

В. В. ЕДУНОВ, А. В. ЕДУНОВ

МЕХАНИКА

Рекомендовано

Научно-методическим советом по механике

Министерства образования и науки Российской Федерации

в качестве учебного пособия для студентов

*высших учебных заведений, обучающихся по немашиностроительным
направлениям и специальностям*



Москва

Издательский центр «Академия»

2010

УДК 514.85(075.8)

ББК 22.2я73

Е345

Рецензенты:

зав. кафедрой «Технология обслуживания транспортных средств»
Санкт-Петербургского государственного университета сервиса и экономики,
д-р техн. наук, проф. *А. А. Капустин*;

зав. кафедрой «Сопротивление материалов и теория упругости» Пензенского
государственного университета архитектуры и строительства, д-р техн. наук,
проф. *С. В. Бакушев*

Едунов В. В.

Е345 **Механика** : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведе-
ний / В. В. Едунов, А. В. Едунов. — М. : Издательский центр
«Академия», 2010. — 352 с.

ISBN 978-5-7695-3988-6

Рассмотрены структура механизмов и особенности движения
материальных тел. Описаны силы, действующие на материальные
тела, звенья механизмов и машин. Изложены основы синтеза ме-
ханизмов и машин, а также узлов и деталей машин.

Для студентов немашиностроительных специальностей выс-
ших учебных заведений.

УДК 514.85(075.8)

ББК 22.2я73

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

© Едунов В. В., Едунов А. В., 2010

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010

ISBN 978-5-7695-3988-6

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

ПРЕДИСЛОВИЕ

Словом «механика» обозначают, как правило, движение в совокупностях материальных тел, сред, человеческих законов, отношений и т.д. Основным смыслом понятия «механика» совпадает с тем смыслом, который придавался ему еще древними греками. Понятием *mechaniké* обозначалась область знаний о перемещениях и взаимодействиях материальных тел в окружающем пространстве. В настоящее время понятие «механика» объединяет огромную область человеческих знаний, связанных по сути и одновременно очень разных вследствие специфики свойств и размеров материальных тел, например механика жидкости (гидравлика), механика газообразной среды (аэромеханика), механика неизменяемых стержневых систем, пластин и оболочек (строительная механика), механика грунта, механика машин, теоретическая механика, небесная механика (астрономия) и т.д.

Трудовая деятельность современного человека редко обходится без использования машин, и это использование наиболее эффективно у специально обученного человека, которому понятно, почему машина в целом имеет присущую ей форму, какова ее внутренняя структура, почему ее отдельные элементы имеют то или иное геометрическое исполнение, как движутся эти элементы, как они связаны между собой и влияют друг на друга, от чего зависит продолжительность их работы.

Процесс изучения машин, как и всего нового, для человека является многоуровневым и в зависимости от свойств материалов, из которых изготовлены материальные тела механической системы, от особенностей соединения их друг с другом и других причин может быть подразделен на уровни, каждому из которых соответствует конкретное представление о материальных телах:

1) материальные тела являются абсолютно жесткими, в процессе работы пренебрежимо мало меняют свою форму и размеры, а соединения их выполнены без зазоров;

2) материальные тела под действием друг друга могут менять свою форму и размеры, т.е. являются деформируемыми;

3) материальные тела соединены друг с другом с определенными зазорами;

4) зазоры в соединениях материальных тел меняются во времени (отдельные части материальных тел изнашиваются) и т. д.

На каждом из таких уровней сложность задач анализа и синтеза механической системы существенно возрастает. Это все должен учесть и преодолеть конструктор-машиностроитель, при необходимости прибегая к экспериментам и созданию опытных образцов изделия. Человек, не создающий машин, а только использующий их в своей деятельности, может ограничиться лишь первым уровнем, наиболее простым, но достаточным для подготовки специалистов немашиностроительных специальностей.

Цель данного учебного пособия, материал которого изложен в соответствии с программой дисциплины «Прикладная механика», — дать студентам немашиностроительных специальностей высших учебных заведений базовую подготовку для осознанного восприятия искусственных систем материальных тел (машин, механизмов, приборов, аппаратов и др.) в процессе дальнейшего изучения специальных учебных дисциплин.

СТРУКТУРА МЕХАНИЗМОВ

1.1. Машины и механизмы

Машины и механизмы образуют наиболее многочисленное семейство изделий, которые производятся человеком. Это напрямую связано с их назначением. Под **машиной** понимают изделие, некоторую совокупность материальных тел, в которой выполняется механическое движение в целях преобразования энергии, информации, формы, структуры и положения других материальных тел или сред в окружающем пространстве. Основное назначение машины — облегчение человеческого труда, повышение его производительности и качества. В соответствии с этим определением различают машины энергетические (например, газовая турбина, электродвигатель); транспортные (например, эскалатор, строительный кран); технологические (например, токарный станок, швейная машина), вычислительные, медико-биологические и др.

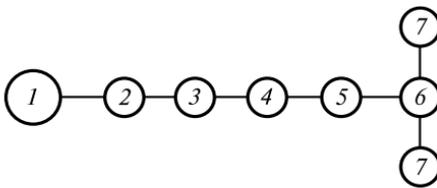
Большинство современных изделий, используемых человеком в качестве машин, являются совокупностью нескольких машин в соответствии с приведенной только что классификацией. Такие машины называют **машинными агрегатами**, **машинными комплексами**. Например, автомобиль как транспортная машина включает в себя несколько машин, в том числе энергетических (двигатель внутреннего сгорания, стартер, генератор постоянно-го тока и т. д.).

Под **механизмом** понимают систему подвижных тел, предназначенную для преобразования движения одного или нескольких твердых тел в требуемое движение других тел.

Машина может включать в себя от одного до нескольких механизмов, например:

энергетическая машина — асинхронный электродвигатель включает в себя один простейший механизм, состоящий из двух материальных тел: неподвижного (статора) и подвижного, совершающего вращательное движение относительно первого (ротора);

Рис. 1.1



автомобиль как машина включает в себя несколько механизмов (рис. 1.1) (так, в цепи передачи механической энергии от двигателя 1 к колесам 7 при компоновке автомобиля, когда двигатель расположен в передней его части, а приводные колеса задние, имеются следующие механизмы: 2 — механизм сцепления; 3 — коробка передач; 4 — карданный механизм; 5 — главная передача; 6 — дифференциальный механизм).

1.2. Механизм как система связанных материальных тел

Для изучения механизмов используют их кинематические схемы. На схемах материальные тела, входящие в состав механизмов, изображаются линиями, которые принципиально точно отражают их форму и соотношение отдельных геометрических размеров, особенности и специфику их движения и соединения друг с другом. Область механики, в которой рассматриваются вопросы строения механизмов, называется **структурой механизмов**. Приведем некоторые определения.

Звено — это одно или несколько неподвижно соединенных твердых тел, входящих в состав механизма. Примером звена является шатун (рис. 1.2) двигателя внутреннего сгорания, в данном случае состоящий из девяти материальных тел: 1, 3 — шпильки; 2, 4 — гайки; 5 — крышка; 6 — верхний вкладыш; 7 — нижний вкладыш; 8 — стержень; 9 — втулка.

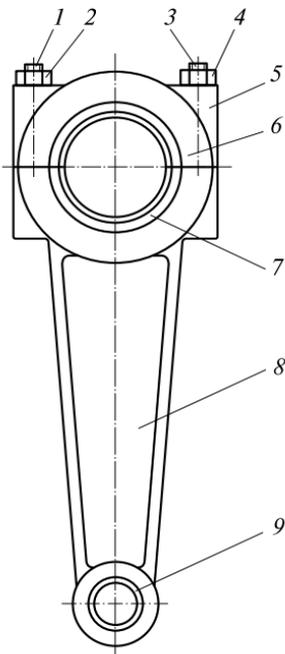


Рис. 1.2

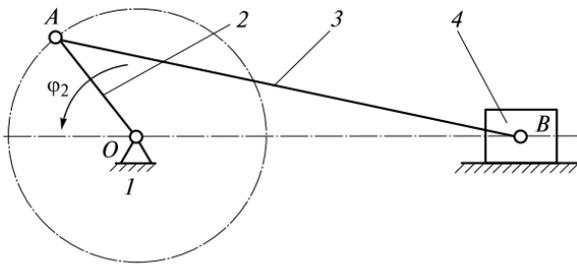


Рис. 1.3

Кинематическая пара — это соединение двух соприкасающихся звеньев, допускающее их относительное движение, например шатун и коленчатый вал двигателя внутреннего сгорания.

Связи — это ограничения, налагаемые на положения и скорости точек системы тел, которые должны выполняться при любых внешних воздействиях.

Число степеней свободы материального тела — это число его независимых возможных перемещений в пространстве или на плоскости. Несвязанное материальное тело в пространстве имеет шесть степеней свободы.

Число степеней свободы (подвижность) механизма — это число независимых возможных перемещений его звеньев.

Число степеней свободы (подвижность) кинематической пары — это число независимых возможных перемещений ее звеньев относительно друг друга.

Ведущее звено механизма — это звено, к которому извне подводится механическая энергия.

Ведомое звено механизма — это звено, с которого снимается механическая энергия.

Число ведущих (ведомых) звеньев определяется подвижностью механизма.

Кинематическая схема — это графическое изображение последовательности соединения звеньев в кинематические пары с указанием размеров звеньев. На кинематической схеме отражается особенность формы звеньев, специфика их абсолютного и относительного движений. На рис. 1.3 изображена схема механизма двигателя внутреннего сгорания, предназначенного для преобразования возвратно-поступательного движения поршня 4 во вращательное движение кривошипа 2. Длина звена 3 в данном случае существенно больше длины звена 2. Звено 1 является неподвижным и сложным по форме, а его длина превышает сумму длин звеньев 2, 3, 4. В этом механизме четыре кинематические пары, образованные звеньями 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1. Относительное движение звеньев 4 и 1 — поступательное, в остальных кинематических парах — вращательное.

1.3. Виды движения материальных тел

Из курса физики известно, что движение материального тела может быть:

плоским, когда траектории всех точек тела лежат в параллельных плоскостях (например, на рис. 1.3 звенья 2, 3 и 4 совершают плоское движение);

пространственным, когда предыдущее условие не выполняется (такое движение совершает гайка по неподвижному винту).

К **плоским** видам движения относятся:

вращательное (рис. 1.4), когда множество точек тела, лежащих на одной прямой a , всегда остается неподвижным. Все остальные точки движутся по дугам окружностей вокруг этой прямой, называемой осью вращения;

поступательное, когда произвольно заданная прямая на теле всегда остается параллельной самой себе;

сложное плоское, в котором одновременно присутствует и вращательное, и поступательное движение (такое движение совершает звено 3 на рис. 1.3).

Различают следующие виды **поступательного** движения:

- **прямолинейное поступательное**, когда тело движется в одном направлении. Траекториями движения точки являются параллельные прямые. В реальных механизмах такого движения у звеньев быть не может ввиду его неограниченности;

- **прямолинейное возвратно-поступательное**, когда направление движения материального тела меняется, а траекториями движения точек являются отрезки параллельных прямых (такое движение совершает поршень 4 (см. рис. 1.3) в двигателе внутреннего сгорания);

- **поступательное**, когда траекториями движения точек являются линии, отличные от прямых и однотипные (окружности, эллипсы, циклоиды и др.). Если материальное тело является звеном механизма, то эти траектории обязательно являются замкнутыми, так как звено, покинув свое текущее положение, через некоторое время вернется в него. Поступательное движение совершает звено 2 в механизме «шарнирный параллелограмм» (рис. 1.5). Свое название механизм получил из-за того, что точки O_1, A, B, O_2 ,

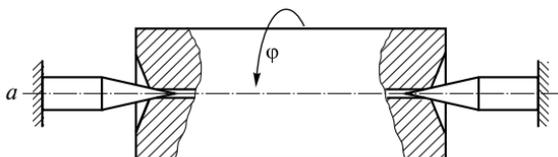
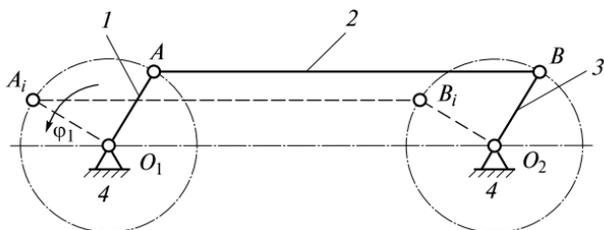


Рис. 1.4

Рис. 1.5



располагаясь в пространстве, образуют параллелограмм. Отрезки O_1A и O_2B , а также O_1O_2 и AB должны быть попарно одинаковыми. Линия AB на звене 2 в этом механизме в любой момент времени будет параллельной самой себе.

К **пространственным** видам движения относятся:

винтовое (такое движение совершает гайка при ее движении относительно винта);

сферическое (такое движение совершает корпус детской игрушки «юла», или «волчок», вращательное движение совершается одновременно около трех взаимно-перпендикулярных осей. На таком материальном теле лишь одна точка остается постоянно неподвижной);

различные виды сложного пространственного движения, не имеющие специфического названия.

Виды движения звеньев удобно различать по траекториям движения отдельных точек, заданных на звеньях, или по параметрам их движения. Известно, что под траекторией движения точки понимается линия, которую очерчивает рассматриваемая точка в пространстве. Эта линия может быть прямой (прямая), кривой (окружность, эллипс и др.), плоской (окружность и др.), пространственной (винтовая линия и др.). Так, при вращательном движении звена траектории всех его точек есть окружности, очерченные из одного центра (оси вращения). При поступательном движении траектории всех точек есть однотипные линии, например прямые, как у звена 4 (см. рис. 1.3), или дуги окружностей одинакового радиуса, как у звена 2 (см. рис. 1.5).

Движение звена будет сложным плоским, если траектории разных его точек будут различными. Так, у звена 3 (см. рис. 1.3) траекторией точки A является окружность, траекторией движения точки B является отрезок прямой, а любая другая точка будет иметь свою собственную траекторию.

1.4. Звенья механизмов

Большинство звеньев, входящих в состав механизма (машины), имеют собственные специфические названия, зависящие в основ-

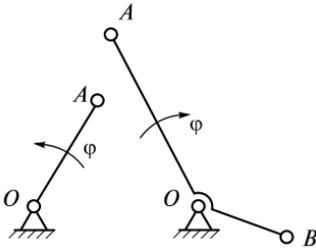


Рис. 1.6

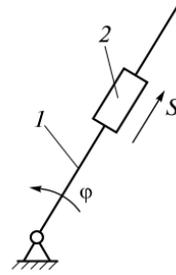


Рис. 1.7

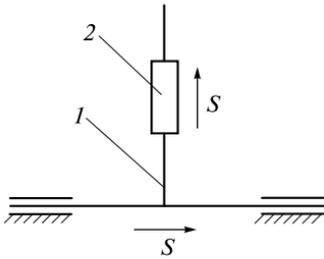


Рис. 1.8

ном от особенностей формы и особенностей движения, которое они совершают.

Звено в виде стержня OA или BOA (рис. 1.6), совершающее вращательное движение с углом поворота $\varphi > 2\pi$, называется **кривошипом**.

Звено в виде стержня, совершающее вращательное движение с углом поворота $\varphi < 2\pi$, называется **коромыслом**. Такое движение может быть только возвратным.

Звено рычажного механизма, движущееся поступательно или вращающееся вокруг неподвижной оси и образующее с другим подвижным звеном поступательную пару, называется **кулисой** (звено 1 на рис. 1.7 и 1.8).

Звено в виде призмы, цилиндра, совершающее поступательное движение относительно другого звена, называется **ползуном** (звенья 4 и 2 соответственно на рис. 1.3 и 1.8). Подобные звенья часто имеют собственные названия. Так, звено 4 на рис. 1.3 может быть названо поршнем, звено 2 на рис. 1.8 — кулисным камнем и т.д.

Звено рычажного механизма, образующее кинематические пары только с подвижными звеньями, называется **шатунном** (звено 3 на рис. 1.3).

Звено в виде короткого кругового цилиндра, совершающее вращательное движение, называется **диском**.

Звено, которое при вращении удерживается своими несущими поверхностями в опорах, называется **роотором**. У ротора протяженность в направлении, перпендикулярном оси вращения, существенно меньше, чем в параллельном (см. рис. 1.4).

Звено в виде призмы, диска, цилиндра, глобоида, совершающее заданное движение, по которому скользит или катится другое звено, называется **кулачком**.

Звено, имеющее форму кругового диска, совершающее вращательное движение, предназначенное для увеличения уровня кинетической энергии машины, называется **маховиком**.

Звено с замкнутой системой зубьев, обеспечивающее непрерывное движение другого звена, называется **зубчатым колесом**. Отдельно взятый выступ на колесе, который, взаимодействуя с выступом другого колеса, обеспечивает передачу движения, называется **зубом**.

Звено механизма, принимаемое за неподвижное, называется **стойкой**.

1.5. Кинематические пары

Кинематические пары различаются по многим признакам: число степеней свободы в относительном движении звеньев, число условий связи, характер относительного движения, особенности контакта звеньев друг с другом.

Рассмотрим классификацию кинематических пар *по числу w степеней свободы в относительном движении звеньев*.

Одноподвижная кинематическая пара ($w = 1$). В такой паре возможно лишь одно независимое относительное движение звеньев, например вращательное, поступательное или винтовое. У кинематической пары, изображенной на рис. 1.9, *а*, относительное движение является вращательным и характеризуется углом поворота φ звена 2 относительно звена 1.

Двухподвижная кинематическая пара ($w = 2$). В такой кинематической паре (рис. 1.9, *б*) два независимых движения, характеризующихся линейным перемещением S и угловым перемещением φ . Изображенная на рис. 1.9, *б* кинематическая пара называется цилиндрической, так как звенья соприкасаются друг с другом круговыми цилиндрическими поверхностями. Подвижность, равная двум, также реализуется в парах, содержащих два зубчатых колеса, в паре колесо автомобиля — дорога при плоском движении.

Трехподвижная кинематическая пара ($w = 3$) представлена на рис. 1.9, *в*.

Четырехподвижная кинематическая пара ($w = 4$) изображена на рис. 1.9, *г*.

Пятиподвижная кинематическая пара ($w = 5$) представлена на рис. 1.9, *д*.

Классификация кинематических пар *по характеру относительного движения* следующая:

- поступательная кинематическая пара — $w = 1$ (рис. 1.9, *е*);
- вращательная кинематическая пара — $w = 1$ (см. рис. 1.9, *а*);
- цилиндрическая кинематическая пара — $w = 2$ (см. рис. 1.9, *б*);

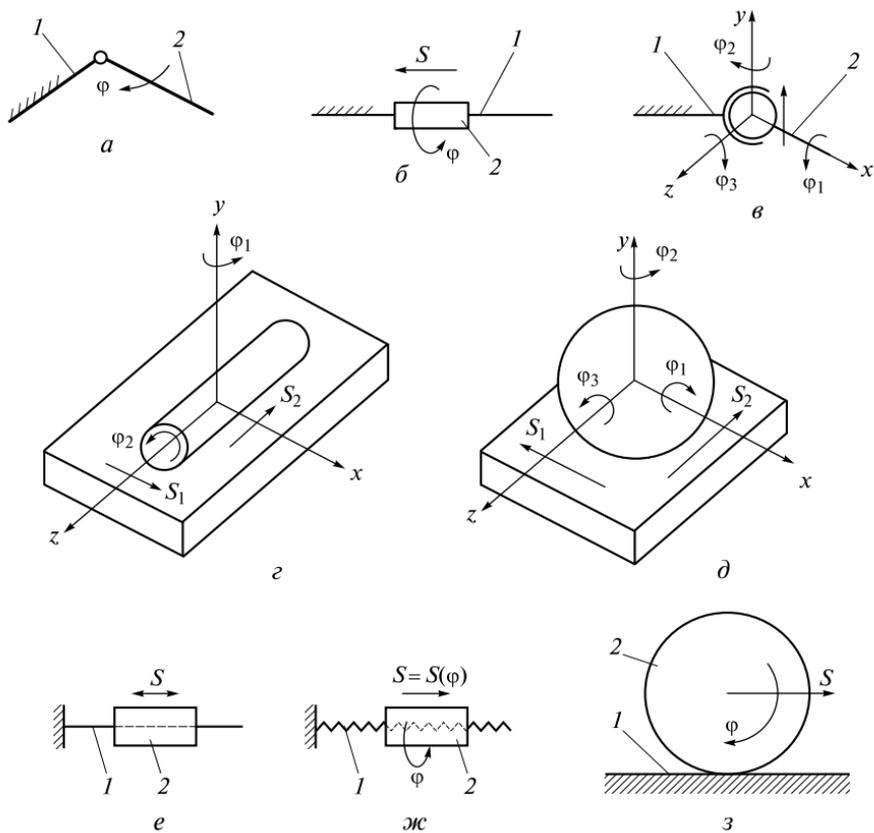


Рис. 1.9

- сферическая кинематическая пара — $w = 3$ (см. рис. 1.9, в);
- винтовая кинематическая пара — $w = 1$ (рис. 1.9, ж);
- кинематическая пара колесо — дорога, колесо — рельс, зубчатая — $w = 1$ (рис. 1.9, з) и др.

Все кинематические пары можно подразделить на три большие группы в зависимости от особенностей *соприкосновения звеньев между собой*:

- кинематические пары с соприкосновением звеньев по поверхности (см. рис. 1.9, а, е);
- кинематические пары с соприкосновением звеньев по линии (см. рис. 1.9, г, з);
- кинематические пары с соприкосновением звеньев в точке (см. рис. 1.9, д).

Кинематические пары с соприкосновением по линии и в точке называют *высшими*, остальные — *низшими*.

1.6. Кинематические цепи

Совокупность нескольких звеньев, связанных подвижно, называется **кинематической цепью**. Различают кинематические цепи *простые* (рис. 1.10) и *сложные* (рис. 1.11). В сложной кинематической цепи одно или несколько звеньев образуют кинематические пары одновременно с несколькими звеньями.

Кинематические цепи могут быть *замкнутыми* (рис. 1.12) или *разомкнутыми* (см. рис. 1.10, 1.11).

Понятие «кинематическая цепь» является абстрактным, поскольку в этой системе материальных тел нет неподвижных. Это значит, что нельзя установить характер движения каждого из материальных тел, нельзя дать им названия, а можно только пересчитать. Вместе с тем кинематическая цепь сразу же превращается в механизм со всеми его признаками, как только одно из ее материальных тел становится неподвижным и получает название «стойка». Сказанное означает, что из одной и той же кинематической цепи можно воспроизвести множество механизмов или из одного и того же механизма, преобразовав его сначала в кинематическую цепь, а затем приняв в качестве стойки другое звено, можно образовать совсем другой по сути механизм.

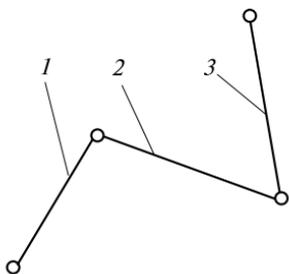


Рис. 1.10

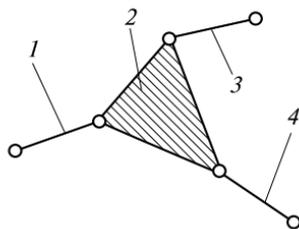


Рис. 1.11

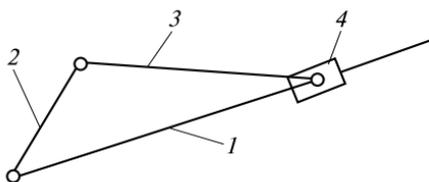


Рис. 1.12

1.7. Преобразование механизма заменой стойки

Рассмотрим в качестве исходной кинематической цепи изображенную на рис. 1.12 замкнутую кинематическую цепь, включающую в себя четыре материальных тела, и выберем в качестве стойки тело 1 (рис. 1.13).

В полученном механизме звено 2 может совершать вращательное движение с углом поворота $\varphi_2 > 2\pi$, если его длина l_2 будет меньше длины l_3 звена 3. Схема, изображенная на рис. 1.13, называется планом положений механизма. В этом механизме звено 2 следует назвать кривошипом, звено 3 — шатуном, звено 4 — ползуном. Такой механизм называется в механике *кривошипно-ползунным*.

Выберем в качестве стойки звено 2 (рис. 1.14).

На основании плана положений механизма, изображенного на рис. 1.14, можно сделать выводы:

- звено 3 может совершать вращательное движение с углом поворота $\varphi_3 > 2\pi$, в данном случае 3 — кривошип;
- звено 1 может совершать вращательное движение и является направляющим для движения ползуна 4, в данном случае звено 1 — кулиса.

Подобный механизм в механике называют *кривошипно-кулисным*.

Выберем в качестве стойки звено 3 (рис. 1.15).

На основании плана положений механизма, изображенного на рис. 1.15, можно сделать выводы:

- звено 2 может совершать вращательное движение с углом поворота $\varphi_2 > 2\pi$, в данном случае звено 2 — кривошип;
- звено 1 будет совершать сложное плоское движение, в данном случае звено 1 — шатун.

Такой механизм в механике называют *кривошипно-шатунным*.

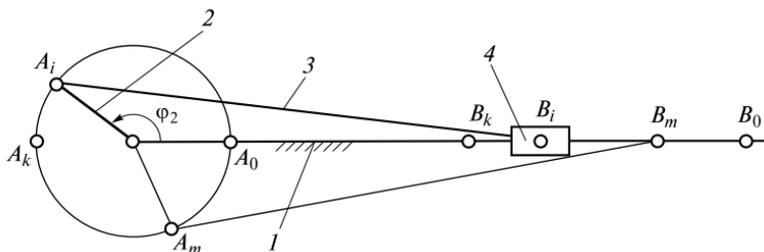


Рис. 1.13

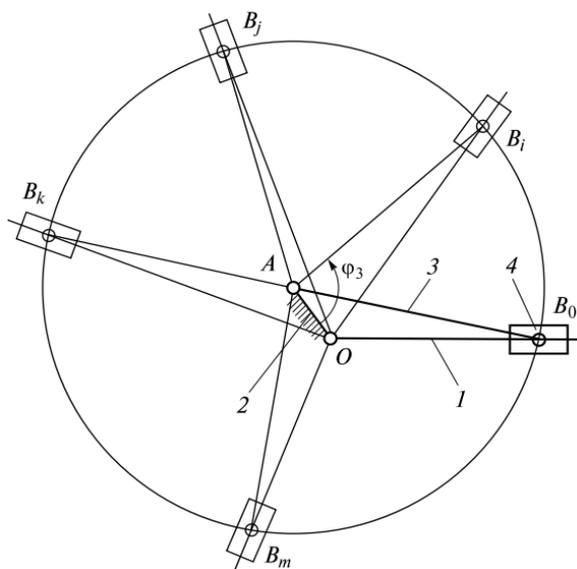


Рис. 1.14

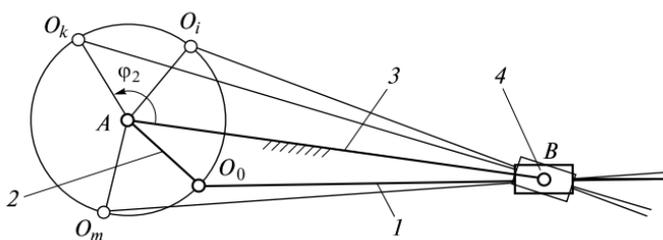


Рис. 1.15

Из рассмотренной кинематической цепи можно образовать и другие механизмы не только заменой стойки, но и изменением соотношения длин звеньев 2 и 3.

1.8. Разновидности механизмов

За период «увлечения» механизмами человечество создало их в огромном количестве. Классифицировать механизмы сложно, укажем лишь отдельные их разновидности. Все механизмы можно подразделить на плоские и пространственные. *Плоским* называют такой механизм, у которого траектории движения точек всех его звеньев лежат в одной или множестве параллельных плоско-

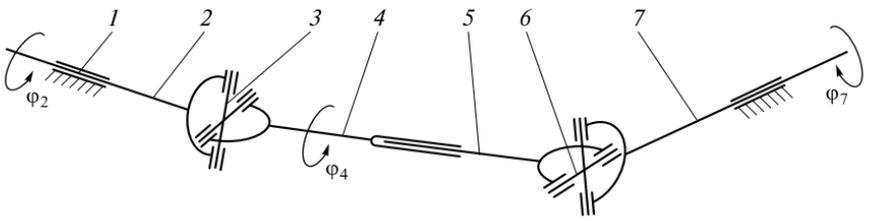


Рис. 1.16

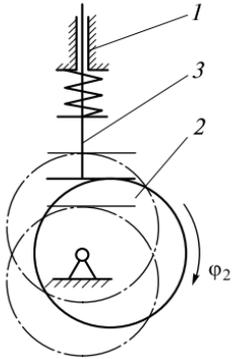


Рис. 1.17

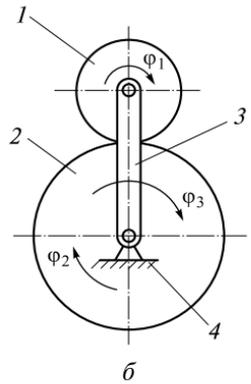
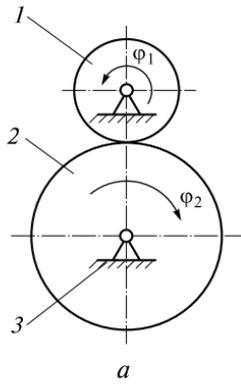


Рис. 1.18

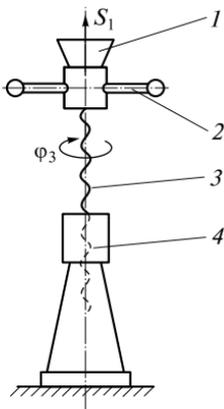


Рис. 1.19

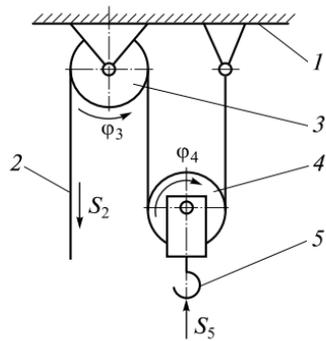


Рис. 1.20

стей. Если это условие не выполняется, то механизм называется *пространственным*. Механизмы, изображенные на рис. 1.13 — 1.15, являются плоскими. Механизм «карданная передача», являющийся примером пространственного механизма, изображен на рис. 1.16.

Если в качестве отличительных признаков для механизмов принять признаки структуры и характера взаимодействия звеньев, то механизмы можно подразделить на несколько групп:

- рычажные (см. рис. 1.13 — 1.16);
- кулачковые (рис. 1.17);
- зубчатые (рис. 1.18). На рис. 1.18, *а* изображен механизм с неподвижными осями колес, на рис. 1.18, *б* одно из колес имеет подвижную ось;

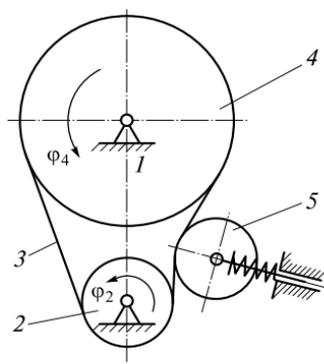


Рис. 1.21

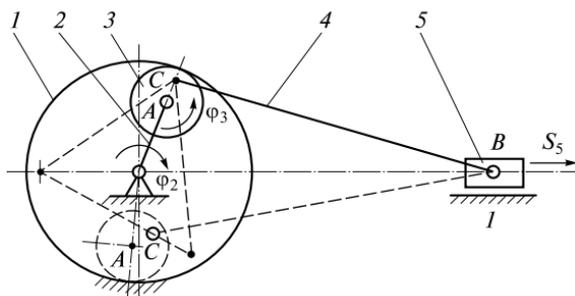


Рис. 1.22

- винтовые (рис. 1.19);
- с гибкими звеньями (рис. 1.20);
- фрикционные (рис. 1.21), в данном случае ременная передача;
- составные, например зубчато-рычажные (рис. 1.22);
- кулачково-зубчатые и др.

1.9. Число степеней свободы механизма

Число степеней свободы механизма весьма просто определяется практически. Для этого достаточно привести в независимое движение отдельные его звенья, сначала одно, потом одновремен-

но два, затем три и т.д. Наибольшее число звеньев, способных двигаться независимо и одновременно, будет соответствовать числу степеней свободы w механизма. В механизме, изображенном на рис. 1.18, *а*, независимое движение может иметь лишь одно из колес 1 или 2. На рис. 1.18, *б* двум звеньям можно задать независимые движения, например колесу 2 и звену 3, которое называется водилом.

Число степеней свободы (подвижность) механизма можно рассчитать по формуле, которая связывает подвижность механизма с числом звеньев, числом кинематических пар и их подвижностью. Эта формула для плоских механизмов предложена П.Л. Чебышевым в 1869 г. Ее легко получить в процессе рассуждения, в основе которого лежит порядок сборки механизма из несвязанной системы материальных тел.

В исходном состоянии все n звеньев, еще составляющие несвязанную систему тел, обладают числом степеней свободы $w = 3n$, где число 3 определяет число степеней свободы несвязанного тела на плоскости. Из совокупности n материальных тел выбирается одно и делается неподвижным для выполнения роли стойки будущего механизма. Число степеней свободы системы материальных тел изменилось и стало равным $w = 3(n - 1)$. Выбирается необходимое следующее материальное тело и подсоединяется к стойке, например с образованием одноподвижной кинематической пары. Число степеней свободы изменилось и стало равным $w = 3(n - 1) - 2 \cdot 1$, так как одна одноподвижная кинематическая пара лишает звено двух степеней свободы. Если при дальнейшем присоединении звеньев с образованием одноподвижных кинематических пар их количество окажется равным P_1 , то число степеней свободы системы звеньев уменьшится до $w = 3(n - 1) - 2P_1$. В результате сборки часть звеньев могут образовывать с другими и двухподвижные кинематические пары, например в количестве P_2 . Тогда число степеней свободы системы звеньев окажется равным $w = 3(n - 1) - 2P_1 - 1P_2$. Иных кинематических пар в плоском механизме быть не может, поэтому после сборки последнего звена итоговая подвижность механизма

$$w = 3(n - 1) - 2P_1 - 1P_2. \quad (1.1)$$

Аналогичным рассуждением получается формула для определения подвижности пространственного механизма:

$$w = 6(n - 1) - 5P_1 - 4P_2 - 3P_3 - 2P_4 - 1P_5, \quad (1.2)$$

обоснование которой в конце XIX — начале XX в. было сделано российскими учеными П. О. Сомовым, Х. И. Гохманом, А. П. Малышевым. Формулу (1.2) обычно именуют формулой Сомова — Малышева.