

1.1. Классификация машин по функциональному назначению

Машина – это устройство, выполняющее *механические движения* для преобразования энергии, материалов и информации с целью замены или облегчения физического и умственного труда человека.

Если указанные преобразования происходят без непосредственного участия человека, это *машина-автомат*.

В зависимости от основного назначения различают энергетические, технологические, транспортные и информационные машины.

Энергетические машины предназначены для преобразования любого вида энергии в механическую и наоборот, например, электродвигатели, двигатели внутреннего сгорания, турбины, паровые машины.

Технологические машины изменяют размеры, форму, свойства или состояния материалов, например, металлообрабатывающие станки, упаковочные машины.

В *транспортных машинах* под материалом понимают перемещаемый предмет. Примеры транспортных машин: подъемники, краны, транспортеры, автомобили.

Информационные машины предназначены для получения и преобразования информации (примером являются механические счетные устройства).

Большинство современных машин создают по схеме на рис.1.1: двигатель (М) - передаточный механизм (ПМ) - исполнительный механизм (ИМ).

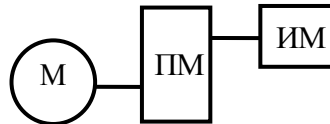


Рис. 1.1. Схема машины

Двигатель приводит машину в движение, например, электродвигатель.

Исполнительный механизм производит движение, для осуществления которого предназначена машина. Например, схват манипулятора – это исполнительный механизм робота, который может удерживать инструмент (на рис. 1.2 показан *рычажный захват*).

Передаточный механизм служит для преобразования и передачи механического движения от двигателя к исполнительному механизму. Например, на рис. 1.3 показан манипулятор, в основе которого *шарнирно-рычажный механизм*.

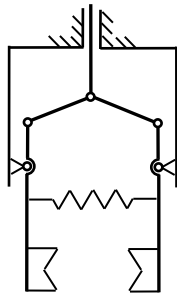


Рис. 1.2. Схема рычажного захвата

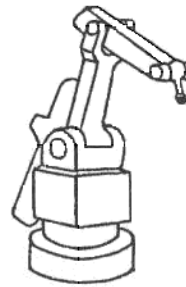


Рис. 1.3. Манипулятор

1.2. Основные виды передаточных механизмов

Передаточные механизмы подразделяют на *передачи вращения* и *механизмы возвратно-поступательного и колебательного движения*.

1.2.1. Передачи вращения

Рассмотрим передаточные механизмы, предназначенные для преобразования параметров вращательного движения: изменения скорости и направления движения. Такие механизмы называют *передачами вращения* или *механическими передачами*.

По принципу работы передачи подразделяют на

- передачи *зацеплением* с непосредственным контактом (зубчатые и червячные) и с гибкой связью (цепные, зубчато-ременные);

- передачи *трением* с непосредственным контактом поверхностей (фрикционные) и с гибкой связью (ременные).

Основными кинематическими характеристиками передач вращения являются угловые скорости ω_1, ω_2 .

Отношение угловых скоростей ведущего звена к ведомому¹ называется передаточным отношением:

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \text{ или } i_{21} = \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (1.1)$$

Зубчатая передача. В качестве примера на рис. 1.4 приведена *цилиндрическая зубчатая передача*, в состав которой входят два зубчатых колеса 1 и 2; 3 и 4 – это валы, на которых установлены колеса. На рис. 1.4, в изображена кинематическая схема зубчатой передачи.

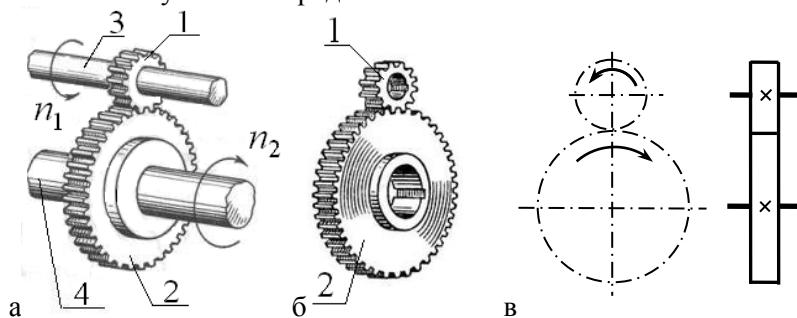


Рис. 1.4. Зубчатая передача

Передача вращения осуществляется *давлением* зуба одного колеса на зуб другого. Колесо 1, число зубьев которого меньше, называется *шестерней*.

Если вращение передается зубчатой передачей между *параллельными осями* (см. рис. 1.4), *передаточное отношение*

$$i_{12} = \pm \frac{\omega_1}{\omega_2} \text{ или } i_{21} = \pm \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad (1.2)$$

где знак «+» – если передача не изменяет направление вращения, и знак «-» – если передача изменяет направление вращения на противоположное.

Зубчатая передача на рис. 1.4 называется *передачей внешнего зацепления*. Она изменяет направление вращения на противоположное, поэтому $i_{12} < 0, i_{21} < 0$.

Пусть *угловая скорость* шестерни 1 на рис. 1.4 равна $\omega_1 [c^{-1}]$, а зубчатое колесо 2 вращается с *угловой скоростью* $\omega_2 [c^{-1}]$. Тогда передаточное отношение этой зубчатой передачи

$$i_{12} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} \text{ или } i_{21} = -\frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (1.3)$$

Если известны *частоты вращения* n_1 и n_2 валов 3 и 4, как показано на рис. 1.4, а (частота вращения вала обычно измеряется в количестве оборотов, которое вал совершает за одну минуту, об/мин или мин⁻¹), то, учитывая соотношение:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}, \quad (1.4)$$

получим передаточное отношение в виде:

$$i_{12} = -\frac{n_1}{n_2} \text{ или } i_{21} = -\frac{n_2}{n_1}. \quad (1.5)$$

Если известно *число зубьев* z каждого колеса, то передаточное отношение передачи на рис. 1.4

$$i_{12} = -\frac{z_2}{z_1} \text{ или } i_{21} = -\frac{z_1}{z_2}, \quad (1.6)$$

где z_1 – число зубьев шестерни (поз.1 на рис. 1.4, а), z_2 – число зубьев колеса (поз. 2 на рис. 1.4, а).

На рис. 1.5 показана зубчатая передача *внутреннего зацепления*, которая не изменяет направление враще-

¹ Ведущим (входным) называют звено, связанное с двигателем, которому двигатель сообщает движение. Ведомым (выходным) называют звено, совершающее движение, для выполнения которого предназначен механизм.

ния ($i_{12} > 0, i_{21} > 0$, см. формулы (1.2)).

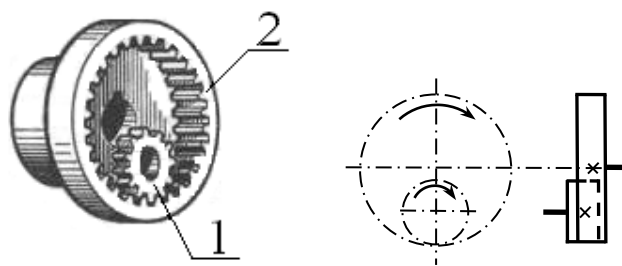


Рис. 1.5. Зубчатая передача внутреннего зацепления

Если вращение передается между *непараллельными осями*, передаточное отношение определяют по формулам (1.1).

Зубчатые передачи – самые распространенные механические передачи.

Фрикционная передача. На рис. 1.6, а приведена *фрикционная передача* с постоянным передаточным отношением, в состав которой входят *два катка* 1 и 2, прижатых друг к другу. На рис. 1.6, б показана кинематическая схема такой передачи.

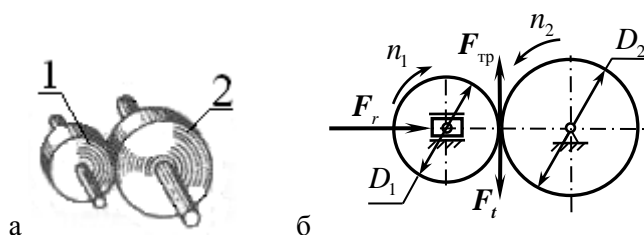


Рис. 1.6. Фрикционная передача

В этом механизме для передачи движения используют *силы трения* $F_{тр}$, для их создания катки прижимают друг к другу с силой F_r (см. рис. 1.6, б).

Передаточное отношение фрикционной передачи:

$$i_{12} = i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} \approx \frac{D_2}{D_1}, \quad (1.7)$$

где D_1 и D_2 – диаметры меньшего и большего катков (см. рис. 1.6, б); знак “ \approx ”, так как неизбежно проскальзывание катков.

С учетом скольжения передаточное отношение

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_2}{D_1(1-\epsilon)}, \quad (1.8)$$

где коэффициент упругого скольжения ϵ зависит от конструкции передачи, упругих свойств материалов катков, величины нагрузки и лежит в пределах от 0,005 до 0,03.

Наибольшее применение фрикционные передачи получили в *вариаторах*¹. На рис. 1.7 показан простейший лобовой вариатор.

Основной кинематической характеристикой вариатора является *диапазон регулирования передаточного отношения*²:

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = \frac{i_{\max}}{i_{\min}}. \quad (1.9).$$

¹ Вариатор – это механическая передача, способная плавно менять передаточное отношение в некотором диапазоне регулирования.

² Диапазон регулирования угловой скорости ведомого вала при постоянной угловой скорости ведущего вала.

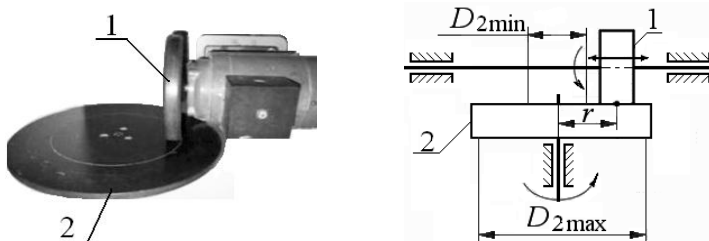


Рис. 1.7. Лобовой фрикционный вариатор

Для вариатора на рис. 1.7 диапазон регулирования (см. формулы (1.8) и (1.9))

$$Д = \frac{i_{\max}}{i_{\min}} = \frac{D_{2\max}}{D_{2\min}} \leq 3. \quad (1.10)$$

Принцип фрикционной передачи является основой технологического процесса в прокатных станах, основной работы рельсового и безрельсового колёсного транспорта.

Червячная передача. На рис. 1.8, а приведена червячная передача, в состав которой входят червяк 1 и червячное колесо 2, на рис. 1.8, б – ее кинематическая схема.

Червячная передача передает вращение между скрещивающимися осями (см. рис. 1.8, б).

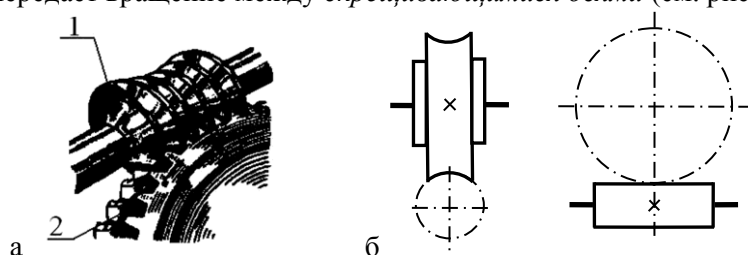


Рис. 1.8. Червячная передача

Передаточное отношение

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (i_{21} = \frac{z_1}{z_2}), \quad (1.11)$$

где z_1 – число витков (винтовых линий, заходов) червяка (поз. 1 на рис. 1.8, а), z_2 – число зубьев червячного колеса (поз. 2 на рис. 1.8, а).

Ремённая передача. На рис. 1.9, а приведена ремённая передача, в состав которой входят два шкива 1 и 2 и ремень (гибкая связь) 3, на рис. 1.9, б – ее кинематическая схема.

Ремённая передача работает так же, как и фрикционная (см. рис. 1.6). Необходимая сила трения создается натяжением ремня.

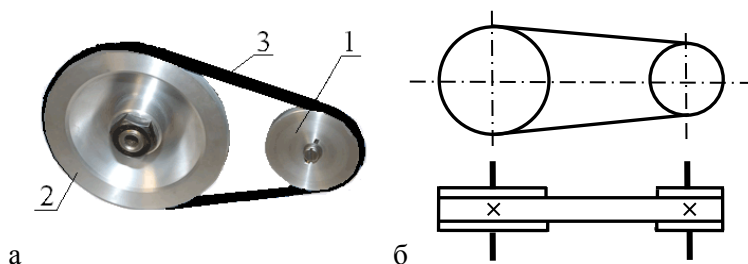


Рис. 1.9. Ремённая передача

Передаточное отношение рассчитывают по формулам 1.7 и 1.8, в которых D_1 и D_2 – диаметры шкивов 1 и 2, коэффициент упругого скольжения $\varepsilon = 0,01 \dots 0,03$.

Ремённая передача – вторая после зубчатой по распространенности среди механических передач.

Цепная передача. На рис. 1.10, а приведена цепная передача, в состав которой входят две звездочки 1 и 2 и цепь (гибкая связь) 3, на рис. 1.10, б – ее кинематическая схема.

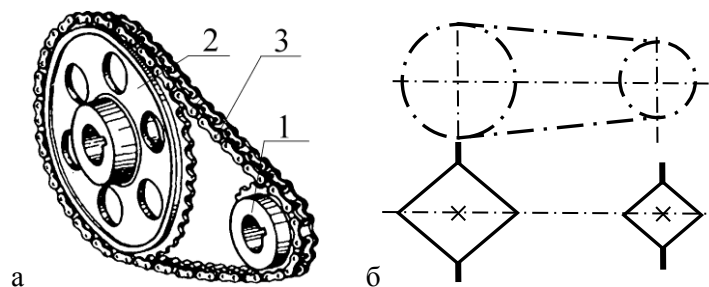


Рис. 1.10. Цепная передача

Среднее передаточное отношение цепной передачи

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (i_{21} = \frac{z_1}{z_2}), \quad (1.12)$$

где z_1 и z_2 – числа зубьев звездочек 1 и 2 (см. рис. 1.10).

1.2.2. Передаточные механизмы возвратно-поступательного и колебательного движения.

Рассмотрим передаточные механизмы, с помощью которых можно преобразовать *вращательное движение в поступательное или колебательное* (и наоборот).

Такие механизмы характеризуются **передаточной функцией** – это первая производная от *функции перемещения*¹ ведомого звена по углу поворота или линейному перемещению ведущего звена.

Рычажные механизмы. Примером рычажного механизма является *шарнирно-рычажный механизм* (см. рис. 1.2).

На рис. 1.11 приведена кинематическая схема кривошипно-ползунного механизма, в состав которого входит *кривошип 1*, *шатун 2* и *ползун 3*.

Этот механизм служит для преобразования вращательного движения кривошипа 1 в возвратно-поступательное движение ползуна 3 (и наоборот).

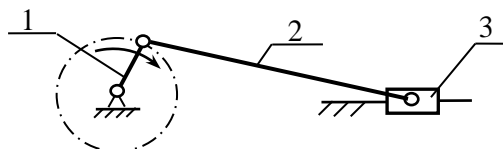


Рис. 1.11. Кривошипно-ползунный механизм

Передаточной функцией является зависимость скорости перемещения ползуна от угловой скорости кривошипа: $v_3=f(\omega_1)$ (и наоборот).

Передача винт-гайка. На рис. 1.12 приведена передача винт-гайка, которая предназначена для преобразования вращательного движения одного звена в поступательное движение другого.

Передаточной функцией является зависимость скорости осевого перемещения гайки от угловой скорости винта: $v_2=f(\omega_1)$.



Рис. 1.12. Передача винт-гайка: 1 – винт, 2 – гайка

Кулачковый механизм. На рис. 1.13 приведен *кулачковый механизм* (в состав которого входят *кулачок 1* и *толкатель 2*) и его кинематическая схема.

¹ Функция перемещения (закон движения ведомого звена) – это функциональная зависимость между перемещениями ведомого и ведущего звеньев механизма.

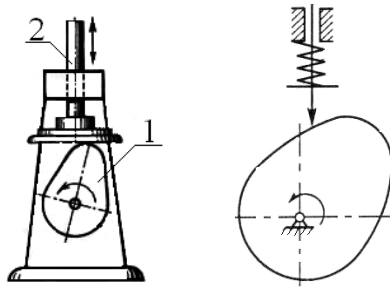


Рис. 1.13. Кулачковый механизм: 1 – кулачок, 2 – толкатель

Передаточной функцией является зависимость скорости осевого перемещения толкателя от угловой скорости кулачка: $v_2=f(\omega_1)$.

В машиностроении широко распространены кулачковые механизмы, преобразующие вращательное движение в возвратно-поступательное или возвратно-качательное: например, для выполнения различных операций в системах управления рабочим циклом технологических машин, станков, двигателей и т.д.¹.

Примеры по темам

Пример 1.

Схема машины дана на рис. 1.1. Частота вращения вала двигателя $n_1=3000$ об/мин. Угловая скорость вращения входного вала исполнительного механизма $\omega_2=2\pi\text{с}^{-1}$. Подобрать червячную передачу, учитывая, что число витков (заходов) z_1 червяка равно одному либо двум. Определить z_1 и z_2 .

Решение.

1. Определим угловую скорость вращения вала двигателя (см. формулу (1.4)):

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{\pi 3000}{30} = 100\pi \text{ с}^{-1}.$$

2. Найдем передаточное отношение передачи вращения (см. формулу (1.1)):

$$i_{12} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50.$$

3. Подберем червячную передачу.

Вариант 1. Если число витков червяка $z_1 = 1$, то число зубьев червячного колеса из формулы (1.11)

$$z_2 = i_{12} z_1 = 50.$$

Вариант 2. Если число витков червяка $z_1 = 2$, то число зубьев червячного колеса

$$z_2 = i_{12} z_1 = 50 \cdot 2 = 100.$$

Пример 2.

Зубчатая передача должна уменьшить частоту вращения вала 4 (см. рис. 1.4) в 3 раза. Определить число зубьев колеса z_2 , если число зубьев шестерни $z_1 = 25$.

Решение.

Число зубьев колеса из формулы (1.6)

$$z_2 = |i_{12}| z_1 = 3 \cdot 25 = 75.$$

Пример 3.

¹В курсе «Теория механизмов и машин» изучают вопросы, связанные с профилированием кулачка.

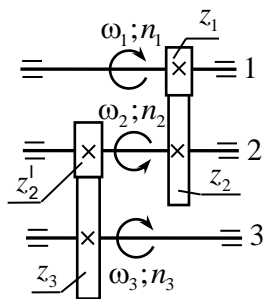


Рис. 1.14. К примеру 3

Определить передаточное отношение механизма, приведенного на рис. 1.14, при заданных числах зубьев колес: $z_1=22$, $z_2=77$, $z_2^1=25$, $z_3=50$. Найти угловую скорость и частоту вращения ведущего вала 1, если вал 3 вращается с частотой $n_3=300$ об/мин.

Решение.

1. Определим передаточное отношение зубчатой передачи, установленной на валах 1 и 2

$$i_{12} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} = -\frac{z_2}{z_1} = -\frac{77}{22} = -3,5.$$

2. Определим передаточное отношение зубчатой передачи, установленной на валах 2 и 3

$$i_{23} = -\frac{\omega_2}{\omega_3} = -\frac{z_4}{z_2^1} = -\frac{50}{25} = -2.$$

3. Передаточное отношение механизма

$$i_{13} = \frac{\omega_1}{\omega_3} = -\frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \left(-\frac{\omega_2}{\omega_3}\right) = i_{12} \cdot i_{23} = 3,5 \cdot 2 = 7.$$

4. Найдем частоту вращения вала 1:

$$n_1 = i_{13} n_3 = 7 \cdot 300 = 2100 \text{ об/мин.}$$

5. Рассчитаем угловую скорость вращения вала 1:

$$\omega_1 = \frac{\pi n_1}{30} = \frac{\pi 2100}{30} \approx 219,8 \text{ с}^{-1}.$$

Ответ: передаточное отношение механизма равно 7, частота вращения вала 1 составляет 2100 об/мин, угловая скорость вращения – $219,8 \text{ с}^{-1}$.

Тест по темам модуля 1

1. Назовите передачу, которая используется в качестве передаточного механизма:

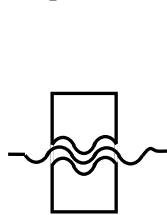


Рис. 1.15

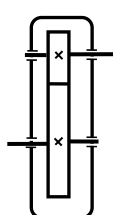


Рис. 1.16

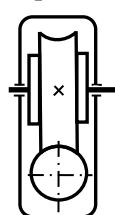


Рис. 1.17

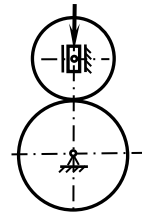


Рис. 1.18

№ рис.	1	2	3	4
1.15	зубчатая	червячная	фрикционная	винт-гайка
1.16	зубчатая	червячная	фрикционная	винт-гайка
1.17	зубчатая	червячная	фрикционная	винт-гайка
1.18	зубчатая	червячная	фрикционная	винт-гайка

2*¹. Определите передаточное отношение зубчатой передачи внешнего зацепления, если числа зубьев колес $z_1=21$ и $z_2=63$.

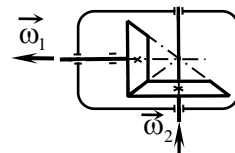
1	2	3	4
3	-3	-1/3	1/3

3. Найдите диапазон регулирования вариатора Д, если $i_{\max} = 3$, $i_{\min} = 2$.

1	2	3	4
1	-1,5	0,66	1,5

¹ Звездочкой (*) здесь и в дальнейших тестах отмечены вопросы, которые имеют более одного правильного ответа.

4*. На рисунке число зубьев шестерни конической пары $z_1 = 26$. Частота вращения вала 1 $n_1 = 1500$ об/мин, угловая скорость вала 2 $\omega_2 = 25\pi \text{ с}^{-1}$. Рассчитайте передаточное отношение механизма. Определите число зубьев колеса.



	1	2	3	4
i_{12}, i_{21}	2	-2	0,5	-0,5
z_2	52	13	52	52

5. Назовите механизм, который используется в качестве передаточного механизма:

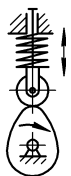


Рис. 1.19



Рис. 1.20

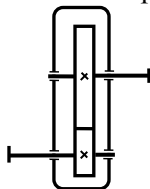


Рис. 1.21

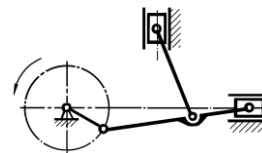


Рис. 1.22

№ рис.	1	2	3	4
1.19	зубчатый	рычажный	цепная передача	кулачковый
1.20	зубчатый	рычажный	цепная передача	кулачковый
1.21	зубчатый	рычажный	цепная передача	кулачковый
1.22	зубчатый	рычажный	цепная передача	кулачковый

6*. Найдите передаточное отношение механизма на рис. 1.20, если $n_1 = 1600$ об/мин, $n_2 = 800$ об/мин.

1	2	3	4
2	-2	-0,5	0,5

7. Механизмом называется устройство, предназначенное для

1	2	3	4
увеличения жесткости конструкции	увеличения прочности конструкции	передачи и преобразования движения	обеспечения неподвижности конструкции

8. Последовательность начала разработки проектно-конструкторской документации:

1	2	3
техническое предложение, техническое задание, эскизный проект.	техническое задание, техническое предложение, эскизный проект.	техническое задание, эскизный проект, техническое предложение.

9. Диаметры колес фрикционной передачи равны 50 мм и 100 мм. Определите передаточное отношение. Коэффициент упругого скольжения $\varepsilon = 0,03$.

1	2	3	4
2,06	-2,06	0,5	2

4.3. Понятие о планетарных передачах

4.3.1. Общие сведения о планетарной передаче

Планетарными называют передачи, содержащие зубчатые колеса с *подвижными* (перемещающимися) *осями*.

На рис. 4.4 и 4.5 показаны кинематические схемы наиболее распространенных зубчатых планетарных передач.

Здесь 1 и 3 – центральные колеса, причем колесо 3 неподвижно; 2 и 2' – колеса с подвижными (перемещающимися в пространстве осями), которые называются *сателлитами*, h – звено, на котором установлены оси сателлитов, называется *водителем*.

Использование в передаче нескольких равномерно расположенных сателлитов (до пяти колес) распределяет передаваемую мощность на несколько потоков и позволяет уравновесить радиальные нагрузки на валы и их опоры.

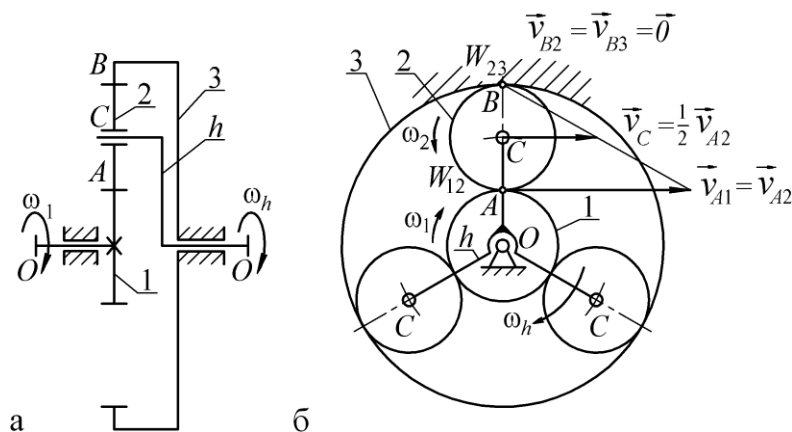


Рис. 4.4. Планетарная передача

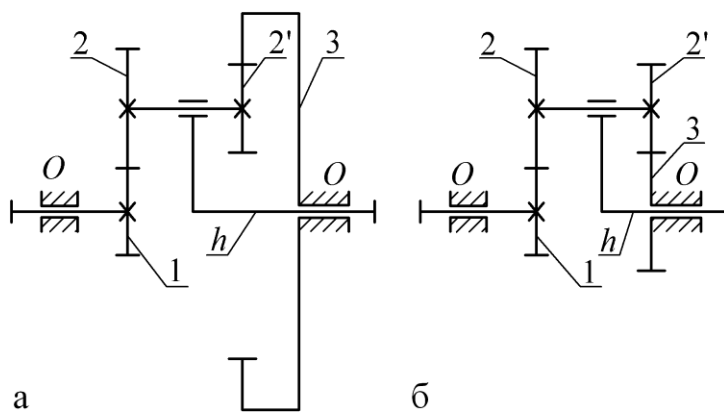


Рис. 4.5. Планетарные передачи

Основные **достоинства** планетарных передач:

- также как и *многоступенчатые передачи*, они обладают *высокими передаточными отношениями* (до 1000 и более);
- их *размеры и масса меньше*, чем у серии зубчатых колес, вследствие *передачи мощности по нескольким потокам*, число которых равно числу сателлитов;
- *малые нагрузки на валы и опоры*.

Основные **недостатки** планетарных передач:

- повышенные требования к точности изготовления деталей;
- специальные требования для обеспечения сборки передач, которые должны быть выполнены при проектировании и сборке;
- при больших передаточных отношениях возможно самоторможение¹.

Многозвенные зубчатые механизмы

4.4. Волновые передачи

4.4.1. Общие сведения о волновой передаче

Волновой называют механическую передачу, в которой *вращение передается вследствие перемещения зоны деформации упругого гибкого звена*. Механические волновые передачи могут быть фрикционными и зубчатыми [5].

Волновая передача на рис. 4.14 представляет собой цилиндрическую передачу внутреннего зацепления, в которой гибкое колесо 1 деформируется *генератором волн h* и входит в зацепление с центральным *жестким колесом 2* в двух зонах. В процессе вращения *генератора волн* зоны зацепления жесткого и гибкого колес перемещаются. По гибкому колесу бежит волна деформации. Отсюда и название передачи – *волновая*.

¹ Понятие о самоторможении планетарных передач см. в работе [7].

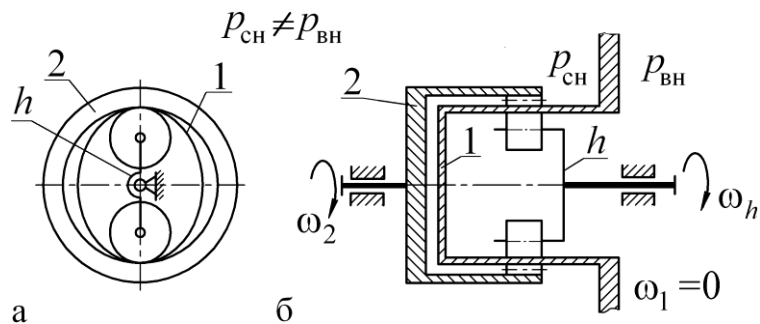


Рис. 4.14. Волновая передача

Основными **достоинствами** волновых передач являются:

- большие передаточные числа;
- плавность работы и малый шум, которые объясняются большим числом одновременно зацепляющихся зубьев (многопарность зацепления в двух зонах) и их постепенным входом в контакт;
- большие вращающие моменты при малых габаритах и массе из-за многопарности зацепления;
- возможность обеспечивать абсолютную герметизацию при передаче движения из одной среды в другую (на рис. 4.14, б давления сред снаружи и внутри различны, $p_{сн} \neq p_{вн}$) без применения уплотнения вращающихся деталей¹.

Основными **недостатками** волновых передач являются:

- сложность изготовления гибкого звена;
- повышенные требования к точности изготовления деталей;
- ограниченные частоты вращения генератора волн, возникновение вибраций.

Волновые передачи применяют в промышленных роботах и манипуляторах, в механизмах с большим передаточным отношением, а также в устройствах с повышенными требованиями к кинематической точности или герметичности.

В одной ступени передаточные отношения волновых зубчатых передач² лежат в диапазоне от 80 до 315.

КПД волновых передач составляет 0,7-0,9 [5] и уменьшается с увеличением передаточного отношения.

¹ Это используют в авиационной, космической и подводной технике. Примером уплотнения подвижных деталей является манжета.

² ГОСТ 26218-94 "Редукторы и мотор-редукторы волновые зубчатые. Параметры и размеры".