не ставилась цель дать всеобъемлющий охват по разработке чертежей механизмов, так как предполагалось, что для этого студенты будут пользоваться атласами конструкций деталей машин. Сведения из стандартов также приведены в сокращенном объеме.

Учебное пособие соответствует программе по курсу «Детали машин и основы конструирования» и рассчитано на студентов дневной и вечерней форм обучения. Оно может быть использовано на практических занятиях.

Автор выражает благодарность доценту В. Ф. Константинову за помощь в написании гл. 1 и подразд. 8.8.

Автор с благодарностью примет замечания и конструктивную критику по данной работе.

### **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ**

---

Целью курсового проекта по дисциплине «Детали машин и основы конструирования» является закрепление знаний студентов по теории, расчету и конструированию деталей машин, полученных ими при изучении дисциплин «Сопrotивление материалов», «Технология конструкционных материалов», «Теория механизмов и машин» и «Детали машин и основы конструирования». Проектирование понимается как одна из форм самостоятельной работы студентов.

#### **1.1. Содержание и объем работы по курсовому проектированию**

Выполнение курсового проекта необходимо для изучения общих принципов расчета и приобретения навыков конструирования, обеспечивающих рациональный выбор материалов, форм, размеров и способов изготовления типовых изделий машиностроения. Студент должен уметь выбирать наиболее подходящие материалы для деталей машин, выполнять расчеты типовых деталей и узлов машин, пользуясь справочной литературой и стандартами, выбирать смазочные материалы и оформлять графическую и текстовую конструкторскую документацию в соответствии с требованиями ЕСКД.

Исходным материалом для курсового проекта служит задание, содержащее кинематическую схему устройства и технические условия на проектирование.

подавляющее большинство схем приводов, используемых в промышленности, включает двигатель того или иного типа, соединительные муфты и передачу — трансмиссию (рис. 1.1, *а*). Последняя служит для передачи энергии двигателя к рабочему органу. В приводах муфту между двигателем и редуктором часто заменяют на ременную передачу, а между редуктором и исполнительным механизмом — на цепную (рис. 1.1, *б*). Общее передаточное число привода, содержащего ременную, зубчатую и цепную пере-

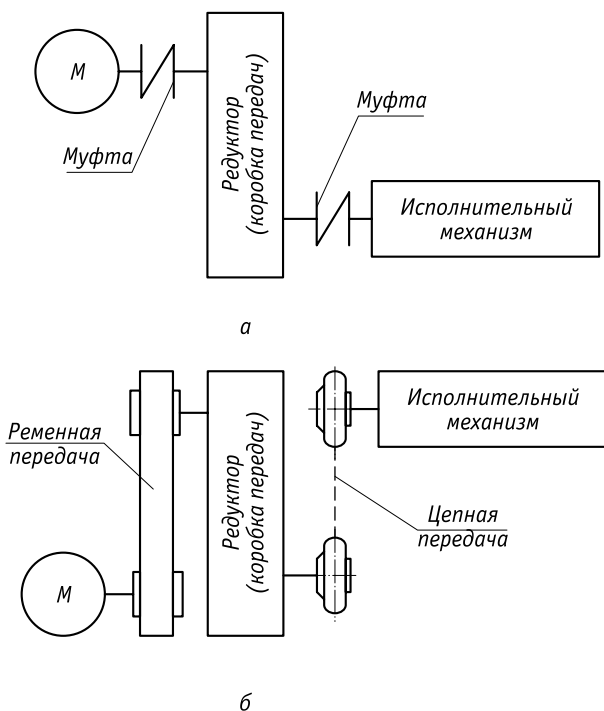


Рис. 1.1

дачи, может достигать до 500. В более нагруженных приводах общее передаточное число не превышает 250. Такое передаточное число можно получить в приводе, составленном из редуктора и цепной или ременной передачи. При использовании червячных редукторов следует помнить об их сравнительно низком КПД и свойстве самоторможения.

Курсовой проект содержит три-четыре листа чертежей формата А1 и расчетно-пояснительную записку на 20 — 30 страницах. Общему виду отводится один-два листа; один лист — наиболее существенному узлу в объеме технического проекта и один лист — рабочим чертежам трех-четырех деталей разного типа (зубчатые колеса, валы, крышки или стаканы подшипникового узла и т.п.) и литой детали. Объем графической части и перечень деталей, подлежащих вычерчиванию, устанавливаются при выдаче задания. Как минимум, один из рабочих чертежей детали выполняется на компьютере с помощью AutoCAD, SolidWorks или другой известной программы.

В расчетно-пояснительной записке должны быть отражены: определение КПД привода и выбор электродвигателя; разбивка

передаточного числа по ступеням; определение частоты вращения и крутящих моментов на валах; выбор материала, допускаемых напряжений и твердости зубьев, установление класса точности изготовления зубчатых колес; определение модулей всех зубчатых колес при расчете зубьев на контактную прочность и по напряжениям изгиба, определение всех прочих размеров зубчатых колес; проверка на нагрев червячных пар; определение сил, возникающих в зацеплении, и проектный расчет валов; выбор материала валов; определение суммарных реакций опор валов и выбор подшипников качения; расчет валов на усталостную прочность с построением эпюр моментов; расчет на жесткость длинных валов коробок передач и червяков; проверка шпонок и шлицевых соединений по напряжениям смятия; выбор системы смазки и типа смазочного материала редуктора (коробки передач) и подшипников; прочие расчеты в зависимости от схем привода и принятой конструкции (расчет зубчатых и кулачковых муфт, определение силы включения и пр.); краткое описание конструкции с обоснованием принятых решений и параметров, выбираемых по конструктивным соображениям.

## **1.2. Требования, предъявляемые к курсовому проекту**

В процессе работы над курсовым проектом студент должен самостоятельно находить наиболее целесообразные технические решения. При этом необходимо учитывать комплекс разнообразных требований: прочность, жесткость, долговечность, технологичность и экономичность конструкции.

Технологичность разрабатываемой конструкции определяется использованием ГОСТов и отраслевых нормалей в части режущего и мерительного инструмента, применением стандартных изделий (подшипников, винтов, гаек и т. п.) и сортамента материалов для заготовок, унификацией однотипных деталей конструкции или их заготовок.

Особое внимание при разработке конструкции следует обращать на удобство ее эксплуатации, что зависит прежде всего от простоты сборки и разборки.

Графическая часть проекта должна достаточно полно отражать суть принятых автором конструктивных решений. При выполнении чертежей следует руководствоваться ГОСТами на чертежи в машиностроении: на форматы, условные обозначения, шрифты, спецификации и масштабы чертежей. Однако рекомендованные в ЕСКД упрощения и условные изображения не допускаются.

Чертежи должны быть четкими, компактными и иметь необходимое число проекций, дающих полное представление об устройстве узла (детали). Относящиеся к чертежу таблицы и надписи должны быть размещены на нем в соответствии с указаниями стандартов. На чертежах общего вида изделия приводятся техническая характеристика и технические требования.

На сборочных чертежах редукторов (коробок передач) должны быть указаны: установка подшипников и способы их регулирования, крепление зубчатых колес на валах, конструкция указателя уровня масла, сливной пробки, смотрового люка, отдушины, «ушей» и болтов, соединяющих крышку с корпусом, контрольных штифтов, отжимных болтов и других деталей.

На сборочных чертежах должны быть приведены следующие размеры: габаритные; размеры, необходимые для сборки узлов; размеры, необходимые для установки узлов на место; номинальные размеры соединений с указанием допусков и посадок; размеры между осевыми линиями зубчатых зацеплений, а также номера позиций составных частей, входящих в изделие.

**Форматы** листов чертежей определяют размеры внешней рамки, выполняемой тонкой линией (рис. 1.2). По ГОСТу установлены следующие основные форматы листов чертежей и их обозначения:

Обозначение формата .....	A0	A1	A2	A3	A4
Размеры листа, мм .....	841 × 1189	594 × 841	420 × 594	297 × 420	210 × 297

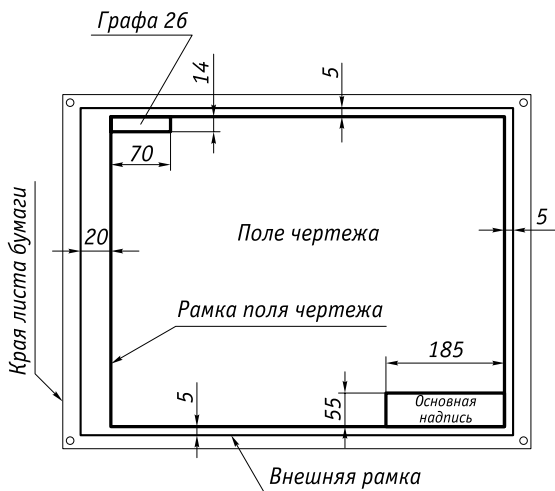


Рис. 1.2

Допускается применение дополнительных форматов, образуемых увеличением коротких сторон листов основных форматов в целое число раз, например, лист формата А4×3 имеет размеры 297×630 мм, формата 2×А4×3 — 594×630 мм.

На рис. 1.2 кроме внешней рамки показаны рамка поля чертежа и размеры основной надписи, всегда помещаемой в правом нижнем углу формата, вплотную к рамке, форма и содержание которой представлены на рис. 1.3, а (для первого листа), рис. 1.3, б (для второго и последующего листов). На формате А4 основную надпись располагают только вдоль его короткой стороны.

Содержание граф на рис. 1.3: 1 — наименование чертежа; 2 — обозначение чертежа (устанавливает кафедра); 3 — обозначение материала детали (заполняют только на чертежах деталей); 4 — литера чертежа (обычно в учебном курсе используют литеру У); 5 — масса изделия (на учебных чертежах обычно не указывают); 6 — масштаб; 7 — порядковый номер листа (на документах, состоящих из одного листа, графу не заполняют); 8 — число листов (графу заполняют только на первом листе); 9 — наименование предприятия, выпустившего чертеж; 10 — характер работы, выполняемой лицом, подписавшим чертеж (на учебных чертежах обычно заполняют: первую строчку — «Разработал»; вторую — «Проверил» и последнюю — «Утвердил»); 11 — фамилии лиц, под-

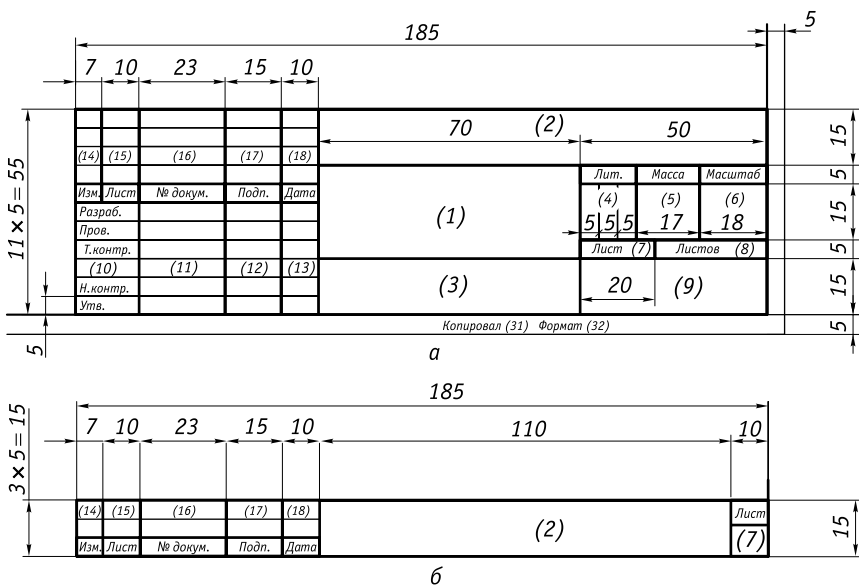


Рис. 1.3



писавших чертеж; 12 — подписи лиц, фамилии которых указаны в графе 11; 13 — даты, когда были сделаны подписи; 14—18 — предназначены для отметок изменений, вносимых в чертежи (на учебных чертежах остаются незаполненными). Графу 26 помещают в левом верхнем углу чертежа (см. рис. 1.2) при расположении основной надписи вдоль длинной стороны листа и содержащей обозначение чертежа, повернутое на 180°.

При заполнении основной надписи в курсовом проекте пользуются упрощенной системой обозначения чертежей. Например, на чертеже общего вида редуктора шифр Р — 05.03.00.00СБ означает: редуктор, схема — 05, вариант — 03; для детали этого редуктора, имеющей номер позиции 08 на общем виде, шифр Р — 05.03.00.08. Спецификация будет иметь обозначение Р — 05.03.00.00.

В зависимости от сложности и величины изображаемых изделий масштабы выбирают из следующего ряда:

- масштабы уменьшения: 1 : 2; 1 : 2,5; 1 : 4; 1 : 5; 1 : 10; 1 : 15; 1 : 20; 1 : 25 и т.д.;
- натуральная величина — 1 : 1;
- масштабы увеличения: 2 : 1; 2,5 : 1; 4 : 1; 5 : 1; 10 : 1; 20 : 1; 40 : 1 и т.д.

При выборе масштаба следует руководствоваться удобством пользования чертежом. Масштаб, указываемый в графе основной надписи, имеющей заголовок «Масштаб», обозначают: 1 : 1; 1 : 2; 2 : 1 и т.д. Масштаб изображения, отличающийся от указанного в основной надписи, указывают в скобках (без буквы «М»), рядом с обозначением изображения, например: А (2 : 1), Б — Б (2 : 1).

Искажение масштаба в чертеже допускают в случаях, когда некоторые элементы изображения трудно вычерчивать или желательно усилить их зрительное восприятие, и при изображении в масштабе 1 : 1 и меньших тонких пластин, прокладок, шайб (рис. 1.4).

*Расчетно-пояснительная записка* должна быть написана на листах бумаги формата А4 (210×297) со следующими размерами полей: левое — не менее 30 мм; правое — не менее 20 мм; верхнее — не менее 15 мм; нижнее — не менее 20 мм. Листы должны быть сброшюрованы и пронумерованы. Текст необходимо писать от руки или выполнять с применением печатающих и графических устройств вывода ПЭВМ — высота букв не менее 2,5 мм; расстояние между основаниями строк — от 8 до 12 мм. Эскизы и схемы, включенные в текст, выполняют с учетом правил машиностроительного черчения.

В состав расчетно-пояснительной записки входят: титульный лист, содержание, техническое задание на проектирование, основной текст, список использованных источников и приложения. На обложке расчетно-пояснительной записки должны быть ука-

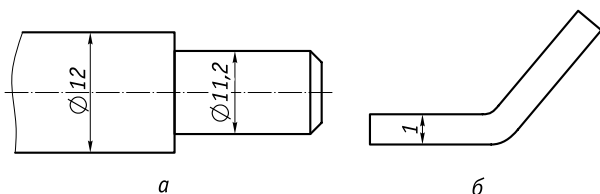


Рис. 1.4

заны: название специальности, курс, группа, фамилия и инициалы студента, должность и фамилия руководителя проекта, а также наименование работы. В начале расчетно-пояснительной записки должно находиться задание на проект, подписанное заведующим кафедрой. На этом же задании руководитель делает отметку об окончании работ над проектом и допуске студента к защите.

Основной текст разбивают на разделы и подразделы. Разделы должны иметь порядковый номер, обозначенный арабскими цифрами. Разделы и подразделы должны иметь заголовки, кратко и четко отражающие содержание. Заголовки записывают с прописной буквы без точки в конце, не подчеркивая. Переносы слов недопустимы. Каждый раздел начинают с новой страницы.

Расчетно-пояснительная записка должна включать: введение (с краткой характеристикой проектируемого изделия); описание и обоснование выбранной конструкции; расчеты, подтверждающие работоспособность и надежность конструкции, а также необходимые схемы сил и эпюры моментов, действующих на детали. При необходимости к эскизам деталей приводятся расчетные сечения. Расчеты следует производить в единицах СИ (м, мм, м<sup>2</sup>, м<sup>3</sup>, мм<sup>3</sup>, Н, кН, МН, Н·м, Па, МПа). Точность расчетов: для сил — до значащих десятков ньютона; для моментов — до десятых долей ньютона на метр и для напряжений — до десятых долей мегапаскаля; при этом 0,5 и больше считаются за единицу, а меньшая часть дроби отбрасывается. Для линейных размеров в миллиметрах берут только целые значения из ряда нормальных величин линейных размеров, кроме размеров при винтовой нарезке, профилировании зубьев и конусов. В расчетах следует брать  $\pi \approx 3,14$ ;  $\pi^2 \approx 10$ ;  $g \approx 10 \text{ м/с}^2$ ;  $\pi/32 \approx 0,1$  и т. д.

При определении параметров, необходимых для выполнения проекта, сначала должна быть написана формула в символьном виде, далее пояснение каждого параметра с указанием единиц измерения в той же последовательности, в какой они приведены в формуле. Первую строку пояснения начинают со слова «где» без двоеточия после него. Затем — та же формула с числовыми значениями без алгебраических преобразований, потом пишется результат вычислений с обязательным указанием его размерности.

# ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. КИНЕМАТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

---

Любая машина имеет рабочие органы и их привод. Структурная схема привода включает двигатель и механическую передачу. Последняя служит для передачи энергии двигателя к рабочему органу. Настоящее пособие предназначено для проектирования приводов общего назначения с механическими передачами, обеспечивающими вращательное движение рабочих органов.

Приводы могут иметь следующие типы передач: цилиндрические и конические зубчатые, червячные, планетарные, волновые, комбинированные, ременные, цепные, винт-гайка. По расположению механизма привода в пространстве различают приводы с горизонтальным и вертикальным тихоходными выходными валами.

### 2.1. Выбор исполнения и типа двигателя привода

В данном учебном пособии предполагается, что в приводе предусмотрено использование электрического двигателя переменного тока.

Назначение машины обуславливает основные требования к приводу, специфику его работы, при этом учитываются внешняя среда, температурные условия, географические особенности и т.п.

Выбранный двигатель должен удовлетворять следующим условиям:

- обеспечивать момент, достаточный для разгона механизма с заданным ускорением, а при торможении двигателем — замедление заданной величины;
- при работе в заданном режиме не должен испытывать длительных перегрузок, ведущих к перегреву электродвигателя.

Мощность двигателя всегда относят к определенному режиму работы. По умолчанию предполагается, что будет продолжительный режим работы двигателя, при котором двигатель нагревается до установившейся температуры с продолжительностью включения  $PВ = 100 \%$ , а время одного цикла работы превышает 10 мин.

Электродвигатели переменного тока по массе меньше на 50 % по сравнению с электродвигателями постоянного тока.

**Выбор исполнения и тип двигателя**

Характеристика помещения (окружающая среда)	Рекомендуемое исполнение двигателя	Дополнительные требования	Тип двигателя
Сухие чистые отапливаемые	Закрытое обдуваемое и защищенное	Нет	Допускается установка двигателей всех типов
Неотапливаемые и умеренно влажные	Закрытое	Противосыrostная изоляция	АИ, 4А, МТФ, МТКФ, МТН, МТКН
Агрессивная химическая среда	Химически стойкое	Специальное исполнение	
На открытом воздухе с защитой от прямого попадания влаги	Закрытое	Противосыrostная изоляция	
Пожароопасные	Закрытое и взрывозащищенное	Недопустимость перегрузок	АИ, 4А, МТН, МТКН

Основные типы электродвигателей, их сравнительные характеристики и области применения приведены в табл. 2.1.

К основным типам современных электродвигателей переменного тока относят *электродвигатели единой серии* трехфазного тока серии АИ мощностью от 0,025 до 400 кВт, с высотой оси вращения вала от 45 до 355 мм.

Электродвигатели АИ выпускаются в трех исполнениях: на лапах — ИМ1081 (основное исполнение), с лапами и фланцевым щитом — ИМ2081 и лишь с фланцевым щитом — ИМ3081, при этом фланцы изготавливают с отверстиями  $d_{22}$  гладкими или резьбовыми. Выступающие концы валов изготавливают следующих исполнений: цилиндрические со шпонкой; цилиндрические без шпонки с резьбовым концом; цилиндрические со шпонкой с резьбовым концом; конические без шпонки с резьбовым концом; конические со шпонкой с резьбовым концом; конические со шпонкой и внутренней резьбой.

Основные данные электродвигателей приведены в табл. 2.2, основные размеры исполнения ИМ1081 — на рис. 2.1, а и в табл. 2.3; а исполнения ИМ3081 — на рис. 2.1, б и в табл. 2.3. Эти электродвигатели предназначены для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам и скольжению для умеренного и тропического климата. Широкое

**Электродвигатели асинхронные трехфазные единой серии АИР**

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$T_{\max}/T_{\text{ном}}$	Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$T_{\max}/T_{\text{ном}}$
<i>Синхронная частота вращения 3 000 мин<sup>-1</sup></i>							
АИР71А2	0,75	2 820	2,2	АИР71В4	0,75	1 350	2,2
АИР71В2	1,1	2 805	2,2	АИР80А4	1,1	1 395	2,2
АИР80А2	1,5	2 850	2,2	АИР80В4	1,5	1 395	2,2
АИР80В2	2,2	2 850	2,2	АИР90Л4	2,2	1 395	2,2
АИР90Л2	3,0	2 850	2,2	АИР100S4	3,0	1 410	2,2
АИР100S2	4,0	2 850	2,2	АИР100Л4	4,0	1 410	2,2
АИР100Л2	5,5	2 850	2,2	АИР112М4	5,5	1 432	2,2
АИР112М2	7,5	2 895	2,2	АИР132S4	7,5	1 440	2,2
АИР132М2	11,0	2 910	2,2	АИР132М4	11,0	1 448	2,2
АИР160S2	15,0	2 910	2,7	АИР160S4	15,0	1 455	2,9
АИР160М2	18,5	2 910	2,7	АИР160М4	18,5	1 455	2,9
АИР180S2	22,0	2 919	2,7	АИР180S4	22,0	1 462	2,4
АИР180М2	30,0	2 925	2,7	АИР180М4	30,0	1 470	2,7
<i>Синхронная частота вращения 1 500 мин<sup>-1</sup></i>							

Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$T_{\text{max}}/T_{\text{ном}}$	Тип двигателя	Мощность, кВт	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	$T_{\text{max}}/T_{\text{ном}}$
<i>Синхронная частота вращения 1 000 мин<sup>-1</sup></i>							
АИР80А6	0,75	920	2,2	АИР90LА8	0,75	695	2,2
АИР80В6	1,1	920	2,2	АИР90LВ8	1,1	695	2,2
АИР90L6	1,5	925	2,2	АИР100L8	1,5	702	2,2
АИР100L6	2,2	945	2,2	АИР112МА8	2,2	709	2,2
АИР112МА6	3,0	950	2,2	АИР112МВ8	3,0	709	2,2
АИР112МВ6	4,0	950	2,2	АИР132S8	4,0	716	2,2
АИР132S6	5,5	960	2,2	АИР132М8	5,5	712	2,2
АИР132М6	7,5	960	2,2	АИР160S8	7,5	727	2,4
АИР160S6	11,0	970	2,5	АИР160М8	11,0	727	2,4
АИР160М6	15,0	970	2,6	АИР180М8	15,0	731	2,2
АИР180М6	18,5	980	2,4	—	—	—	—

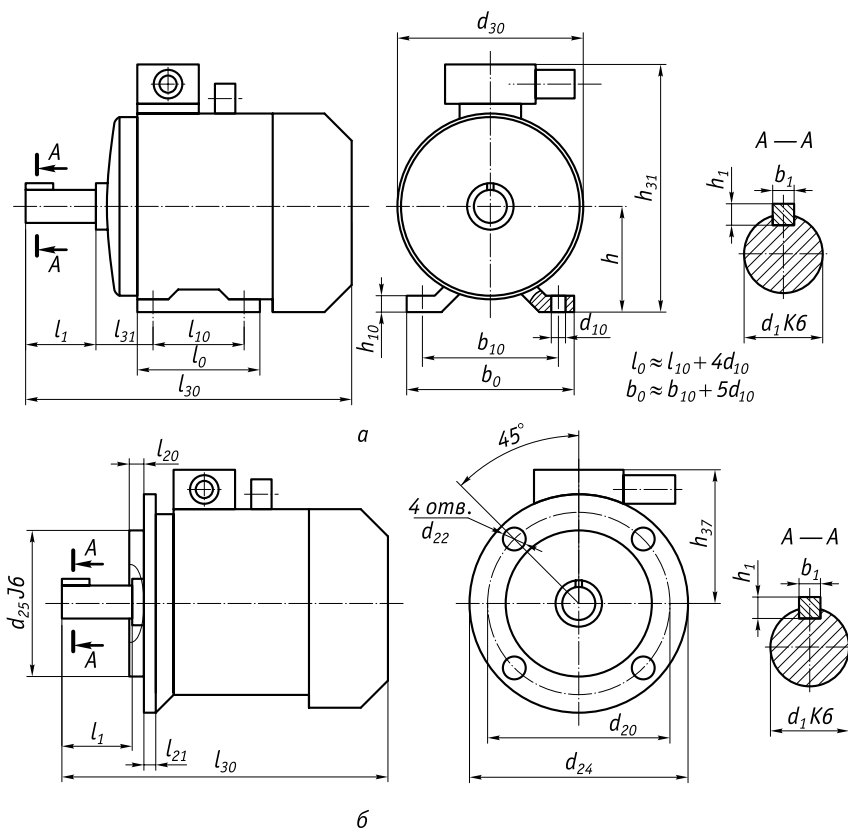


Рис. 2.1

распространение имеют электродвигатели, частота вращения которых близка к одной из синхронных частот: 3 000, 1 500, 1 000 и 750 мин<sup>-1</sup>. При отсутствии нагрузки синхронная частота вращения вала  $n_c$ , мин<sup>-1</sup>, определяется по формуле  $n_c = 2 \cdot 60f/p$ , где  $f$  — частота тока, Гц;  $p$  — число полюсов. Выпускаются электродвигатели для работы от сети частотой 50 и 60 Гц. Пример обозначения электродвигателя — «Двигатель АИР100S2 ТУ 16 — 525.564—84». Для приводов, работающих в условиях повышенных температур, например, в металлургическом производстве, рекомендуются электродвигатели серий МТН и МТКН.

## 2.2. Определение мощности и выбор двигателя привода

В заданиях к курсовым проектам, выполненным по рис. 1.1, исходные данные представляют в следующем виде: условия окру-





жающей среды; назначение и кинематическая схема привода; эффективная мощность на ведомом валу привода  $P_{\text{вм}}$  ( $P_{\text{эф}}$ ) или на ведущем валу приводимой в движение машины, кВт; угловая скорость выходного вала  $\omega_{\text{вм}}$ , рад/с, или частота его вращения  $n_{\text{вм}}$ , мин<sup>-1</sup>; характер нагрузок (постоянная, переменная, реверсивная, с резкими рывками или монотонная и т.п.); необходимость отключения двигателя для его пуска вхолостую.

Ведущим будем называть вал электродвигателя, а ведомым — вал приводной машины; быстроходным — входной вал редуктора или коробки передач, а тихоходным — выходной вал редуктора или коробки передач.

Если задана угловая скорость, то частота вращения ведомого вала определяется с помощью соотношения  $n_{\text{вм}} = 30\omega_{\text{вм}}/\pi$ .

Режим работы обычно задается либо суточным графиком работы механизма (см. гл. 4), либо типовым режимом нагружения.

Используя исходные данные, определяют мощность на ведущем валу привода по формуле

$$P_{\text{вщ}} = P_{\text{вм}}/\eta_{\text{общ}}, \quad (2.1)$$

где  $\eta_{\text{общ}}$  — общий КПД привода.

Для заданий, выполняемых по схеме, представленной на рис. 1.1,  $\delta$ , вместо эффективной мощности задают либо крутящий момент  $T_{\text{р.м}}$ , Н·м, и угловую скорость  $\omega_{\text{р.м}}$ , рад/с, на валу рабочей машины, либо силу тяги  $F$ , Н, и скорость  $v$ , м/с, тягового органа. В этом случае мощность на ведомом валу привода  $P_{\text{вм}}$  определяется по формуле  $P_{\text{вм}} = T_{\text{р.м}} \omega_{\text{р.м}} = Fv$ .

Снимаемая с вала двигателя энергия может передаваться через звенья привода либо последовательно, либо несколькими потоками параллельно. В случае последовательной передачи потока мощности через все звенья (см. рис. 1.1), общий КПД привода определяется произведением частных КПД передач, входящих в кинематическую схему:

$$\eta_{\text{общ}} = \eta_{\text{ц}}^{\alpha} \eta_{\text{к}}^{\beta} \eta_{\text{ч}}^{\gamma} \eta_{\text{р}}^{\delta} \eta_{\text{ц.п}}^{\epsilon} \eta_{\text{п}}^{\zeta} \eta_{\text{р.м}}^{\eta} \eta_{\text{м}}^{\theta} \eta_{\text{в}}^{\iota} \eta_{\text{н}}, \quad (2.2)$$

где  $\eta_{\text{ц}}$  — КПД одной пары цилиндрических зубчатых колес;  $\eta_{\text{к}}$  — КПД одной пары конических зубчатых колес;  $\eta_{\text{ч}}$  — КПД червячной пары;  $\eta_{\text{р}}$  — КПД ременной передачи;  $\eta_{\text{ц.п}}$  — КПД цепной передачи;  $\eta_{\text{п}}$  — КПД одной пары подшипников;  $\eta_{\text{р.м}}$  — КПД, учитывающий потери энергии на перемешивание масла зубьями шестерен (ориентировочно при использовании автолов  $\eta_{\text{р.м}} = 0,98$ , при использовании нигролов  $\eta_{\text{р.м}} = 0,96$ ; о смазке зубчатых редукторов см. гл. 12);  $\eta_{\text{м}}$  — КПД муфт;  $\eta_{\text{в}}$  и  $\eta_{\text{н}}$  — КПД, учитывающий потери энергии двигателя на привод вентилятора воздушного охлаждения или на привод масляного насоса соответственно.

Показатели степени в выражении (2.2) означают:  $\alpha$  — число пар цилиндрических зубчатых колес;  $\beta$  — число пар конических зубчатых колес;  $\chi$  — число червячных передач;  $\delta$  — число ременных передач;  $\varepsilon$  — число цепных передач;  $\psi$  — число пар подшипников;  $\varphi$  — число муфт. В табл. 2.4 приведены ориентировочные значения КПД отдельных типов механических передач.

В величинах  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\chi$ ,  $\delta$ ,  $\varepsilon$ ,  $\psi$ ,  $\varphi$  учитываются только те передачи, которые одновременно находятся под нагрузкой. Если в заданной схеме нет какой-либо передачи, то вместо соответствующего КПД в (2.2) подставляют единицу. В случае передачи мощности разветвленным потоком общий КПД определяется по формуле

$$\eta_{\text{общ}} = \frac{\sum P_i \eta_i}{\sum P_i} \eta_{\text{п}}^{\psi} \eta_{\text{р.м}} \eta_{\text{м}}^{\varphi}, \quad (2.3)$$

где  $P_i$  — доля мощности, приходящаяся на один поток;  $\eta_i$  — КПД этого потока, который определяется по формуле (2.2).

Например, для редуктора, выполненного по схеме рис. 2.2, считая, что общая мощность делится на два потока поровну, получим

$$P_{\text{I}} = P_{\text{II}} = P_{\text{вх}}/2; \eta_{\text{I}} = \eta_{\text{II}} = \eta_{\text{ц}}^2 \eta_{\text{п}}.$$

Здесь  $\alpha = 2$  (две пары зубчатых колес 1—2 и 3—4 для одного потока мощности);  $\psi = 1$  (одна пара подшипников в каждом из двух потоков мощности) и  $\varphi = 2$  (две пары подшипников для входного и выходного валов); тогда по формуле (2.3) получим

$$\eta_{\text{общ}} = ((\eta_{\text{I}} P_{\text{I}} + \eta_{\text{II}} P_{\text{II}}) / (P_{\text{I}} + P_{\text{II}})) \eta_{\text{п}}^2 \eta_{\text{р.м}} \eta_{\text{м}}^2 = \eta_{\text{ц}}^2 \eta_{\text{п}}^3 \eta_{\text{р.м}} \eta_{\text{м}}^2.$$

Если в схеме привода предусматривается принудительное охлаждение с помощью вентилятора, как у червячных редукторов, то КПД  $\eta_{\text{р.м}}$  следует принимать не более 0,8, а в случае отбора мощности на привод масляного насоса —  $\eta_{\text{р.м}} \leq 0,9$ . Если используются и вентилятор, и масляный насос, то  $\eta_{\text{р.м}} \leq 0,7$ .

Далее в соответствии с требуемой мощностью по табл. 2.2 выбирается нужный электродвигатель. При выборе электродвигателя необходимо учитывать, что двигатели серии АИ допускают длительную перегрузку не более 5%. Номинальная мощность электродвигателя привода должна быть  $P_{\text{дв}} \geq P_{\text{вх}}$ .

Если мощность выбранного электродвигателя из-за дискретности ряда мощностей выпускаемых электродвигателей принять больше требуемой, то это приведет не к перегрузке передачи, а лишь к недогрузке электродвигателя. Однако выбор электродвигателя с большим запасом мощности приводит к излишним динамическим нагрузкам элементов привода.

Следует иметь в виду, что приводы с быстроходными двигателями могут иметь малые межосевые расстояния в зубчатых пере-

Значение КПД механических передач

Тип передачи	КПД	Тип передачи	КПД
Закрытая зубчатая: с цилиндрическими колесами с коническими колесами	0,96 ... 0,98	Открытая зубчатая передача	0,93 ... 0,96
	0,95 ... 0,97		
Закрытая червячная при числе заходов червяка: 1 2; 3 4	0,7 ... 0,75	Цепная передача: закрытая открытая	0,95 ... 0,97
	0,75 ... 0,85		0,92 ... 0,95
	0,85 ... 0,93	Ременная передача: с плоским ремнем с клиновым ремнем	0,96 ... 0,98 0,95 ... 0,97
Подшипники качения (одна пара)	0,99	Муфта соединительная	0,98

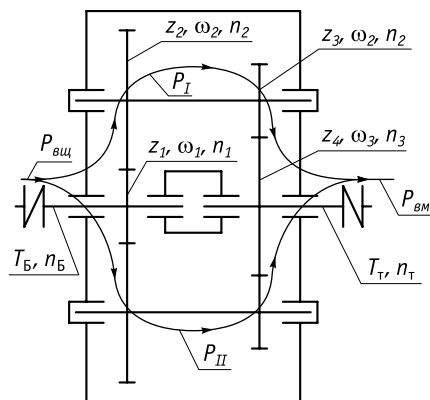


Рис. 2.2

дачах, из-за чего утоньшаются перемычки корпуса между наружными кольцами подшипников соседних валов, а это связано с трудностью установки стаканов и крышек подшипников.

### 2.3. Кинематический расчет привода

После выбора электродвигателя становится известной частота вращения его вала  $n_{дв}$ , т.е. частота вращения ведущего вала привода. Общее передаточное число привода в направлении потока

мощности от ведущего звена к ведомому вычисляется по формуле  $u_{\text{общ}} = n_{\text{дв}}/n_{\text{вм}}$ , или  $u_{\text{общ}} = \omega_{\text{вш}}/\omega_{\text{вм}}$ .

Вычисление проводится с точностью до второго знака после запятой.

Следующим этапом является разбивка общего передаточного отношения на передаточные отношения (числа) отдельных передач по формуле

$$u_{\text{общ}} = u_{12}u_{34}u_{56} \dots u_n, \dots u_{n+1}, \quad (2.4)$$

где  $u_{12}$  — передаточное число первой передачи;  $u_{34}$  — передаточное число второй передачи;  $u_{56}$  — передаточное число третьей передачи и т.д.

В табл. 2.5 приведены рекомендуемые и наибольшие возможные значения передаточных чисел различных передач.

При определении общего передаточного числа стандартного редуктора и передаточных чисел его ступеней следует придерживаться нормальных величин линейных размеров  $Ra 20$ . Для нестандартных редукторов и нередукторных зубчатых передач придерживаться ряда  $Ra 20$  необязательно. Для зубчатых редукторов общего назначения, выполненных в виде самостоятельных агрегатов, номинальное значение передаточного числа одной ступени имеет следующие значения (ряд 1 следует предпочитать ряду 2; для одноступенчатых редукторов  $u > 5$  применять не рекомендуется):

Ряд 1 ..... 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5  
Ряд 2 ..... 1,12; 1,4; 1,8; 2,24; 2,8; 3,55; 4,5; 5,6; 7,1; 9,0; 11,2

Таблица 2.5

### Передаточные числа различных передач

Вид передачи	Рекомендуемое значение	Наибольшее значение	Вид передачи	Рекомендуемое значение	Наибольшее значение
Зубчатая редуктора: с цилиндрическими колесами: прямозубыми косозубыми шевронными с коническими колесами	До 4 До 5 До 6 До 3	12,5 12,5 12,5 6	Червячная: редуктора открытая	До 40 До 60	90 100
			Цепная	До 4	8
			Ременная: плоским ремнем клиновым ремнем	До 5 До 4	15 10
Открытая зубчатая с цилиндрическими колесами	До 6	20			

Для двухступенчатых редукторов рекомендуемые общие значения передаточного числа имеют следующие значения (ряд 1 следует предпочитать ряду 2):

Ряд 1 .....	6,3	8,0	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63
Ряд 2 .....	7,1	9,0	11,2	14	18	22,4	28	35,5	45	56	

При разбивке общего передаточного числа редуктора по его ступеням рекомендуется принимать передаточное число быст­роходной ступени большим, чем передаточные числа последую­щих ступеней. Так, следует принимать передаточное число пер­вой ступени в *двухступенчатом редукторе* с цилиндрическими зубьями, выполненном по развернутой схеме как на рис. 2.3, а,  $u_{12} = 1,15\sqrt{u_{ред}}$ , в *соосных редукторах* (см. рис. 2.2)  $u_{12} = 1,05\sqrt{u_{ред}}$ , где  $u_{ред}$  — общее передаточное число редуктора.

В *трехступенчатых редукторах* с цилиндрическими зубча­тыми колесами (рис. 2.3, б) разбивку производят представляя об­щее передаточное число трехступенчатого редуктора как произве­дение передаточных чисел его ступеней:  $u_{ред} = u_{12} u_{34} u_{56}$ . На пер­вую ступень дают передаточное число  $u_{12} = 1,15\sqrt[3]{u_{ред}}$ ; на вторую ступень —  $u_{34} = 1,15\sqrt{u_{ред} / u_{12}}$ . Передаточное число третьей ступе­ни  $u_{56}$  определяют по формуле  $u_{56} = u_{ред} / (u_{12} u_{34})$ .

В *коническо-цилиндрических редукторах* общее передаточное число  $u_{ред}$  редуктора следует разбивать по ступеням так, чтобы пере­даточное число конической ступени было  $u_{12} = 0,9\sqrt{u_{ред}}$  и  $u_{12} \leq 4$ .

В *коробках скоростей* (рис. 2.4) задают максимальное переда­точное число  $u_{max}$  и знаменатель геометрической прогрессии  $\phi$ , который имеет ряд нормализованных значений: 1,12; 1,25; 1,4; 1,6; 1,8; 2.

Наименьшее значение передаточного числа коробки передач может быть равным единице. При работе на первой скорости пере­даточное число первой пары шестерен берется равным  $u_{max}$ , а именно:  $u_{12} = u_{max} = z_2/z_1$ . Передаточное число на второй скорости должно быть в  $\phi$  раз меньше:  $u_{56} = z_6/z_5 = u_{max}/\phi$ , а передаточное число третьей скорости должно быть в  $\phi$  раз меньше, чем переда­точное число второй скорости:  $u_{34} = z_4/z_3 = u_{max}/\phi^2$ .

После принятия значений передаточных чисел отдельных ви­дов передач и передаточных чисел ступеней производятся кине­матические и силовые расчеты привода. Расчет следует вести от ведущего вала к ведомому.

Если передаточное число передачи или ступени в редукторе или коробке передач превышает рекомендуемое значение, то сле­дует выбрать двигатель с меньшей частотой вращения.

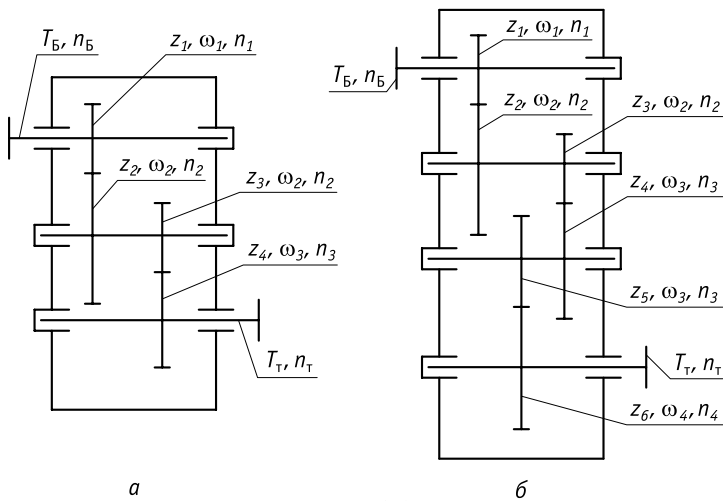


Рис. 2.3

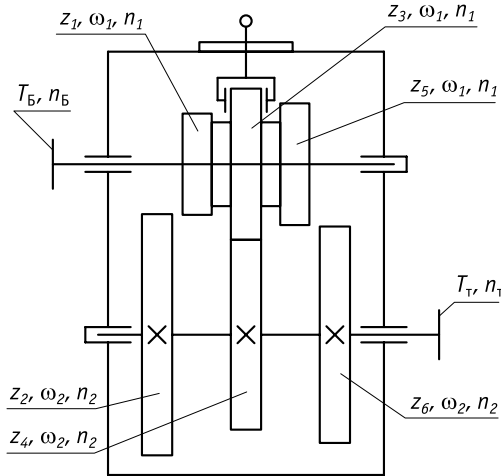


Рис. 2.4

При известной мощности на валу  $P$ , кВт, и частоте вращения вала  $n$ ,  $\text{мин}^{-1}$ , крутящий момент  $T$ , Н·м, находят по формуле

$$T = 9,55 \cdot 10^3 P/n. \quad (2.5)$$

Мощность на *первом валу*  $P_1 = P_{\text{вщ}} \eta_M$  ( $\eta_M$  — КПД муфты); частота его вращения  $n_1 = n_{\text{вщ}} = n_{\text{дв}}$ ; крутящий момент  $T_1 = T_{\text{вщ}} \eta_M$ ,  $T_1 = 9,55 \cdot 10^3 P_1/n_1$ .

Мощность на *втором валу*  $P_2 = P_1 \eta_1$ ; частота его вращения  $n_2 = n_1/u_{12}$ ; крутящий момент  $T_2 = 9,55 \cdot 10^3 P_2/n_2$ . Для *последующих валов* расчет производят аналогично.