

# Детали машин

Лектор

д.т.н., проф. **Соломонов Константин Николаевич**

Целью курса является *изучение основ расчета и конструирования деталей и узлов общего назначения с учетом режима работы и срока службы машин.*

При этом рассматриваются выбор материала и его термообработка, рациональные формы деталей, их технологичность и точность изготовления. Детали машин зачастую имеют сложную конфигурацию, работают в различных условиях, и далеко не всегда можно получить точную формулу для их расчета. При расчетах деталей машин широко применяют различные приближенные и эмпирические формулы, в которые вводят поправочные коэффициенты, устанавливаемые опытным путем и подтверждаемые практикой конструирования и эксплуатации машин.

# Литература

1. Детали машин и основы конструирования. Рабочая программа и задание на курсовой проект с методическими указаниями. № 16/5/3. – М.: РОАТ, 2002.
2. Детали машин и основы конструирования. Методические указания к выполнению курсового проекта. № 16/5/2. – М.: РОАТ, 2004.
3. Куклин Н.Г. и др. Детали машин. – М.: Высшая школа, 1999.
4. Решетов Д.Н. Детали машин. – М.: Машиностроение, 1989.
5. Чернавский С.А. и др. Курсовое проектирование деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988.

# Тематика лекций

1. Основы проектирования деталей машин.
2. Зубчатые передачи.
3. Червячные передачи.
4. Редукторы.

# ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

## Общие сведения

**Механизмом** называют систему тел, предназначенную для преобразования движения одного или нескольких тел в требуемые движения других тел.

**Машиной** называют механизм или сочетание механизмов, которые служат для облегчения или замены физического или умственного труда человека и повышения его производительности:

*машины-сдвигатели*, преобразующие какой-либо вид энергии в механическую (электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания и др.);

*машины-генераторы*, преобразующие механическую энергию в другой вид энергии (компрессоры, динамо-машины и др.);

*машины-орудия*, производящие работу, связанную с транспортировкой или с изменением формы и размеров тел (роботы, транспортеры, краны, различные станки, прессы и др.); *информационные машины*, предназначенные для преобразования информации (компьютеры, сеть Интернет, телевизоры, радиоприемники, телефоны, магнитофоны, теле-, фото- и видеокамеры).

Все машины состоят из деталей, которые объединены в узлы.

**Деталью** называют часть машины, изготовленную без применения сборочных операций (шпонка, болт, зубчатое колесо и др.).

**Узел** — крупная сборочная единица (коробка передач, муфта, редуктор и др.), являющаяся составной частью изделия (привода, машины).

В машиностроении различают детали и узлы общего и специального назначения.

Деталими и узлами **общего назначения** называют такие, которые встречаются почти во всех машинах (болты, валы, зубчатые колеса, подшипники, муфты и др.). Они составляют подавляющее большинство и изучаются в курсе «Детали машин».

К деталям и узлам **специального назначения** относят такие, которые встречаются только в одном или нескольких типах машин (шпиндели станков, поршни, шатуны, коленчатые валы и др.).

Все детали и узлы общего назначения делятся на три основные группы: **соединительные** детали и соединения, которые могут быть неразъемными (заклепочные, сварные и др.) и разъемными (шпоночные, резьбовые и др.); **передачи** вращательного движения (зубчатые, червячные, ременные и др.); детали и узлы, **обслуживающие передачи** (валы, подшипники, муфты и др.).

# Требования к машинам и деталям

В соответствии с современными тенденциями к большинству проектируемых машин предъявляют следующие требования:

- высокая производительность;
- экономичность производства и эксплуатации;
- гарантированный срок службы;
- удобство и безопасность обслуживания;
- небольшие габарит и масса;
- транспортабельность;
- унифицированность;
- технологичность;
- эргономичность;
- дизайн.

Одним из главных требований, предъявляемых к машинам и их деталям, является *технологичность конструкции*, которая значительно влияет на стоимость машины. Технологичной называют такую конструкцию, которая характерна минимальными затратами при производстве. Технологичность конструкции характеризуется: применением в новой машине деталей с минимальной механической обработкой (при этом широко используются штамповка, точное литье, фасонный прокат, сварка); унификацией данной конструкции (т. е. применением одинаковых деталей и узлов); максимальным применением стандартных конструктивных элементов деталей (резьбы, канавок, фасок и др.).

# Критерии работоспособности и расчета деталей машин

прочность, жесткость, износостойкость, виброустойчивость, теплостойкость, надежность.

**Прочность** – способность детали сопротивляться разрушению или возникновению пластических деформаций под действием приложенных к ней нагрузок

**Жесткостью** называют способность детали сопротивляться изменению формы и размеров под нагрузкой.

**Износостойкость** – способность детали хранить необходимые размеры в течение заданного срока службы.

**Виброустойчивостью** называют способность конструкции работать в нужном диапазоне режимов, достаточно далеких от области недопустимых колебаний.

**Теплостойкостью** называют способность конструкции работать в пределах заданных температур в течение заданного срока службы.

**Надежностью** называется свойство изделия выполнять заданные функции с сохранением эксплуатационных показателей в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки (в часах, километрах или других единицах).

## Проектный и проверочный расчеты

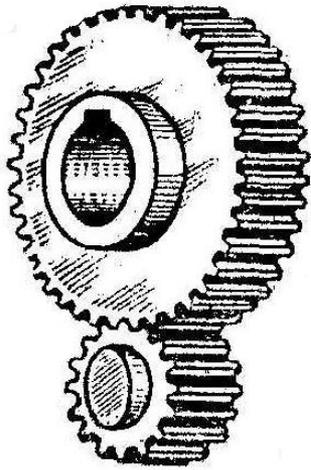
**Проектным расчетом** называют определение размеров детали по формулам, соответствующим главному критерию работоспособности (прочности, жесткости, износостойкости и др.). *Этот расчет применяют в тех случаях, когда размеры конструкции заранее не известны.* Проектные расчеты основаны на ряде допущений и выполняются как предварительные.

**Проверочным расчетом** называется определение фактических характеристик главного критерия работоспособности детали и сравнение их с допускаемыми значениями. При проверочном расчете определяют фактические (расчетные) напряжения и коэффициенты: запаса прочности, действительные прогибы и углы наклона сечений, температуру и т. д.

*Проверочный расчет является уточненным, его производят, когда форма и размеры детали известны из проектного расчета или приняты конструктивно.*

Расчет и конструирование органически связаны.

**Конструированием** называется творческий процесс создания механизма или машины в чертежах на основе проектных и проверочных расчетов.



# ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ

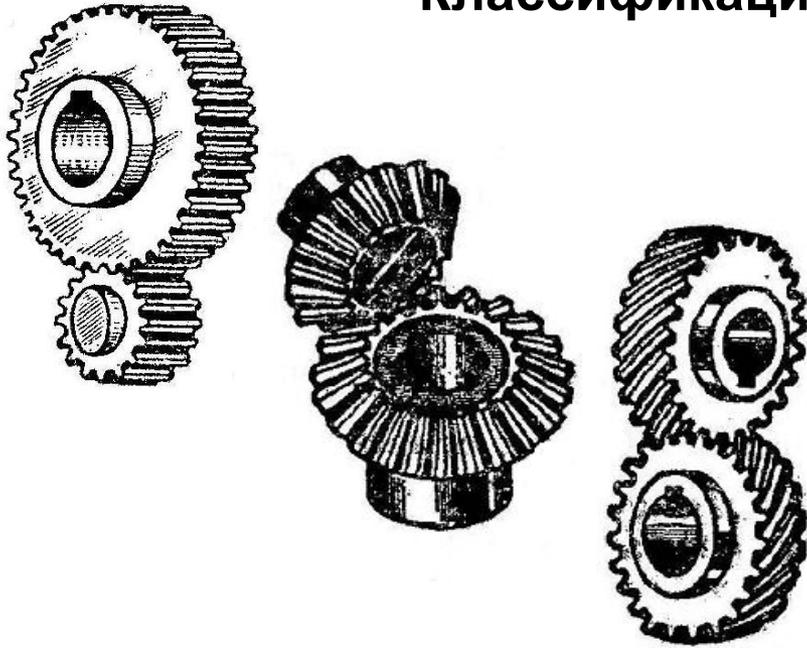
В зубчатой передаче движение передается с помощью зацепления пары зубчатых колес. Меньшее зубчатое колесо принято называть шестерней, большее — колесом. Термин зубчатое колесо относится как к шестерне, так и к колесу.

Зубчатые передачи — самый распространенный вид механических передач, так как могут надежно передавать мощности от долей до десятков тысяч киловатт при окружных скоростях до 150 м/с. Зубчатые передачи широко применяют во всех отраслях машиностроения и приборостроения.

**Достоинства:** 1) высокая надежность работы в широком диапазоне нагрузок и скоростей; 2) малые габариты; 3) большая долговечность; 4) высокий КПД; 5) сравнительно малые нагрузки на валы и подшипники; 6) постоянство передаточного числа; 7) простота обслуживания.

**Недостатки:** 1) относительно высокие требования к точности изготовления и монтажа; 2) шум при больших скоростях.

## Классификация зубчатых передач



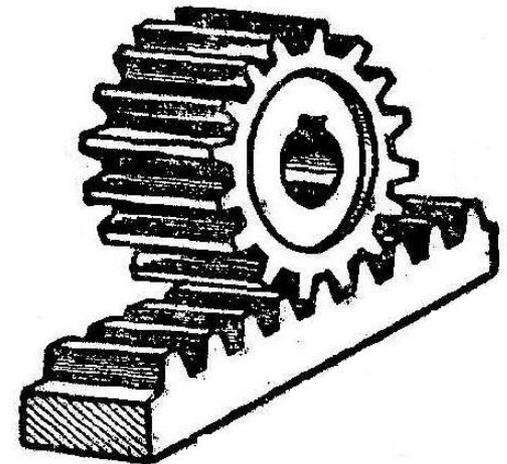
В зависимости от взаимного расположения геометрических осей валов зубчатые передачи бывают:

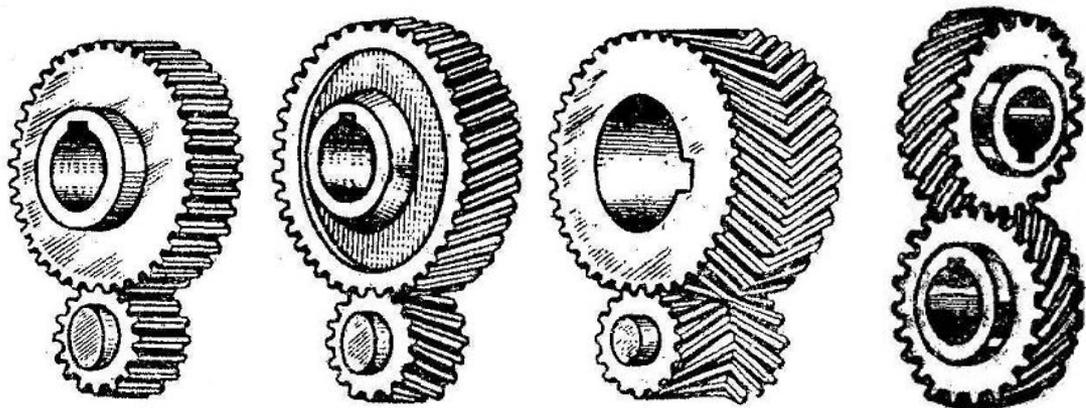
*цилиндрические* — при параллельных осях;

*конические* — при пересекающихся осях;

*винтовые* — при скрещивающихся осях.

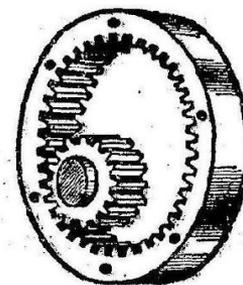
Для преобразования вращательного движения в поступательное и наоборот применяют *реечную* передачу, которая является частным случаем цилиндрической зубчатой передачи. Рейку рассматривают как колесо, диаметр которого равен бесконечности.





В зависимости от расположения зубьев на ободу колеса различают передачи: *прямозубые, косозубые, шевронные и с круговыми зубьями.*

В зависимости от взаимного расположения колес зубчатые передачи бывают *внешнего и внутреннего* зацепления.

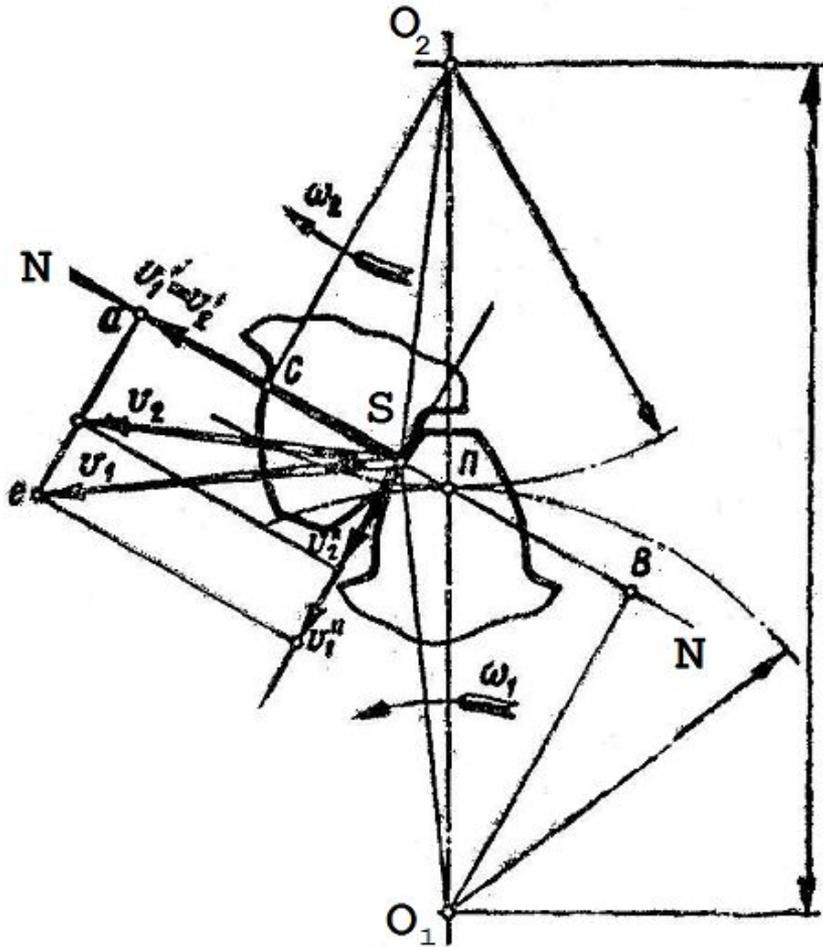


В зависимости от конструктивного исполнения различают *открытые* и *закрытые* зубчатые передачи. В открытых передачах зубья колес работают всухую или периодически смазываются пластичным смазочным материалом и не защищены от влияния внешней среды. Закрытые передачи помещаются в пыле- и влагонепроницаемые корпуса (картеры) и работают в масляной ванне.

В зависимости от формы профиля зуба передачи бывают: *с зацеплением Новикова, циклоидальные, эвольвентные.*

В 1954 г. М. Л. Новиков предложил принципиально новое зацепление, в котором профиль зуба очерчен дугами окружностей. Это зацепление возможно лишь при косых зубьях. Циклоидальное зацепление в настоящее время сохранилось в приборах и часах. В современном машиностроении широко применяют эвольвентное зацепление.

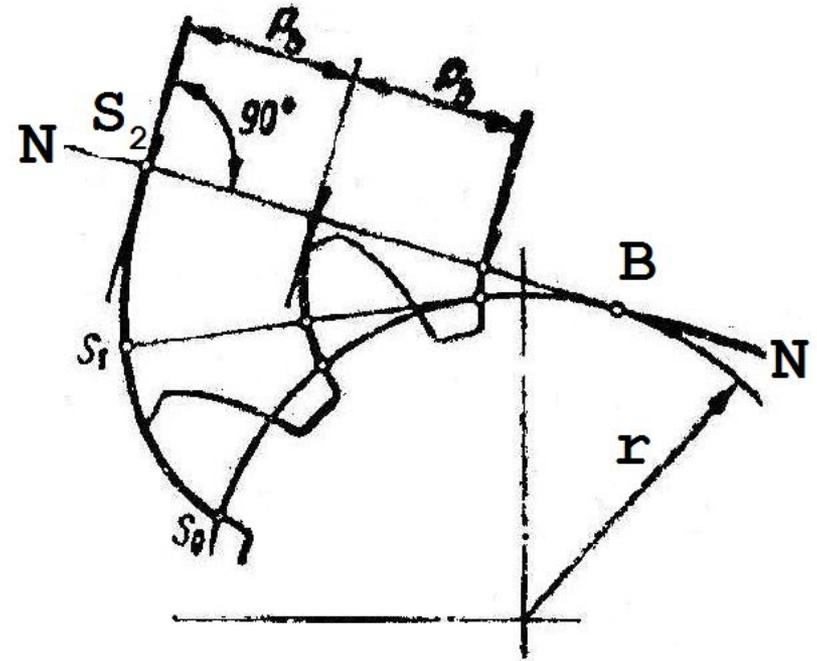
## Основная теорема зацепления



Для обеспечения постоянного передаточного числа зубчатых колес профили их зубьев должны очерчиваться по кривым, у которых общая нормаль  $NN$ , проведенная через точку касания  $S$  профилей, делит расстояние между центрами  $O_1$  и  $O_2$  на части, обратно пропорциональные угловым скоростям.

## Эвольвента

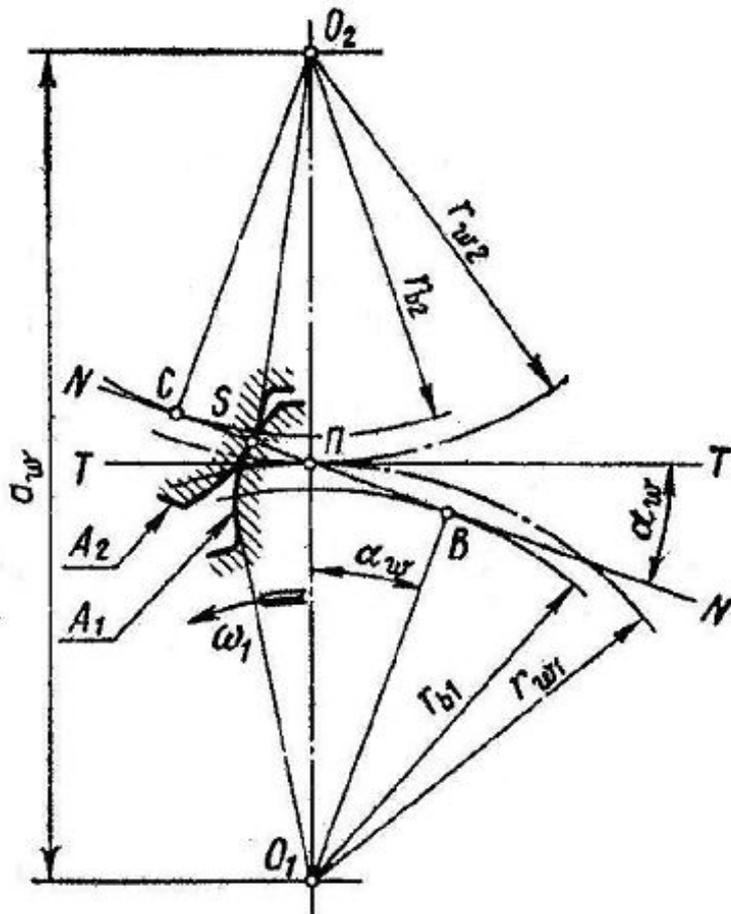
Из множества кривых, удовлетворяющих требованиям основной теоремы зацепления, практическое применение в современном машиностроении получила эвольвента окружности, которая: а) позволяет сравнительно просто и точно получить профиль зуба в процессе нарезания; б) без нарушения правильности зацепления допускает некоторое изменение межосевого расстояния (это изменение может возникнуть в результате неточностей изготовления и сборки).



**Эвольвентой** окружности называют кривую, которую описывает точка  $S_2$  прямой  $NN$ , перекатываемой без скольжения по окружности радиуса  $r$ . Эта окружность называется **эволютой** или основной окружностью, а перекатываемая прямая  $NN$  — производящей прямой. Характер эвольвентного зубчатого зацепления определяется свойствами эвольвенты: производящая прямая  $NN$  является одновременно касательной к основной окружности и нормалью ко всем производимым ею эвольвентам; две эвольвенты одной и той же основной окружности эквидистантны; с увеличением радиуса  $r$  основной окружности эвольвента становится более полой и при  $r \rightarrow \infty$  обращается в прямую; радиус кривизны эвольвенты в точке  $S_2$  равен длине дуги  $S_2B$  основной окружности. Центр кривизны эвольвенты в данной точке находится на основной окружности.

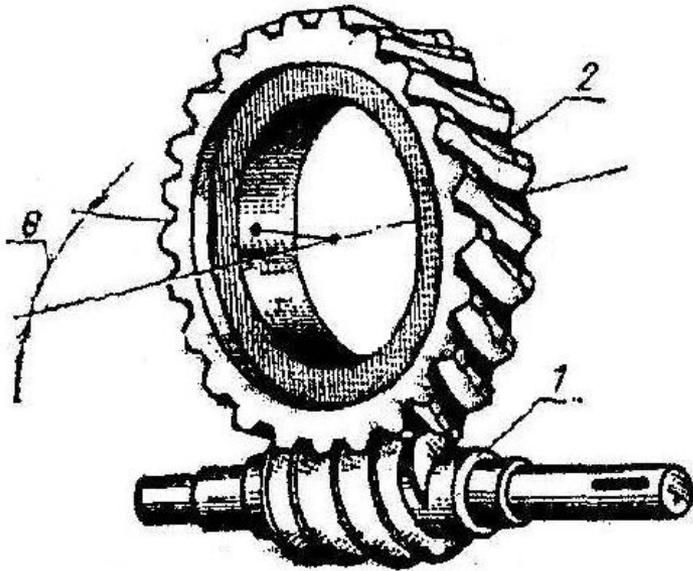
## Эвольвентное зацепление

Построенные профили – сопряженные, так как, касаясь в точке  $S$ , они имеют общую нормаль  $NN$ . Эта нормаль касается обеих основных окружностей и является производящей прямой эвольвент обеих профилей.



При вращении колес точка зацепления  $S$  эвольвентных профилей перемещается по общей нормали  $NN$  — геометрическому месту точек зацепления сопряженных профилей, и называется линией зацепления. Линия зацепления  $NN$  является одновременно линией давления, так как сила давления профиля зуба шестерни на профиль зуба колеса (в предположении отсутствия сил трения) действует по общей нормали  $NN$  к обоим профилям.

# ЧЕРВЯЧНЫЕ ПЕРЕДАЧИ

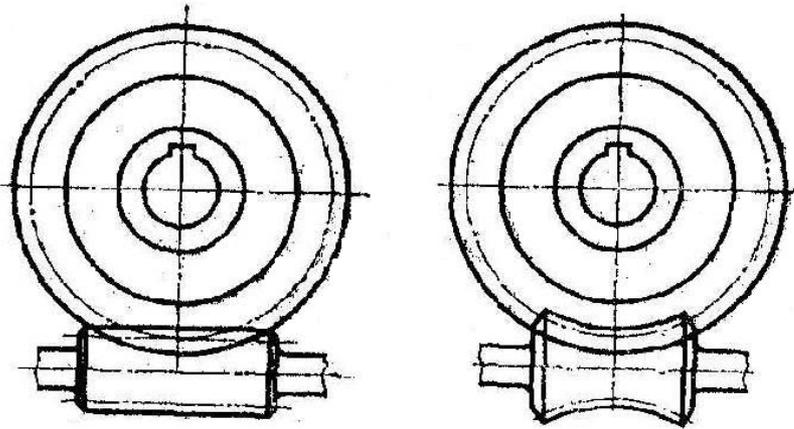


Червячные передачи применяют для передачи вращательного движения между валами, у которых угол скрещивания осей обычно составляет  $90^\circ$ . В большинстве случаев ведущим является червяк, т. е. короткий винт с трапецеидальной или близкой к ней резьбой. Для облегчения тела червяка венец червячного колеса имеет зубья дугообразной формы, что увеличивает длину контактных линий в зоне зацепления.

**Достоинства** червячных передач: 1) плавность и бесшумность работы; 2) компактность и сравнительно небольшая масса конструкции; 3) возможность большого редуцирования, т. е. получения больших передаточных чисел (в отдельных случаях в несиловых передачах до 1000); 4) возможность получения самотормозящей передачи, т. е. допускающей передачу движения только от червяка к колесу. Самоторможение червячной передачи позволяет выполнить механизм без тормозного устройства, препятствующего обратному вращению колеса.

**Недостатки:** 1) сравнительно низкий КПД вследствие скольжения витков червяка по зубьям колеса; 2) значительное выделение теплоты в зоне зацепления червяка с колесом; 3) необходимость применения для венцов червячных колес дефицитных антифрикционных материалов; 4) повышенное изнашивание и склонность к заеданию.

## Классификация червячных передач



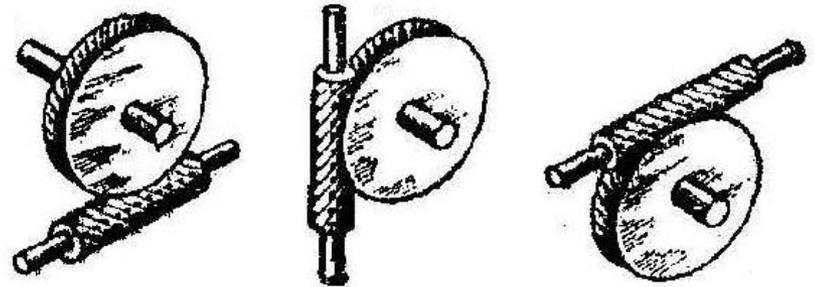
В зависимости от формы внешней поверхности червяка передачи бывают с *циклическим* или с *глобоидным* червяком. Глобоидная передача имеет повышенный КПД, более высокую несущую способность, но сложна в изготовлении и очень чувствительна к осевому смещению червяка, вызванному изнашиванием подшипников.

В зависимости от направления линии витка червяка червячные передачи бывают с *правым* и *левым* направлением линии витка.

В зависимости от числа витков (заходов резьбы) червяка передачи бывают с *одновитковым* или с *многовитковым* червяком.

В зависимости от расположения червяка относительно колеса передачи бывают с *нижним*, *боковым* и *верхним* червяками.

Чаще всего расположение червяка диктуется условиями компоновки изделия.



В зависимости от формы винтовой поверхности резьбы цилиндрического червяка передачи бывают с *архимедовым, конволютным и эвольвентным* червяками. Каждый из них требует особого способа нарезания.

Практика показала, что при одинаковом качестве изготовления форма профиля нарезки червяка мало влияет на работоспособность передачи. Выбор профиля нарезки червяка зависит от способа изготовления и связан также с формой инструмента для нарезания червячного колеса.

Основными способами изготовления червяков являются:  
нарезание резцом на токарно-винторезном станке — способ малопроизводительный, но точный;  
нарезание модульной фрезой на резьбофрезерном станке — способ более производительный.

Работоспособность червячной передачи зависит от твердости и шероховатости винтовой поверхности червяка, поэтому после нарезания и термообработки червяки шлифуют, а в отдельных случаях полируют.

Червячные колеса чаще всего нарезают червячными фрезами, причем червячная фреза должна представлять копию червяка, с которым зацепляется червячное колесо. При нарезании заготовка колеса и фреза совершают такое же взаимное движение, какое имеют червяк и червячное колесо при работе.

# РЕДУКТОРЫ

## Общие сведения

Редуктором называют механизм, состоящий из зубчатых или червячных передач, выполненный в виде отдельного агрегата и служащий для передачи вращения от вала двигателя к валу рабочей машины. Кинематическая схема привода может включать, помимо редуктора, открытые зубчатые передачи, цепные или ременные передачи.

Назначение редуктора — понижение угловой скорости и соответственно повышение вращающего момента ведомого вала по сравнению с ведущим. Механизмы для повышения угловой скорости, выполненные в виде отдельных агрегатов, называют *ускорителями* или *мультипликаторами*.

Редуктор состоит из корпуса (литого чугунного или сварного стального), в котором помещают элементы передачи — зубчатые колеса, валы, подшипники и т. д. В отдельных случаях в корпусе редуктора размещают также устройства для смазывания зацеплений и подшипников (например, внутри корпуса редуктора может быть помещен шестеренный масляный насос) или устройства для охлаждения (например, змеевик с охлаждающей водой в корпусе червячного редуктора).

# Классификация редукторов

Редукторы классифицируют по следующим основным признакам:

типу передачи (зубчатые, червячные или зубчато-червячные);

числу ступеней (одноступенчатые, двухступенчатые и т. д.);

типу зубчатых колес (цилиндрические, конические, коническо-цилиндрические и т. д.);

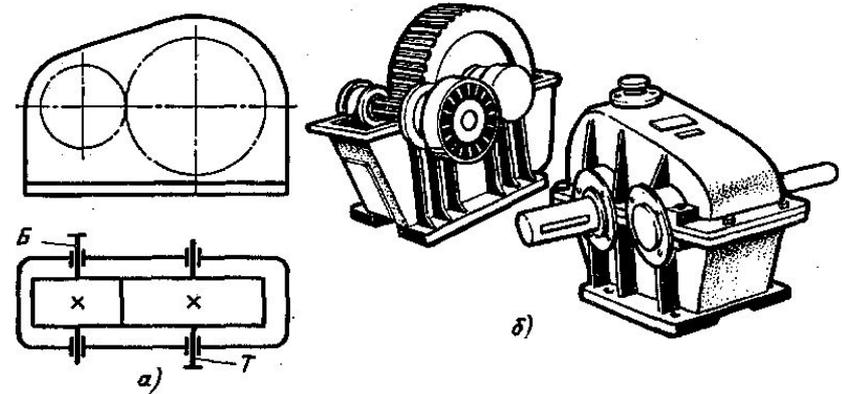
относительному расположению валов редуктора в пространстве (горизонтальные, вертикальные);

особенностям кинематической схемы (развернутая, соосная, с раздвоенной ступенью и т. д.).

# Основные типы редукторов

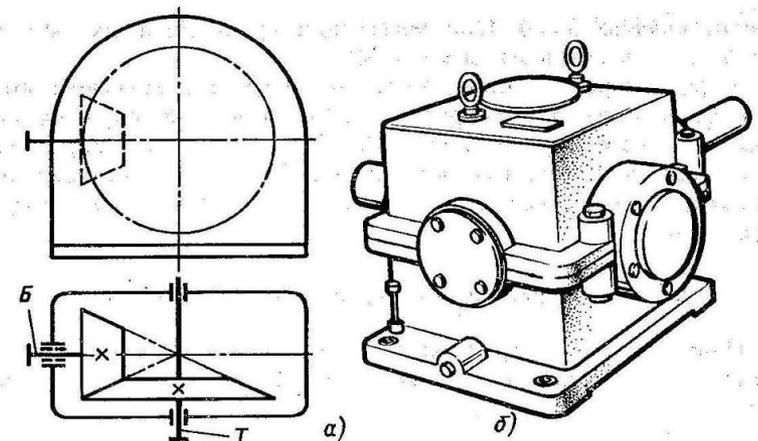
## Одноступенчатые цилиндрические редукторы

Из редукторов рассматриваемого типа наиболее распространены горизонтальные. Как горизонтальные, так и вертикальные редукторы могут иметь колеса с прямыми, косыми или шевронными зубьями. Корпуса чаще выполняют литыми чугунами, реже — сварными стальными. При серийном производстве целесообразно применять литые корпуса. Валы монтируют на подшипниках качения или скольжения. Последние обычно применяют в тяжелых редукторах.



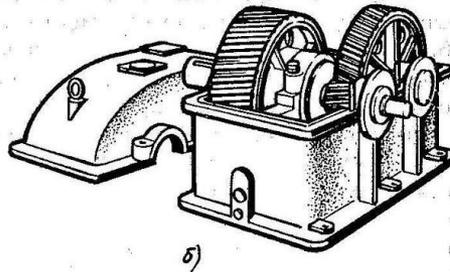
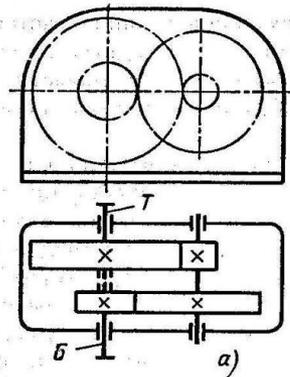
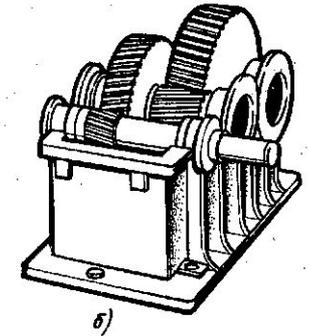
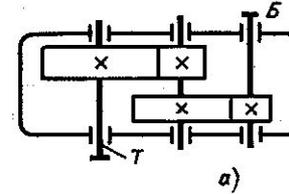
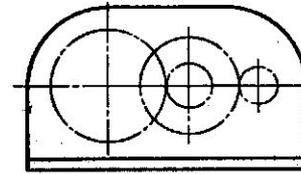
## Одноступенчатые конические редукторы

У редукторов с коническими прямозубыми колесами допустимая окружная скорость (по делительной окружности среднего диаметра) не более 5 м/с. При более высоких скоростях рекомендуют применять конические колеса с круговыми зубьями, обеспечивающими более плавное зацепление и большую несущую способность.



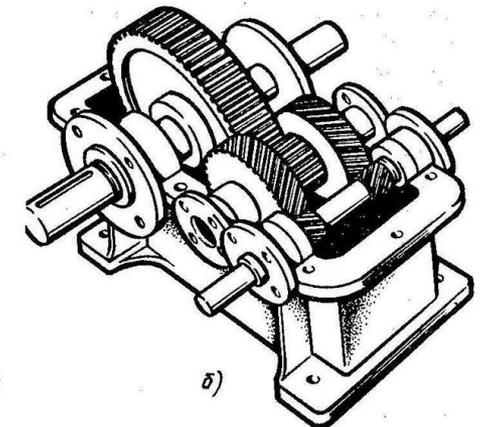
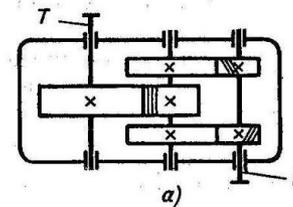
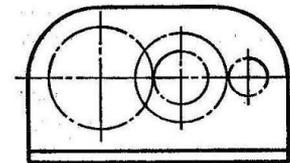
# Двухступенчатые цилиндрические редукторы

Наиболее распространены двухступенчатые горизонтальные редукторы, выполненные по развернутой схеме. Эти редукторы отличаются простотой, но из-за несимметричного расположения колес на валах повышается концентрация нагрузки по длине зуба. Поэтому в этих редукторах следует применять жесткие валы.



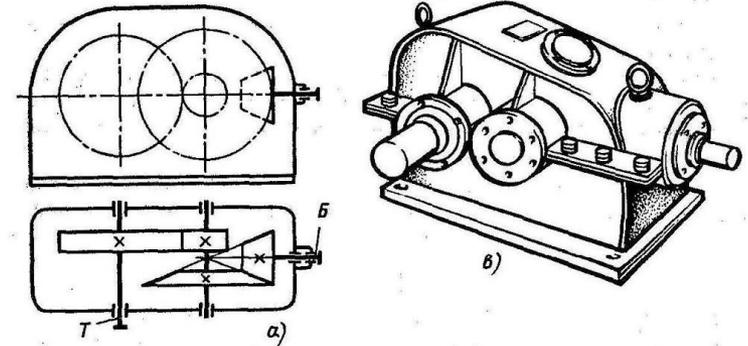
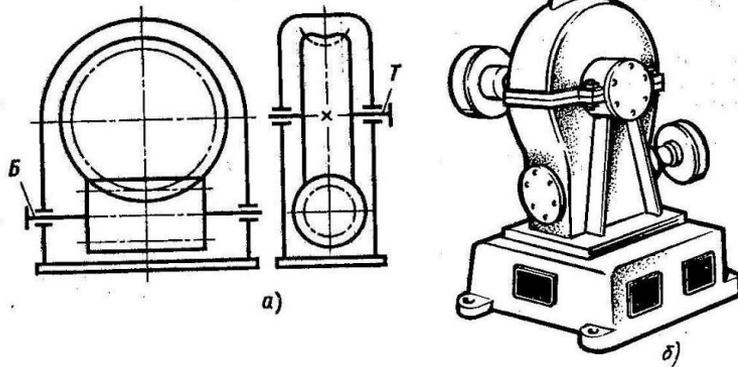
Соосная схема позволяет получить меньшие габариты по длине; это ее основное преимущество. В соосных редукторах быстроходная ступень зачастую недогружена так как силы, возникающие в зацеплении колес тихоходной ступени, значительно больше, чем в быстроходной, а межосевые расстояния ступеней одинаковы. Указанное обстоятельство является одним из основных недостатков соосных редукторов.

При раздвоенной быстроходной (или тихоходной) ступени колеса расположены симметрично относительно опор, что приводит к меньшей концентрации нагрузки по длине зубьев, чем при применении обычной развернутой или соосной схемы. Это позволяет иметь в рассматриваемом случае менее жесткие валы.



## Коническо-цилиндрические редукторы

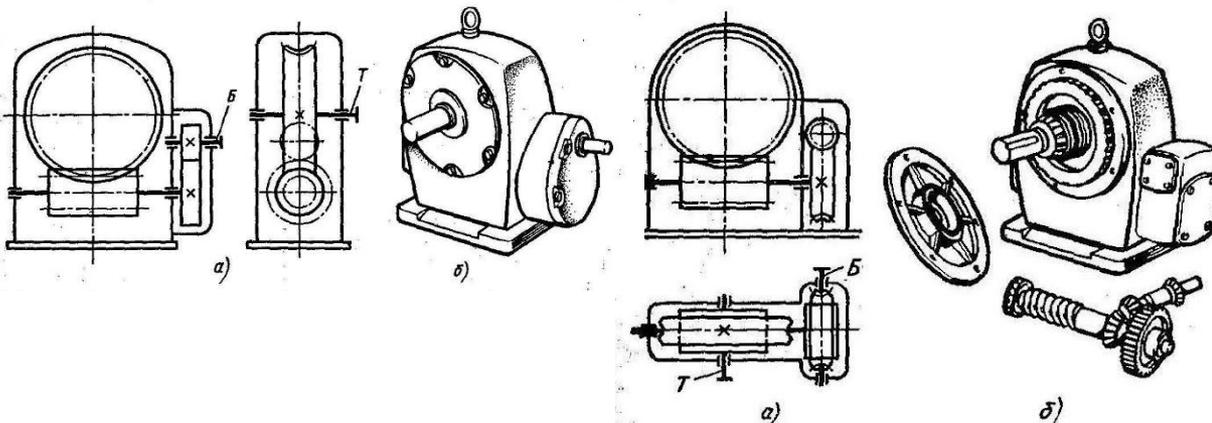
В двухступенчатых коническо-цилиндрических редукторах коническая пара может иметь прямые, косые или криволинейные зубья. Цилиндрическая пара также может быть либо прямозубой, либо косозубой.



## Червячные редукторы

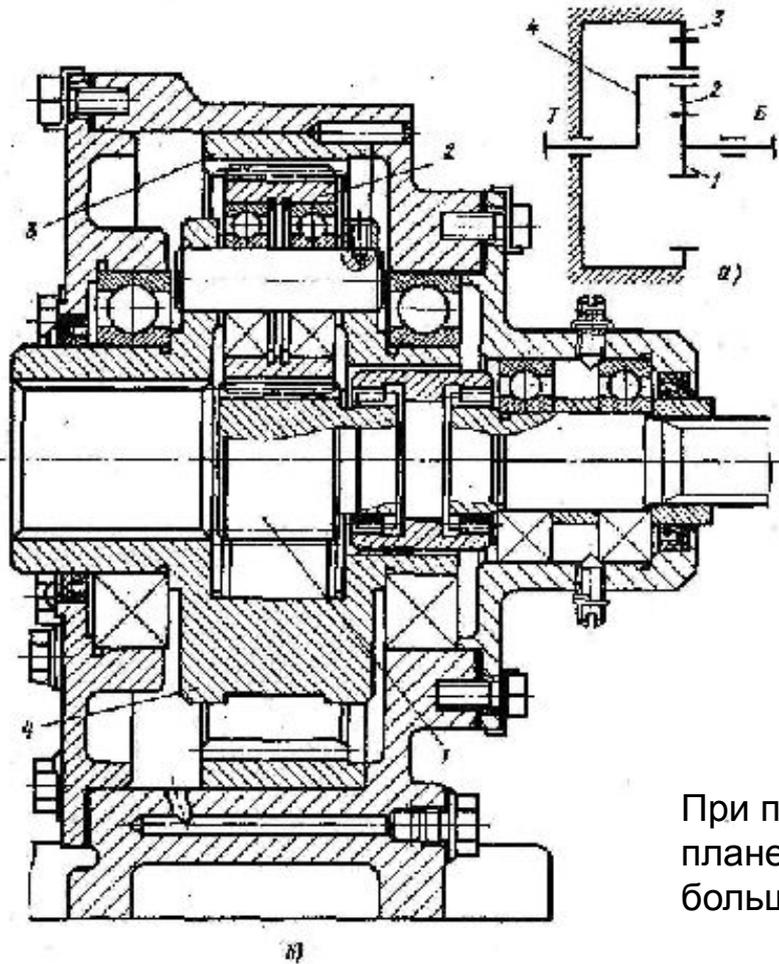
Так как КПД червячных редукторов невысок, то для передачи больших мощностей и в установках, работающих непрерывно, проектировать их нецелесообразно. Практически червячные редукторы применяют для передачи мощности, как правило, до 45 кВт и в виде исключения до 150 кВт.

## Зубчато-червячные и двухступенчатые червячные редукторы

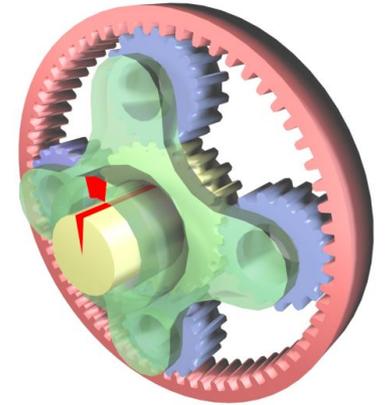


Зубчато-червячные и двухступенчатые червячные редукторы имеют большие передаточные числа: до 150 и 500 соответственно.

# Планетарные и волновые редукторы



На рисунке показан одноступенчатый **планетарный редуктор**, в состав которого входят солнечное колесо 1, сателлиты 2 и корончатое колесо 3, неподвижно закрепленное в корпусе.



Сателлиты совершают сложное движение: они обкатываются вокруг солнечного колеса и вращаются внутри неподвижного корончатого колеса (некоторая аналогия с движением планет дала название этим передачам). Оси сателлитов установлены в водиле 4, геометрическая ось которого совпадает с геометрическими осями центральных колес — солнечного и корончатого.

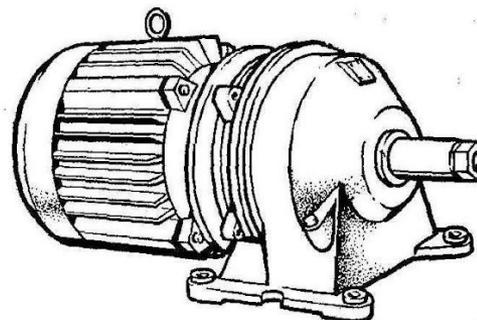
При последовательном соединении нескольких простых планетарных передач можно получить редуктор с большим передаточным отношением.

**Волновые передачи** можно рассматривать как разновидность планетарных передач, имеющих гибкое промежуточное колесо, деформируемое при передаче вращающего момента.

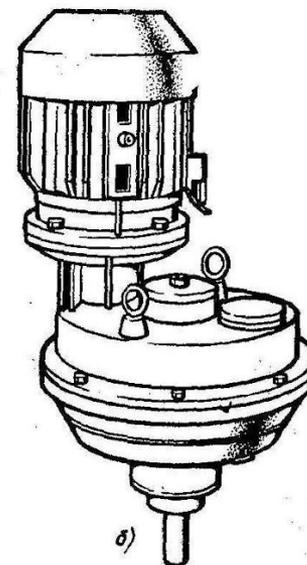
## Мотор-редукторы

Мотор-редуктор — это агрегат, совмещающий в одном корпусе электродвигатель и редуктор. Последнее обстоятельство позволяет добиваться большой точности расположения вала редуктора относительно вала электродвигателя и уменьшает число деталей привода.

Чаще встречаются мотор-редукторы с зубчатыми передачами обыкновенными и планетарными.

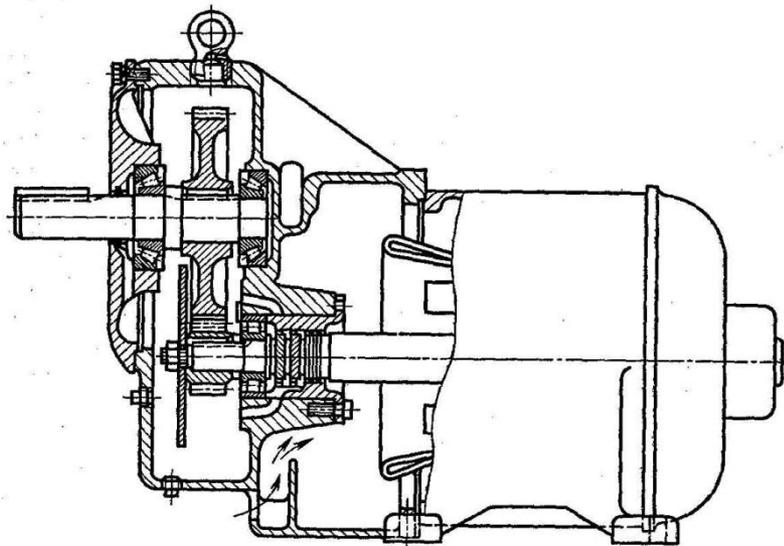


a)



b)

Горизонтальный и вертикальный мотор-редукторы



Мотор-редуктор с одноступенчатой зубчатой цилиндрической передачей

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !**