Лекция – 3

1 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ

Электроприводом называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение рабочих и регулирующих органов машин и механизмов и управления их технологическим процессом, состоящая из электродвигателя, устройства управления и передаточного устройства.

В устройствах различного назначения преимущественно используются электромоторный и электромагнитный приводы. В их основе лежат электриче-ские двигатели и электромагниты, преобразующие электрическую энергию в ли-нейное перемещение штока или вращение вала.

Структурная схема автоматизированного электропривода представлена на рис. 1.1.

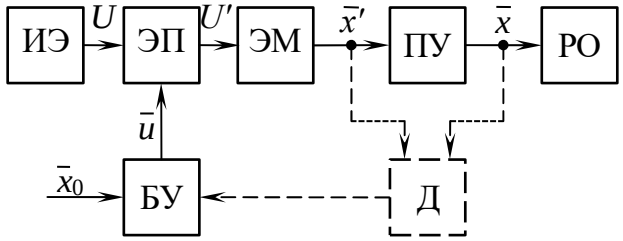


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода

Электрическая энергия постоянного или переменного тока от источника ИЭ напряжением U преобразуется электрическим преобразователем ЭП к виду U', необходимому для приведения выходного элемента электромотора или электромагнита ЭМ в движение. На выходе ЭМ формируется вектор $\bar{x}'$ выходных фазовых координат, которыми могут быть линейное перемещение x' штока, угол φ' поворота вала, линейная и угловая скорости $x\&'$ и $\omega' = \phi\&'$, линейное или угловое ускорения $\&x\&'$ и $\omega\&' = \&\phi\&'$. Передаточное устройство ПУ преобразует эти параметры движения в требуемые параметры $\bar{x}$ для совершения механической работы рабочим органом РО в выполняемом процессе.

В зависимости от энергии, необходимой для совершения механического перемещения, на валу электродвигателя или на штоке электромагнита создается требуемый момент M или усилие F. В ряде случаев от этих параметров зависят сила тока I в обмотках электродвигателя и мощность P, потребляемая от источ-ника ИЭ.

Требуемые параметры перемещения задаются с внешнего устройства в виде вектора $\bar{x}_0$. Для контроля выполнения этого задания в электроприводе может быть применен датчик Д соответствующих фазовых координат, который может быть подключен как к выходу ЭМ, так и к выходу ПУ. Типичные датчики перемещения – *энкодеры*, рассмотрены в одном из разделов настоящей главы. Блок управления БУ сравнивает получаемые в ходе движения параметры $\bar{x}$ с заданными $\bar{x}_0$ и в зависимости от результата сравнения формирует вектор $\bar{u}$ управляющих воздействий, которые посредством электрического преобразователя изменяют параметры движения $\bar{x}'$ и $\bar{x}$. В отдельных случаях, например, при использовании шаговых электродвигателей, применения датчиков движения не требуется.

Основой электропривода является электродвигатель. В настоящем пособии материал, изложенный в главе, поделен на разделы в зависимости от типа электродвигателя, используемого в электроприводе. Электрические преобразователи, в качестве которых выступают коммутаторы, импульсные преобразователи, инверторы, рассматриваются применительно к конкретному типу электродвигателя. Передаточные устройства, которыми, например, являются редукторы и преобразователи вращательного движения в поступательное, рассматриваются в главе 4.

Интересно отметить, что в настоящее время в промышленности существует тенденция минимизации количества передаточных устройств в приводах. Вместо электродвигателя с редуктором применяют двигатель с меньшей частотой вращения и большим моментом, вместо электродвигателя с преобразователем вращательного движения в поступательное – линейный электродвигатель.

Особенности источников питания и блоков управления для электроприво-дов в настоящем пособии не рассматриваются. Рекомендуем ознакомиться со следующей литературой по этим темам: [3, 4] – по источникам питания, [4, 5] – по блокам управления. Так же, при отсутствии необходимых знаний для понимания рассматриваемого в пособии материала рекомендуем обращаться к учебным пособиям по электротехнике и электронике, например, [6].

Несмотря на широкое развитие новых типов электродвигателей, например, линейных, в настоящее время в электроприводах в большинстве случаев применяют электродвигатели вращательного движения. Такие двигатели состоят из

подвижной и неподвижной частей. Традиционно для машин переменного тока (асинхронных и синхронных электродвигателей) подвижная часть называется *статором*, а неподвижная – *ротором*. Для машин постоянного тока неподвижная часть называется *станиной* (станиной с индуктором), а подвижная – *якорем*. Строго говоря, все эти части присутствуют как в машинах постоянного тока, так и в машинах переменного тока. Так, станина – это основная несущая часть машины, на которой монтируются постоянные магниты или магнитопроводы для обмоток статора, а также подшипниковые щиты, в которых закрепляются подшипники вала ротора. Обратимся к определениям, приведенным в ГОСТ 27471–87 [7].

Статор вращающейся электрической машины – часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой.

Ротор электрической машины – вращающаяся часть электрической машины.

Якорь синхронной машины (коллекторной машины постоянного тока) – часть коллекторной машины постоянного тока или синхронной машины, в которой индуктируется электродвижущая сила и протекает ток нагрузки.

Индуктор синхронной машины – статор или ротор синхронной машины, на котором размещены постоянные магниты или обмотка возбуждения.

Следовательно, понятия *статор* и *ротор* применимы ко всем вращающимся электрическим машинам, независимо от их типа, в том числе и к машинам постоянного тока с постоянными магнитами. Традиционно, якорем у синхронных машин является статор, у машин постоянного тока – ротор. В асинхронном электродвигателе и статор, и ротор – якоря. Индуктором у машин постоянного тока является статор, у синхронных машин – ротор.

Рекомендуем ознакомиться с определениями других основных деталей и сборочных единиц вращающихся электрических машин в [8].

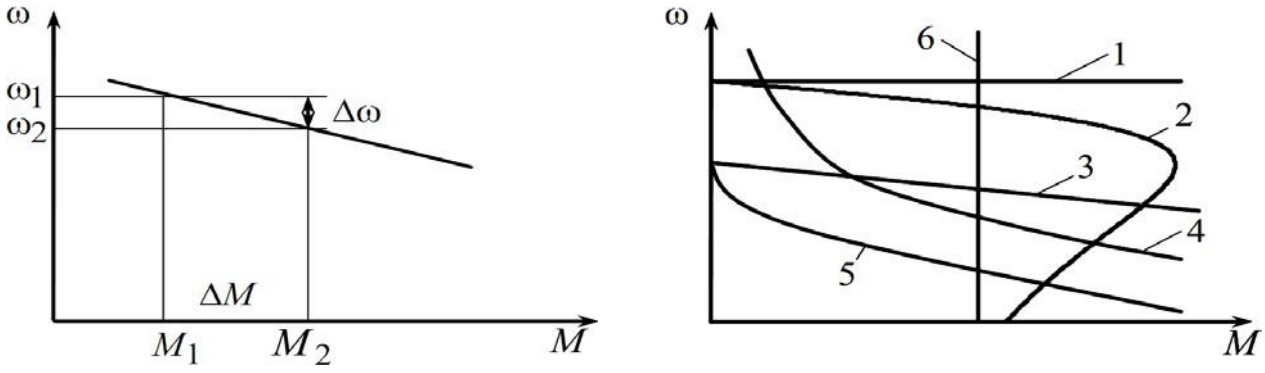
Основные технические характеристики электродвигателей определяются параметрами входных электрических воздействий и выходного механического движения. К электрическим параметрам относятся: род тока, номинальное напряжение питания U_0, частота f переменного тока, коэффициентом мощности cosφ, номинальная потребляемая мощность P. С этими величинами связаны сопротивление R обмоток и номинальный ток потребления I. Параметрами выходного

вращательного движения являются номинальная частота вращения n (число оборотов в минуту или секунду) или угловая скорость $\omega = 2\pi n$, номинальный момент на валу M_0 и коэффициент полезного действия η. Для большинства электродвигателей выходные механические параметры взаимозависимы. Частота вращения ω зависит от нагрузки на валу (момент M). Основной характеристикой, позволяю-щей судить о работе двигателя при различных нагрузках, является *механическая характеристика*.

Механическая характеристика электродвигателя – это зависимость скорости вращения ω от момента M на валу. Часто вместо угловой скорости ω используют внесистемную физическую величину – частоту вращения n.

Степень изменения скорости с изменением момента у различных типов электрических машин неодинакова и различается в зависимости от *жесткости* механических характеристик (см. рис. 1.2) [8].

Жесткостью механической характеристики называется отношение приращения момента M к приращению скорости ω: $\beta = \Delta M/\Delta\omega$, где $\Delta M = M_2 - M_1$, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$; M_1 и M_2 – моменты, соответствующие угловым скоростям ω_1 и ω_2 (см. рис. 1.2, *а*). Для нелинейной механической характеристики ее жесткость за-висит от момента M и угловой скорости ω.



а) *б*)

Рис. 1.2. Механические характеристики электродвигателей:

а – к расчету жесткости характеристики;

б – механические характеристики различных электродвигателей

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основных типа в зависимости от их жесткости (рис 1.2, *б*) [8].

При *абсолютно жесткой механической характеристике* скорость с изменением момента остается неизменной (прямая *1*, $\beta \to \infty$). Такой характеристикой обладают *синхронные электрические машины*. В этих машинах скорость враще-ния вала полностью определяется частотой электрических сигналов на входе электродвигателя, которые позволяют точно определять угол поворота вала.

Жесткая механическая характеристика отличается незначительным изменением угловой скорости с изменением момента. Жесткой механической характеристикой обладают *асинхронные двигатели* (кривая *2*) и *двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения* (линия *3*).

Мягкая механическая характеристика отличается значительным изменением угловой скорости с изменением момента. Такой характеристикой обладают *двигатели постоянного тока последовательного возбуждения* (кривая *4*) и *двигатели постоянного тока смешанного возбуждения* (кривая *5*).

В случае *абсолютно мягкой механической характеристики* момент двигателя остается неизменным с изменением угловой скорости (прямая *6*, $\beta = 0$). Абсолютно мягкой механической характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока.

Механическая характеристика является основой для выбора типа электродвигателя при проектировании электропривода. Кроме механической характеристики электродвигателя важную роль для экономичной эксплуатации электропривода играют механические характеристики приводимых в движение механизмов. Эти характеристики также рассматриваются в [8, 9].

Кроме механических характеристик электродвигателей используют [9]:

– регулировочные характеристики – зависимость частоты вращения двигателя от какого-либо влияющего параметра (напряжения питания, величины тока в обмотке возбуждения, частоты переменного тока и т.д.);

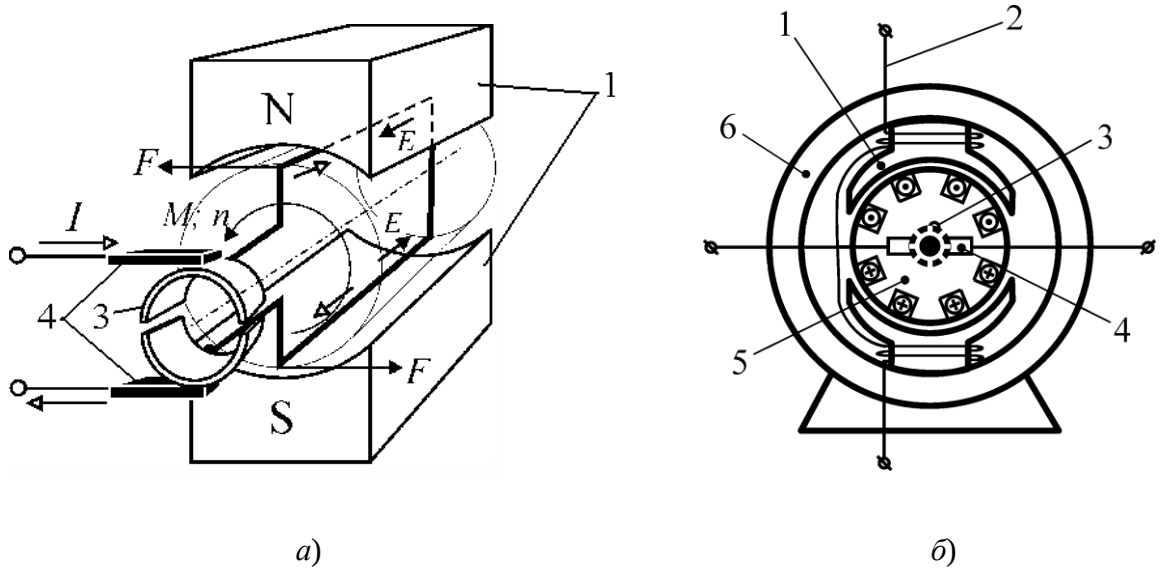
– энергетические характеристики, устанавливающие связь между частотой вращения и каким-либо энергетическим показателем двигателя (коэффициентом полезного действия, коэффициентом мощности и т.п.)

1.1. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1.1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

На рисунке 1.3, *а* представлена упрощенная схема, поясняющая принцип работы электрических машин постоянного тока.

Между полюсами постоянного магнита *1* расположен проводник, по которому через щетки *4* и пластины коллектора *3* протекает ток *I*. При взаимодействии магнитного поля проводника с полем постоянного магнита возникает сила *F*, действующая на проводник. Направление силы *F* можно определить по правилу ле-вой руки. Силы *F* действует на верхнюю и нижнюю (по схеме) части проводника в противоположные стороны, в результате чего формируется момент пары сил *M*, поворачивающий проводник против часовой стрелки. После поворота на 180° верхняя и нижняя части проводника поменяются местами, но направления тока *I*, силы *F* и момента *M* сохранятся, так как одновременно с поворотом произойдет переключение в щеточно-коллекторном узле *3–4*. Этот узел является одним из основных элементов машин постоянного тока и отличает их от других электрических машин. Он необходим для сохранения постоянного направления вращения.



а) *б*)

Рис. 1.3. Схемы электрических машин постоянного тока:

а – к пояснению принципа работы; *б* – к пояснению устройства

Из рисунка 1.3, *а* видно, что при повороте проводника на 90°, на него не будет действовать момент *M*, так как плечо пары сил *F* будет равно нулю, а, кроме того, между щетками *4* произойдет короткое замыкание через пластины коллектора *3*. Поэтому реальные электрические машины постоянного тока никогда не изготавливают с одной обмоткой и двумя пластинами коллектора. Минимальное число обмоток и пластин коллектора равно трем. Причем так изготавливают только дешевые малогабаритные электродвигатели для неответственных устройств. Обычно число коллекторных пластин не менее пяти даже у маломощных электродвигателей.

На рисунке 1.3, *б* представлена упрощенная схема устройства электриче-ской машины постоянного тока. В станине *6* установлены полюсы *1* индуктора, создающего постоянное магнитное поле за счет протекания тока возбуждения по обмоткам цепи *2*. Щетки *3* и коллектор *4* обеспечивают подвод электрической энергии к обмоткам якоря *5*. Плоскость, проходящая через ось электродвигателя посредине между соседними полюсами, называется *геометрической нейтралью*. На рисунке 1.3 линии два полюса *N* и *S*, поэтому геометрическая нейтраль горизонтальна и на рис. 1.3, *б* совпадает с изображенными проводниками щеток *4*. Проводники якоря, находящиеся на геометрической нейтрали, как было указано выше, не участвуют в формировании вращающего момента *M*. По этой причине полюсы *1* не имеет смысла подводить близко к геометрической нейтрали, а щетки по ряду причин, наоборот, целесообразно располагать именно на ней. В каком бы положении ни находился якорь, схема соединения его обмоток с пластинами коллектора обеспечивает противоположное направление протекания токов по разные стороны от геометрической нейтрали.

Станина, полюса индуктора и якорь представляют собой магнитную цепь. В электродвигателе с обмотками возбуждения все части магнитной цепи изготавливаются из магнитомягкого материала, в электродвигателе с постоянным магнитом ротор – из магнитомягкого, а статор – из магнитотвердого [6]. На рисунке 1.4 штриховыми линиями со стрелками показаны направления магнитного поля в различных частях электрической машины при протекании по обмоткам возбуждения тока I_e в направлении, указанном стрелкой.

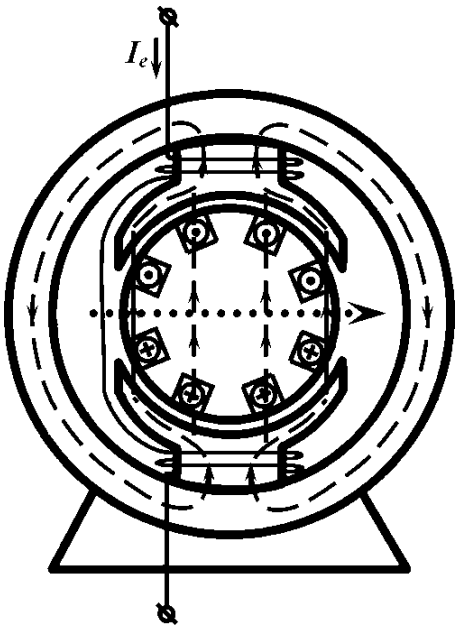
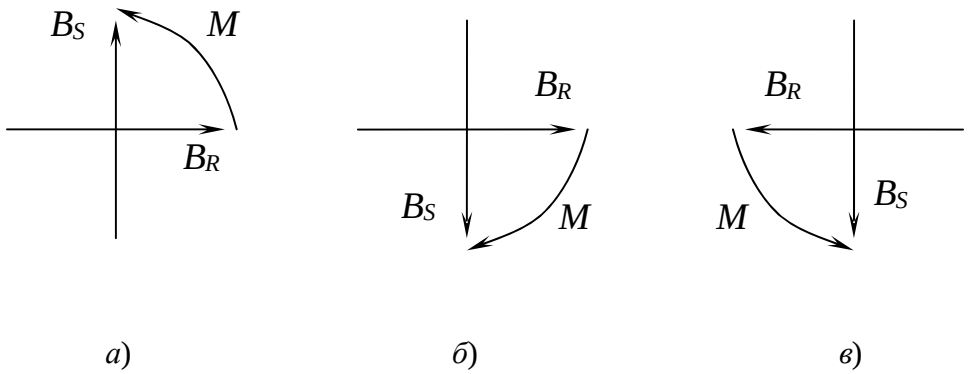


Рис. 1.4. Направления магнитных полей в электродвигателе постоянного тока

Все обмотки якоря соединены последовательно. Точками соединения являются пластины коллектора. Ток проходит по всем обмоткам за исключением тех, концы которых подключены к пластинам коллектора, замыкаемым щетками. Обмотки якоря создают в нем магнитное поле, направление которого показано на рис. 1.4. пунктирной линией со стрелкой. Взаимодействие магнитных полей статора и ротора приводит к формированию вращающего момента, который стремится выровнять направления магнитных полей, т.е. на ротор действует момент, направленный против часовой стрелки. Схема такого взаимодействия представлена на рис. 1.5, *а*.

Если изменить направление тока в обмотках возбуждения, то вектор индукции B_S магнитного поля статора изменит свое направление на противоположное (рис. 1.5, *б*). На ротор будет действовать момент *M*, который также будет стремиться повернуть вектор индукции B_R магнитного поля ротора в сторону вектора B_S, но будет направлен по часовой стрелке. Если теперь путем изменения полярности подключения щеток изменить направление тока в обмотках ротора, то свое направление изменит и вектор индукции B_R, а момент *M* примет исходное



а) *б*) *в*)

Рис. 1.5. Схема взаимодействия магнитных полей статора и ротора

направление против часовой стрелки (рис. 1.5, *в*). Таким образом, изменение направления тока в любой части электрической машины приводит к изменению направления вращения на противоположное.

При работе электрической машины под нагрузкой магнитные поля статора и ротора складываются, и в области якоря и полюсных наконечников формируется сложное магнитное поле. Воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле статора называется реакцией якоря и является негативным эффектом [10, 11].

1.1.2. УСТРОЙСТВО ЯКОРЯ

Якорь электрических машин постоянного тока является наиболее сложным узлом. Кроме коллектора он содержит ряд обмоток, которые укладываются в пазы магнитопровода, находящиеся под разными полюсами. Конструкции магнитопровода и коллектора якоря показаны на рис. 1.6.

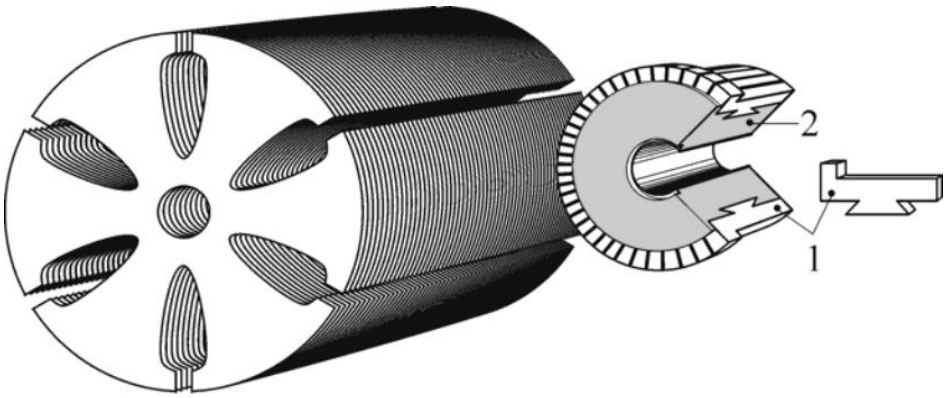


Рис. 1.6. Конструкции магнитопровода и коллектора якоря

В связи с тем, что в обмотках якорей машин постоянного тока из-за коммутации на коллекторе протекает импульсный ток, для уменьшения потерь в стали необходимо набирать пакет из отдельных тонких пластин электротехнической стали. Коллектор состоит из набора изолированных друг от друга медных пластин *1*, залитых в пластмассовую втулку *2* (рис. 1.6). Пакет ротора и коллектор напрессовываются на вал якоря, и в открытые пазы пакета укладывается обмотка, концы секций которой припаиваются к пластинам коллектора.

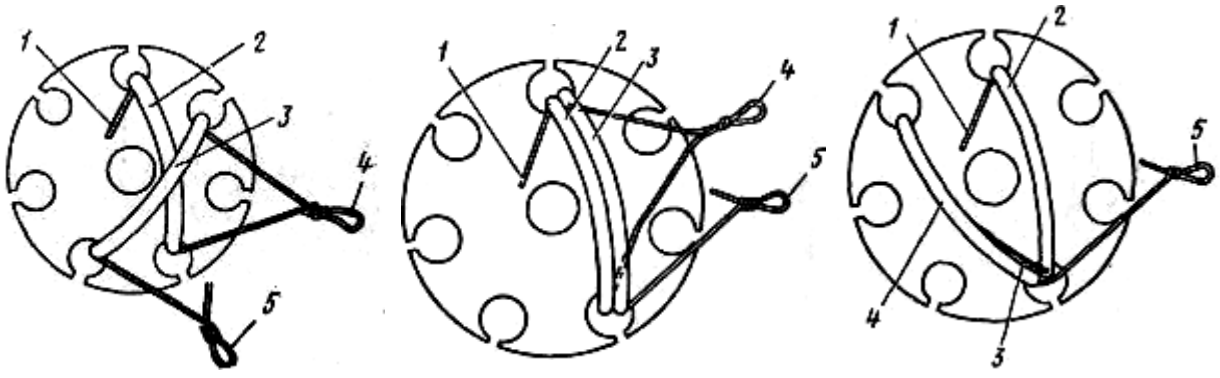
Количество пазов может совпадать с количеством пластин якоря и может быть в несколько раз меньше. Если количества пазов и пластин совпадают, то число обмоток в пазу $u = 1$, если количество пазов в два раза меньше числа пла-стин, то $u = 2$.

Обмотка якоря состоит из секций. Секция представляет собой наименьшую часть обмотки, заключенную между двумя присоединениями к коллектору. Сек-ция может состоять из одного или нескольких витков.

Для понимания взаимного геометрического расположения обмоток и пла-стин коллектора на рис. 1.7 представлены схемы намотки якоря различными спо-собами, а на рис. 1.8 – соответствующие рабочие схемы этих намоток.

На схемах рис. 1.7, *а* и *б* позициями *1* обозначено начало намотки, *2* – пер-вая секция. После намотки секции делается отвод *4* на пластину коллектора, а за-тем наматывается следующая секция *3*, после чего вновь делается отвод *5*. После завершения намотки якоря по схеме рис. 1.7, *а* в каждом пазу будет лежать по од-ной стороне от двух различных секций (всего две стороны), а по схеме рис. 1.7, *б* – по одной стороне от четырех различных секций (всего четыре стороны).

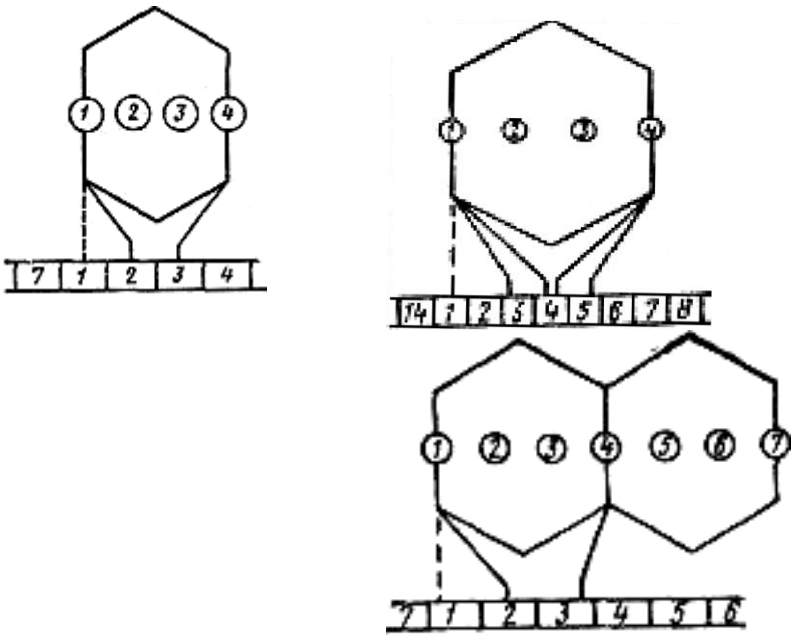
На схеме рис. 1.7, *в* позициями *1* обозначено начало намотки, *2* – первая полусекция, *3* – переход к второй посусекции, *4* – вторая полусекция, *5* – отвод для присоединения к пластине коллектора, после которого наматывается сле-дующая секция.



а) *б*) *в*)

Рис. 1.7. Схемы расположения обмоток якоря на магнитопроводе при различных способах намотки:

а – «простая» при $u = 1$; *б* – «простая» при $u = 2$; *в* – «в елочку»



а) *б*) *в*)

Рис. 1.8. Рабочие схемы обмоток якоря при различных способах намотки:

а – «простая» при *и* = 1; *б* – «простая» при *и* = 2; *в* – «в елочку»

Рабочими схемами (рис. 1.8) пользуются при намотке якорей. Независимо от числа витков в секции показывают только один виток. Номерами в кружках обозначаются пазы магнитопровода, в прямоугольниках – пластины коллектора.

На рисунках 1.3 и 1.4 изображены схемы электродвигателя с одной парой полюсов *N*–*S*. Электрические машины постоянного тока изготовляют и с большим числом пар полюсов. При намотке их якорей различают петлевые и волновые об-мотки. Подробную информацию о типах обмоток якорей и машинах постоянного тока с большим числом пар полюсов можно получить в [10, 11].