

## 12. Двигатели постоянного тока

Двигатели постоянного тока исторически были первыми устройствами, преобразующими электрическую энергию в механическую. Сто семьдесят лет тому назад по Неве уже плавала лодка, приводимая в движение таким двигателем. Позднее они уступили свои позиции бесколлекторным двигателям, но в регулируемом приборном приводе и в системах автоматики до настоящего времени часто не существует альтернативы их применению. Это объясняется широким диапазоном и плавностью регулирования скорости вращения, а также более простыми методами и устройствами управления.

Кроме двигателей широко распространены также генераторы постоянного тока. Однако область их применения сокращается в связи с развитием преобразовательной техники и выбор генератора постоянного тока в качестве источника питания производится обычно с учётом множества факторов, исключающих иное решение. Поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать в основном двигательный режим работы машин постоянного тока.

### 12.1. Устройство и принцип действия

Машина постоянного тока функционально является обращённой синхронной машиной, т.е. синхронной машиной у которой функции статора и ротора поменялись местами. Статор возбуждает постоянное магнитное поле, а ротор вращается в этом поле и осуществляет преобразование энергии. Для создания машиной постоянного вращающего момента требуется, чтобы электромагнитная сила, создающая этот момент, была постоянной, что, в свою очередь, требует сохранения направления протекания тока по отношению к полюсам магнитного поля. Во вращающемся роторе функцию изменения направления тока при перемещении проводников обмотки к противоположному полюсу выполняет *щёточно-коллекторный узел*. На рис. 12.1 показан простейший двигатель постоянного тока. Он представляет собой проводник, изогнутый в виде рамки и подвешенный на оси  $OO'$ . Концы рамки  $abcd$  через полукольца и скользящие по ним щётки подключены к внешнему источнику постоянного тока. Взаимодействие протекающего в рамке тока  $I_{я}$  с магнитным полем создаёт электромагнитную силу  $F$ , действующую на рамку и вызывающую её вращение. Для сохранения направления действия этой силы ток в части рамки находящейся под северным полюсом должен протекать в направлении  $O-O'$ , а в находящейся под южным полюсом части рамки – в направлении  $O'-O$ . Поэтому через каждые пол-

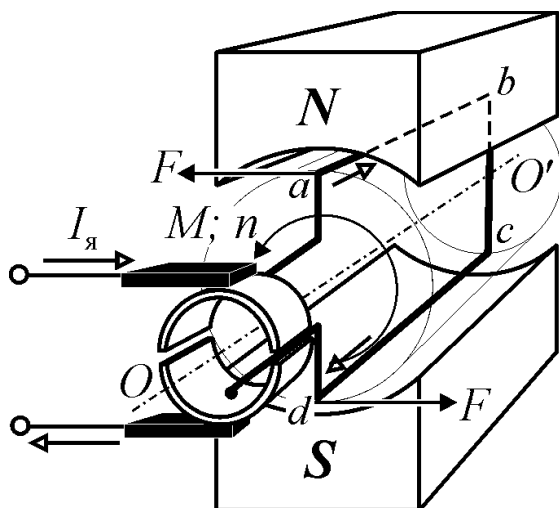


Рис. 12.1

тора происходит смена полюсов. Поэтому через каждые пол-

оборота ротора ток в сторонах  $ab$  и  $cd$  рамки должен менять направление на противоположное. Это происходит при переходе полуколец с одной щётки на другую. Полукольца рамки являются простейшим *коллектором* машины постоянного тока и вместе со щётками выполняют функцию преобразования постоянного тока в переменный с частотой вращения ротора.

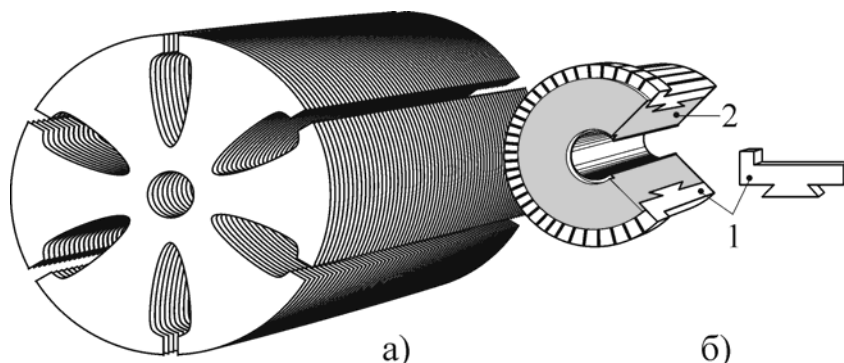


Рис. 12.2

Ротор машины постоянного тока называется *якорем*. Его конструкция является развитием рамки и полуколец. Чтобы увеличить вращающий момент нужно увеличить количество «рамок» и заполнить ферромагнетиком

воздушный промежуток между полюсами статора. Для этого из штампованных листов электротехнической стали собирается пакет якоря (рис. 12.2, а). Полукольца примитивного коллектора преобразуются в набор изолированных друг от друга медных пластин  $1$  залитых в пластмассовую втулку  $2$  (рис. 12.2, б). Пакет ротора и коллектор напрессовываются на вал якоря и в открытые пазы пакета укладывается обмотка (на рисунке не показана), концы секций (катушек) которой припаиваются к пластинам коллектора.

Общая конструктивная схема машины постоянного тока показана на рис. 12.3. Она состоит из корпуса  $1$ , объединяющего все элементы конструкции и являющегося также магнитопроводом. В подшипниках корпуса установлен якорь машины  $2$  и щёточно-коллекторный узел  $3, 4$ . В корпусе также установлены *главные полюсы*  $5$ , распределяющие основной магнитный поток машины, возбуждаемый установленной на полюсах обмоткой  $6$ . На геометрической оси щёток машины установлены *дополнительные полюсы*  $7$  с обмоткой  $8$ , возбуждающей их магнитное поле.

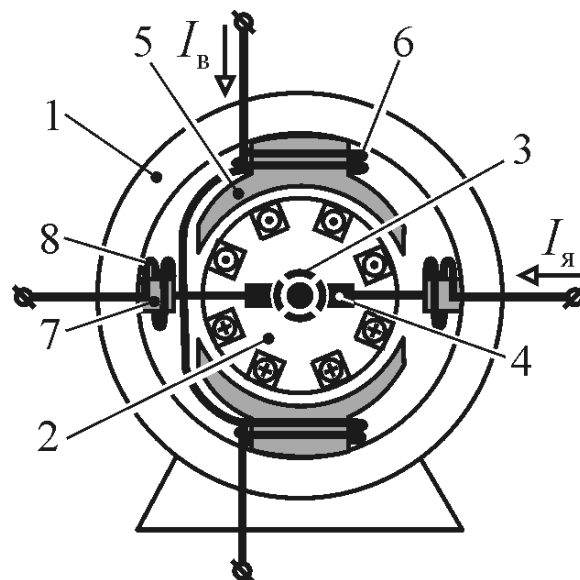


Рис. 12.3

Обмотка возбуждения машины  $6$  и обмотка якоря с последовательно включённой обмоткой дополнительных полюсов  $8$  образуют две электрические цепи, которые могут питаться от одного или от разных источников постоянного тока. По схеме питания этих цепей машины постоянного тока раз-

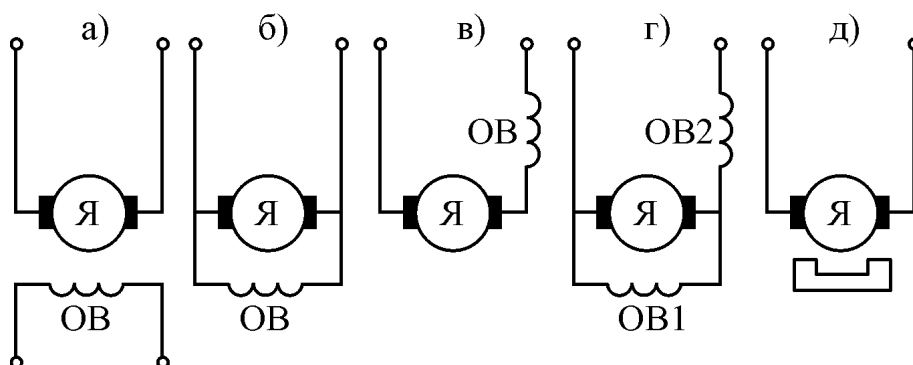


Рис. 12.4

деляют на машины с независимым (раздельным), параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 12.4, а, б, в и г). К машинам с независимым возбуждением относятся также машины с магнитоэлектрическим возбуждением, т.е. с возбуждением основного магнитного потока с помощью постоянных магнитов (рис. 12.4, д).

*Вопросы для самопроверки*

1. Какую функцию выполняет коллектор двигателя?
2. Какую функцию выполняет корпус двигателя?
3. Для чего нужно изменять направление протекания тока в секциях обмотки якоря?
4. Как разделяют двигатели постоянного тока по схеме питания обмотки возбуждения?
5. Перечислите основные элементы конструкции двигателя.

**12.2. Магнитная и электрическая цепи машины**

Магнитная цепь главных полюсов машины предназначена для возбуждения и распределения основного магнитного потока. Она состоит из главных полюсов 1, воздушного зазора между полюсами и якорем 2, сердечника

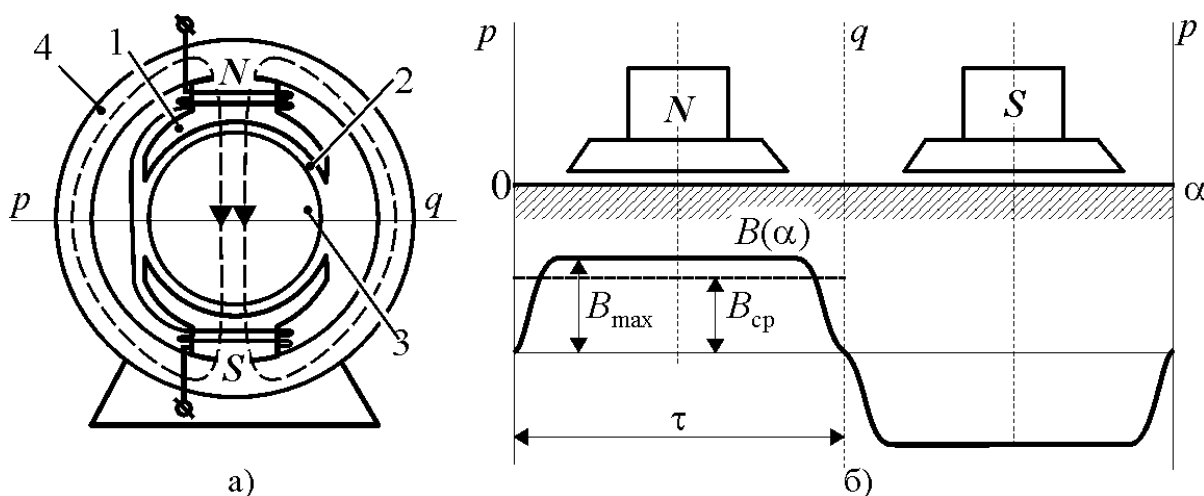


Рис. 12.5

якоря 3 и корпуса машины или ярма 4 (рис. 12.5, а).

Ось симметрии  $pq$  между главными полюсами машины называется геометрической нейтралью, а дуга окружности воздушного зазора между точка-

ми её пересечения с нейтралью – *полюсным делением*  $\tau$  (рис. 12.5). Полное деление в зависимости от решаемой задачи может измеряться в угловых или линейных единицах, а также числом пазов пакета статора или ротора.

На рис. 12.5, б показана линейная развёртка воздушного зазора и зависимость распределения индукции в нём. В машинах постоянного тока стремятся получить практически постоянное значение индукции под полюсами, что достигается специальной формой полюсных наконечников. Это необходимо для того, чтобы во всех секциях обмотки якоря при вращении наводились одинаковые ЭДС.

При рассмотрении принципа работы машины постоянного тока отмечалось, что обмотка якоря состоит из секций. Каждая секция укладывается в

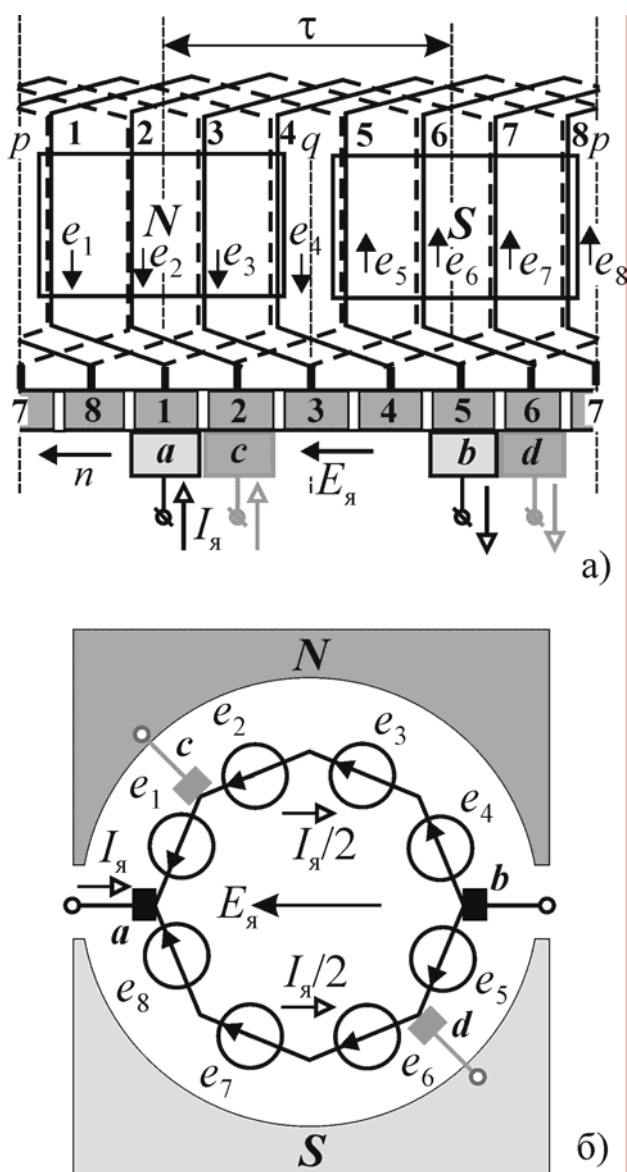


Рис. 12.6

пазы пакета якоря так, чтобы её стороны находились под соседними полюсами. В качестве примера на рис. 12.6, а показана схема обмотки. Номерами с 1 по 8 на рисунке обозначены пазы якоря и пластины коллектора. Шаг секций обмотки по пазам равен полюсному делению  $\tau = 4$ . В каждом пазу уложено начало одной секции (сплошная линия) и конец другой (штриховая линия) и к каждой пластине коллектора присоединены начала и концы следующих по схеме секций обмотки. Так в первом пазу под северным полюсом находится начало первой секции, а конец её расположен в пятом пазу под южным полюсом. Начало первой секции присоединено к первой пластине коллектора, а конец – ко второй. К этой же пластине присоединено начало следующей по схеме второй секции и т.д. В результате образуется замкнутая в кольцо последовательная электрическая цепь, состоящая из одинаковых элементов (секций).

Щётки машины в норме рас-

положены на геометрической нейтрали. Они создают узлы соединения и делают последовательную кольцевую цепь обмотки на две *параллельные ветви* (рис. 12.6, б), по каждой из которых протекает половина тока якоря  $I_{\text{я}}$ .

При вращении якоря проводники секций обмотки пересекают линии магнитного поля и в них наводятся ЭДС, по форме повторяющие кривую индукции  $B(\alpha)$  рис. 12.5, б. Начала секций 1-4 находятся под северным полюсом поля, а секций 5-8 – под южным, поэтому в этих группах секций наводятся ЭДС противоположных знаков. Но группы секций 1-4 и 5-8 находятся в разных ветвях, поэтому по отношению к щёткам или, что то же самое, по отношению к внешней цепи их ЭДС имеют одинаковое направление и в сумме одинаковые значения. В результате образуется ЭДС якоря  $E_{\text{я}}$ , направленная встречно по отношению к напряжению источника питания цепи якоря и ограничивающая его ток.

Смещение щёток с геометрической нейтрали приводит к тому, что расположенные под разноимёнными полюсами секции оказываются в одной параллельной ветви. Например, смещение щёток из положения  $ab$  на рис. 12.6 в положение  $cd$  приведёт к тому, что первая и пятая секции окажутся в ветвях с противоположным направлением ЭДС. В результате суммарная ЭДС якоря уменьшится вдвое, т.к. ЭДС секций приблизительно одинаковы и до смещения

противо-ЭДС была равна  $E_{\text{я}} = \sum_{k=1}^4 e_k = \sum_{k=5}^8 e_k \approx 4e$ , тогда как после смещения

–  $E_{\text{я}} = \sum_{k=2}^4 e_k - e_5 = \sum_{k=6}^8 e_k - e_1 \approx 2e$ . Таким образом, расположение щёток на

геометрической нейтрали обеспечивает получение максимально возможной противо-ЭДС якоря.

Вращение якоря не меняет общую картину распределения ЭДС в обмотке, т.к. секции просто переходят из одной ветви в другую с сохранением суммарного значения.

Определим значение противо-ЭДС якоря. По закону электромагнитной индукции ЭДС, наводимая в проводнике длиной  $l$ , движущемся со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле, равна  $e = Blv$ . Пусть число проводников в обмотке якоря равно  $N$ . Тогда с учётом деления их на  $a$  параллельных ветвей

$E_{\text{я}} = e \frac{N}{2a} = Blv \frac{N}{2a}$ . Полагая величину индукции в воздушном зазоре машины

$B$  равной среднему значению  $B_{\text{ср}} = \frac{\Phi}{\tau l}$  (рис. 12.4, б) и с учётом того, что

$v = \pi D n / 60$  и  $\tau = \pi D / (2p)$ , где  $D$  – диаметр якоря;  $n$  – скорость вращения в об/мин, получим

$$E_{\text{я}} = C_E n \Phi, \quad (12.1)$$

где  $C_E = \frac{pN}{60a}$  – конструктивная постоянная ЭДС;  $\Phi$  – магнитный поток в зазоре машины.

При использовании системы единиц СИ частота вращения якоря равна  $\Omega = n \frac{2\pi}{60}$ , тогда противо-ЭДС

$$E_{\text{я}} = C\Omega\Phi = \Omega\Psi, \quad (12.2)$$

где  $C = \frac{pN}{2\pi a}$  – конструктивная постоянная;  $\Psi = C\Phi$  – потокосцепление якоря.

Для электрической цепи якоря, подключённого к источнику питания постоянного тока с напряжением  $U_{\text{я}}$ , можно составить уравнение по второму закону Кирхгофа

$$U_{\text{я}} = RI_{\text{я}} + E_{\text{я}}, \quad (12.3)$$

Отсюда ток якоря

$$I_{\text{я}} = (U_{\text{я}} - E_{\text{я}}) / R. \quad (12.4)$$

Из выражений (12.2) и (12.4) следует, что при изменении скорости вращения ток якоря изменяется по величине и по направлению, т.к. от скорости линейно зависит противо-ЭДС  $E_{\text{я}}$ . Изменение направления протекания тока в якоря соответствует изменению знака мощности, потребляемой им от источника питания, т.е. изменению режима работы машины. При положительном значении тока ( $U_{\text{я}} > E_{\text{я}}$ ) машина работает в режиме двигателя или тормоза и потребляет электрическую энергию от источника, а при отрицательном ( $U_{\text{я}} < E_{\text{я}}$ ) – отдаёт её в источник.

Условие  $I_{\text{я}} = 0 \Rightarrow U_{\text{я}} = E_{\text{я}} = C_E n_0 \Phi$  соответствует режиму *идеального холостого хода машины*. Отсюда скорость идеального холостого хода

$$n_0 = \frac{U_{\text{я}}}{C_E \Phi}; \quad \Omega_0 = \frac{U_{\text{я}}}{\Psi}. \quad (12.5)$$

### 12.3. Электромагнитный момент машины

Вращающий момент, развиваемый машиной, можно получить из выражения для электромагнитной силы  $f$ , действующей на находящийся в однородном магнитном поле проводник длиной  $l$ , по которому протекает ток  $i$  –  $f = Bli$ . Пользуясь рассуждениями и выражениями, использованными выше при определении противо-ЭДС, получим

$$M = CI_{\text{я}}\Phi = I_{\text{я}}\Psi. \quad (12.6)$$

*Вопросы для самопроверки*

1. Перечислите основные участки магнитной цепи
2. Что такое геометрическая нейтраль?
3. Что такое полюсное деление?

4. Как распределяется индукция в зазоре и почему?
5. Какую электрическую цепь образуют секции обмотки якоря?
6. Как образуются параллельные ветви обмотки якоря?
7. Как влияет смещение щёток с геометрической нейтрали на ЭДС, наводимую в якоре магнитным полем главных полюсов?
8. Как влияет скорость вращения на величину тока якоря и почему?
9. Почему ЭДС, наводимая в якоре магнитным полем главных полюсов, называется противо-ЭДС?
10. Какие величины определяют величину скорости идеального холостого хода?
11. Какие величины определяют величину электромагнитного момента?

#### 12.4. Реакция якоря

Под реакцией якоря в машинах постоянного тока понимают воздействие магнитного поля, возбуждаемого током якоря, на поле главных полюсов. При разомкнутой цепи якоря в машине существует только симметричное однородное поле главных полюсов (рис. 12.7, а). При протекании тока в обмотке якоря возникает неподвижное в пространстве магнитное поле, ось которого совпадает с осью щёток (рис. 12.7, б). Складываясь, эти два поля образуют результирующее магнитное поле машины. Нейтральная линия или *физическая нейтраль* результирующего поля, т.е. линия, проходящая через точки с нулевым значением индукции в зазоре машины, оказывается развёрнутой на некоторый угол  $\gamma$  относительно геометрической нейтрали (рис. 12.7, в).

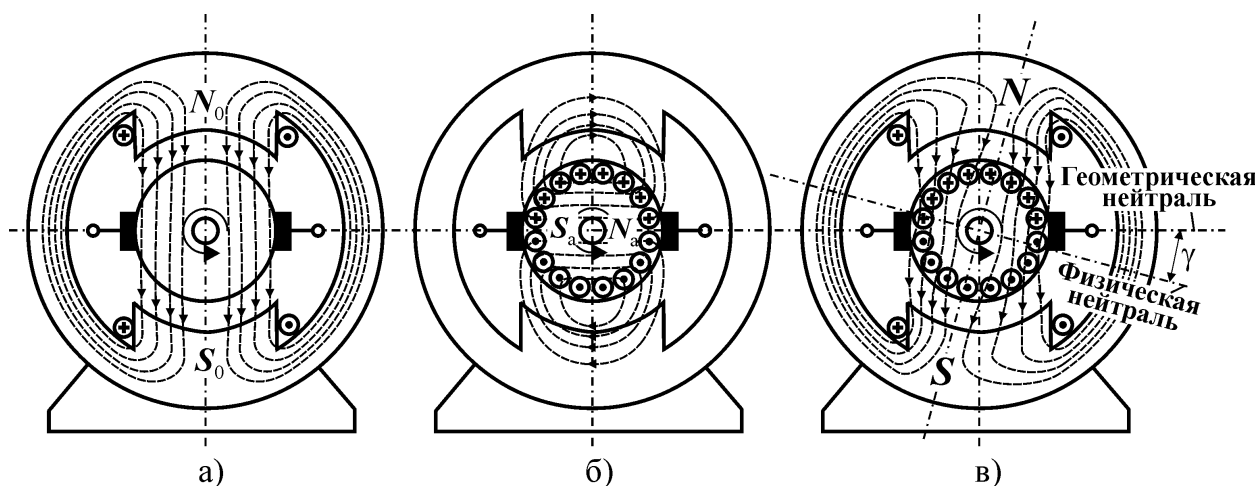


Рис. 12.7

При изменении режима работы машины изменяется направление протекания тока в якоре и, соответственно, меняются местами полюсы его магнитного поля. Поэтому смещение нейтрали в режиме генератора и в режиме двигателя имеет противоположное направление. В генераторном режиме нейтраль смещена в направлении вращения якоря, а в режиме двигателя – против направления вращения.

Вращение якоря не влияет на положение оси полюсов его магнитного поля. Однако при изменении нагрузки машины изменяется ток якоря и, соответственно, изменяется индукция магнитного поля реакции. Это, в свою очередь, приводит к изменению угла смещения  $\gamma$ .

Смещение нейтрали вызывает целый ряд отрицательных эффектов. В генераторном режиме работы машины это уменьшает ЭДС и, соответственно, выходное напряжение. В двигательном режиме часть проводников параллельной ветви оказывается под другим полюсом и создаёт тормозной момент. Смещение нейтрали создаёт также неравномерность распределения индукции на главных полюсах машины (рис. 12.7, в). Она увеличивается на одном краю полюса и уменьшается на другом, но вследствие насыщения возрастание потока на одном краю не компенсирует снижения на другом и в целом магнитный поток в машине уменьшается.

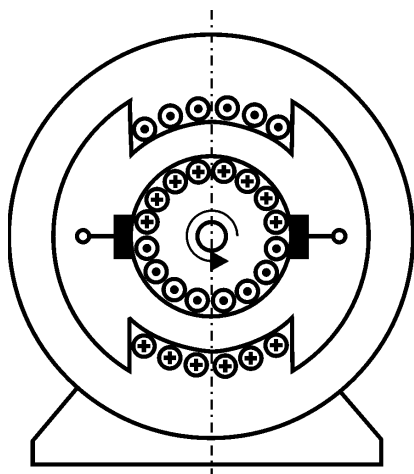


Рис. 12.8

Кроме того, смещение нейтрали существенно ухудшает условия протекания электромагнитных процессов, связанных с переключением секций из одной параллельной ветви в другую, которые мы будем рассматривать далее.

Для уменьшения искажения кривой распределения индукции в зазоре в машинах средней и большой мощности используют компенсационную обмотку (рис. 12.8). Её устанавливают в пазы главных полюсов и включают последовательно в цепь якоря. Возбуждаемое обмоткой магнитное поле направлено встречно по отношению к полю реакции якоря и компенсирует его в зоне главных полюсов.

полюсов.

В зоне геометрической нейтрали поле реакции якоря компенсируют с помощью добавочных полюсов (рис. 12.3). Обмотку добавочных полюсов также как компенсационную обмотку включают последовательно в цепь якоря. Это обеспечивает автоматическую коррекцию режима компенсации при изменении нагрузки машины, т.к. МДС всех трёх обмоток изменяются пропорционально.

#### Вопросы для самопроверки

1. Что такое реакция якоря?
2. Что такое физическая нейтраль?
3. Как влияет реакция якоря на магнитное поле машины?
4. Что происходит с физической нейтралью машины при изменении нагрузки?
5. Почему в генераторном и в двигательном режимах нейтраль смещается в противоположные стороны?



6. Перечислите явления, возникающие в машине в результате смещения нейтрали.
7. Что такое компенсационная обмотка? Её конструкция, схема включения и функции.
8. Что такое добавочные полюсы? Их конструкция, схема включения и функции.

### 12.5. Коммутация

Коммутацией называется процесс переключения секций обмотки якоря из одной параллельной ветви в другую.

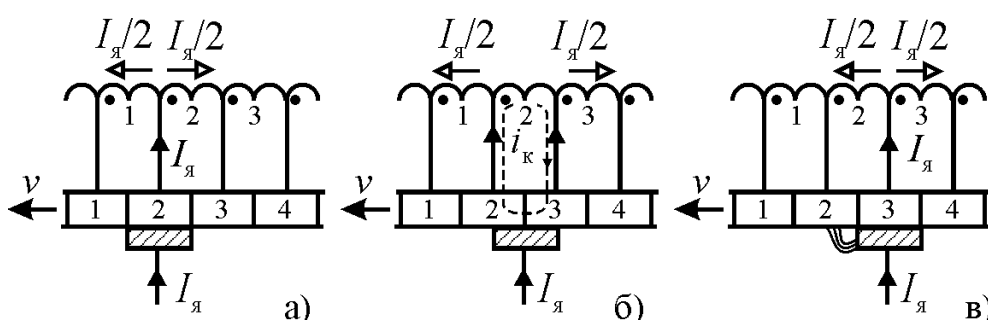


Рис. 12.9

На рис. 12.9 показаны три стадии процесса коммутации в секции 2 обмотки якоря. В начале секция 2 находится в правой

ветви обмотки и по ней от начала к концу протекает ток  $I_я/2$ . Затем щётка перемещается, замыкая 2-ю и 3-ю пластины коллектора (рис. 12.9, б), и секция 2 оказывается замкнутой накоротко. Если щётки расположены на геометрической нейтрали, то проводники коммутируемой секции при движении пересекают линии магнитного поля реакции якоря и в них наводится ЭДС  $e_v = B_a l v$ , называемая ЭДС вращения. Здесь  $B_a$  – индукция поля реакции. Кроме того, в секции наводится ЭДС самоиндукции  $e_L = -L di/dt$ . Обе ЭДС создают в контуре секции ток коммутации  $i_к$ , величина которого зависит от ЭДС и сопротивлений элементов контура.

Если ЭДС  $e_L$  и  $e_v$  направлены встречно, то возможно состояние, когда  $e_\Sigma = e_L + e_v = 0 \Rightarrow i_к = 0$ . В этом случае ток в секции изменяется по линейно-

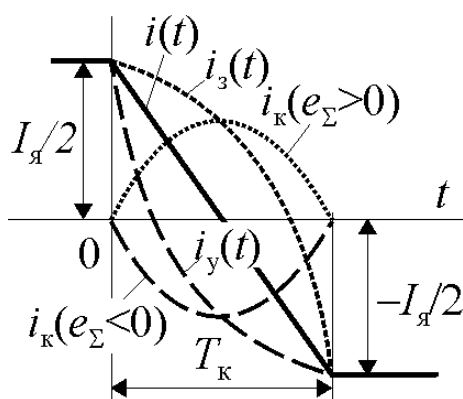


Рис. 12.10

му закону  $i(t) = I_я(1 - 2t/T_к)/2$ , определяемому изменением сопротивления площади контакта щётки с пластинами коллектора 2 и 3. Такая коммутация называется *линейной или коммутацией сопротивлением*. Она является оптимальной, т.к. при этом не возникает искрения (рис. 12.10).

В случае  $e_\Sigma = e_L + e_v \neq 0$  ток  $i_к$  накладывается на ток линейной коммутации  $i(t)$  и происходит замедленная

$i_3(t) = i(t) + i_k (e_\Sigma > 0)$  или ускоренная  $i_y(t) = i(t) + i_k (e_\Sigma < 0)$  коммутация. При замедленной коммутации  $e_L > e_v$  и переход щётки на соседнюю пластину коллектора соответствует процессу размыкания цепи с активно-индуктивной нагрузкой. Поэтому под сбегающим краем щётки возникает искрение (рис. 12.9, в), которое приводит к быстрому износу щёток и возникновению нагара на пластинах коллектора, увеличивающего переходное сопротивление скользящего контакта и вызывающего дополнительные потери.

Основным способом улучшения коммутации является установка дополнительных полюсов. Все машины постоянного тока мощностью более 1000 Вт снабжаются дополнительными полюсами. Параметрами обмотки и геометрическими размерами дополнительных полюсов можно компенсировать или даже несколько перекомпенсировать МДС реакции якоря, обеспечивая линейную или слабо ускоренную коммутацию. Это позволяет существенно увеличить нагрузку машины, т.е. снизить её удельную массу и габариты.

В машинах малой мощности дополнительные полюсы не устанавливают, а коммутацию оптимизируют смещением щёток за положение физической нейтрали. Настройку обычно производят в режиме номинальной нагрузки машины по минимуму наблюдаемого искрения. При этом в других режимах работы настройка нарушается, т.к. при изменении тока якоря положение физической нейтрали изменяется. Очевидно, что этот способ недопустим в машинах, работающих в режиме реверса, т.к. для одного из направлений вращения смещение щёток будет только ухудшать ситуацию.

Щёточно-коллекторный узел машин постоянного тока является главным элементом конструкции, определяющим предельную мощность и скорость вращения. От его работы существенно зависят также надёжность и срок службы. Поэтому коллектор и щётки требуют тщательного контроля за их состоянием, а также проведения периодических профилактических мероприятий для исключения отказов в работе. Это усложняет и удорожает эксплуатацию и является одной из главных причин, по которым машины постоянного тока заменяют бесколлекторными машинами.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Что такое коммутация?
2. Какие ЭДС наводятся в коммутируемой секции?
3. Какие стадии проходит коммутируемая секция?
4. Какой вид коммутации является оптимальным и почему?
5. При каких условиях коммутация происходит замедленно (ускоренно)?
6. Почему при замедленной коммутации возникает искрение под сбегающим краем щётки?
7. Как оптимизируют коммутацию в машинах малой мощности?
8. Почему невозможно оптимизировать коммутацию во всём диапазоне нагрузок машины путём смещения щёток?

9. Как оптимизируют коммутацию в машинах большой и средней мощности?
10. Почему с помощью дополнительных полюсов можно оптимизировать коммутацию практически во всём диапазоне нагрузок машины?

### **12.6. Энергетические соотношения машин постоянного тока**

Характер потребляемой машиной мощности зависит от режима её работы. Для генератора – это механическая мощность  $P_1 = M\Omega$ ; для двигателя – электрическая мощность  $P_1 = UI$ .

В машинах постоянного тока, также как и в других машинах, процесс преобразования энергии сопровождается её потерями. Обычно их разделяют на основные и дополнительные, включая в первую группу магнитные, электрические и механические потери, а во вторую – все остальные потери, трудно поддающиеся учёту.

Магнитные потери в машинах постоянного тока  $\Delta P_c$  связаны с перемагничиванием сердечника якоря и протеканием в нём вихревых токов. Их величина определяется скоростью вращения якоря. В конструктивных элементах статора машины, образующих магнитопровод, эти потери практически отсутствуют, т.к. магнитный поток в них постоянен.

Электрические потери происходят в цепях обмотки возбуждения и якоря машины. Потери в цепи возбуждения происходят в обмотке и в регуляторе (реостате), если он используется для управления, и выражаются через напряжение  $U_b$  и ток  $I_b$  источника питания этой цепи как  $\Delta P_b = U_b I_b$ .

Потери в цепи якоря происходят в его обмотке и в щёточных контактах и определяются соответственно как  $\Delta P_{\text{я}} = R_{\Sigma} I_{\text{я}}^2$ ;  $\Delta P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_{\text{я}}$ , где  $R_{\Sigma}$  – суммарное сопротивление обмотки якоря и регулировочного сопротивления;  $\Delta U_{\text{щ}}$  – падение напряжения на щётках, определяемое по справочным данным.

Механические потери  $\Delta P_{\text{мх}}$  связаны с трением в подшипниках опор якоря и в щёточном узле, а также с трением якоря о воздух и с перемещением воздушных масс через корпус машины.

К добавочным потерям  $\Delta P_d$  относят потери от вихревых токов в обмотках, в стали полюсных наконечников, вызванные пульсацией магнитного потока вследствие зубчатого строения пакета якоря и др. Они не поддаются точному учёту и, в зависимости от наличия или отсутствия компенсационной обмотки, принимаются равными 0,5% или 1% от подводимой или полезной мощности.

Таким образом, полные потери в машине составляют  $\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_b + \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_d$ . Отсюда можно определить КПД машины в режиме генератора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P},$$

где  $P_2 = U_2 I_2$  – электрическая мощность на выходе генератора, и двигателя

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}.$$

В этих выражениях используется только легко измеряемая электрическая мощность и расчётные значения мощности потерь.

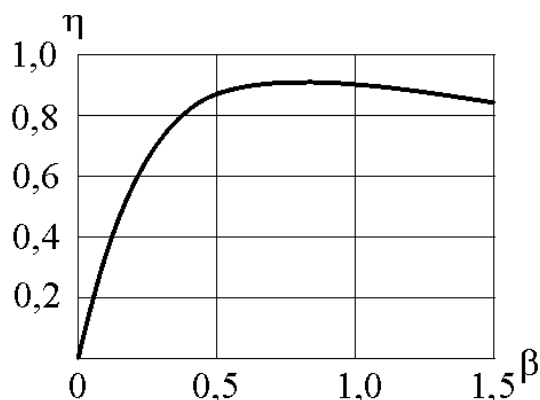


Рис. 12.11

Коэффициент полезного действия машин постоянного тока мощностью более 10 кВт составляет 0,85...0,96, причём большие значения соответствуют машинам большей мощности. У машин мощностью до 50 Вт он существенно меньше и составляет всего 0,15...0,5

Зависимость КПД от коэффициента нагрузки  $\beta = P_2 / P_{2ном}$  у машин постоянного тока имеет такой же характер как у всех остальных машин (рис. 12.11). Он

быстро снижается при малой нагрузке, поэтому недогруженную машину очень невыгодно эксплуатировать.

#### Вопросы для самопроверки

1. Что включают в основные потери?
2. Почему не учитываются магнитные потери в статоре?
3. Что включают в электрические потери в машине?
4. Что включают в механические потери в машине?
5. Что включают в добавочные потери в машине и как их учитывают?
6. Почему нельзя эксплуатировать недогруженную машину?

#### 12.7. Характеристики двигателей постоянного тока

Для разработчиков и пользователей электрических приводов важнейшими характеристиками двигателей являются механические и регулировочные характеристики. Первые определяют реакцию двигателя на нагрузку, а вторые – на управляющее воздействие. У двигателей постоянного тока эти характеристики обладают целым рядом особенностей, определивших преимущественное использование этих двигателей в регулируемых высококачественных приводах.

Уравнение механической и регулировочной характеристики можно получить подстановкой выражений для противо-ЭДС (12.2) и вращающего момента (12.6) в уравнение (12.3)

$$n = \frac{U_{\text{я}}}{C_E \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{C_E C \Phi^2} M; \quad \Omega = \frac{U_{\text{я}}}{\Psi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{\Psi^2} M. \quad (12.7)$$

В уравнениях (12.7) три величины могут быть регулируемы переменными: напряжение на якоре двигателя  $U_{\text{я}}$ , магнитный поток  $\Phi$  или потокосцепление  $\Psi$  и добавочное сопротивление  $R_{\text{д}}$ , включённое последовательно в цепь якоря. При постоянных значениях этих величин уравнение (12.7) соответствует механическим характеристикам двигателя, т.е. зависимости  $n(M)$ . При постоянной нагрузке двигателя  $M = M_c = \text{const}$  и вариации одной из трёх переменных мы получим соответствующие регулировочные характеристики –  $n(U_{\text{я}})$ ,  $n(\Phi)$  или  $n(R_{\text{д}})$ .

Механическая характеристика двигателя, полученная при номинальных значениях напряжения на якоре и тока обмотки возбуждения и отсутствии добавочного сопротивления  $R_{\text{д}} = 0$ , называется *естественной*. Все остальные механические характеристики называются *искусственными*.

### 12.7.1. Характеристики двигателей параллельного возбуждения

Электрическая цепь обмотки возбуждения двигателей параллельного возбуждения подключается параллельно цепи якоря (рис. 12.4, б). Если при этом управление двигателем производится таким образом, что напряжение в цепи обмотки возбуждения не зависит от напряжения якоря, то его характеристики будут идентичны двигателю с независимым (рис. 12.4, а) и с магнитоэлектрическим (рис. 12.4, а) возбуждением.

Уравнения механических и регулировочных характеристик двигателя соответствуют выражениям (12.7). Естественная и искусственные механические характеристики представляют собой прямые линии

$$n = n_0 - bM, \quad (12.8)$$

где:  $n_0 = \frac{U_{\text{я}}}{C_E \Phi}$  – скорость идеального холостого хода;  $b = \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{C_E C \Phi^2}$ . Линей-

ность и отрицательный наклон механических характеристик обеспечивают двигателю хорошую управляемость и устойчивость при работе с различными видами нагрузки.

Скорость холостого хода двигателя не зависит от параметров цепи якоря и определяется только напряжением на якоре  $U_{\text{я}}$  и величиной магнитного потока  $\Phi$ . Коэффициент  $b$  определяет наклон или жёсткость механической характеристики. Чем меньше величина сопротивления в числителе выражения, тем жёстче механическая характеристика и тем меньше изменения скорости вращения при изменении нагрузки. Следовательно, максимальной жёсткостью обладает естественная механическая характеристика.

Полагая  $n = 0$ , из уравнения (12.8) можно определить пусковой момент двигателя  $M_{\text{п}} = C \Phi U_{\text{я}} / (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})$ .

Направление вращения двигателя определяется знаком скорости холостого хода и может изменяться путём изменения полярности напряжения питания якоря или обмотки возбуждения. В последнем случае изменится знак (полярность) магнитного потока  $\Phi$ . Очевидно, что одновременное изменение полярности источников питания обеих цепей не приведёт к изменению направления вращения.

На рис. 12.12 показаны характеристики двигателя параллельного возбуждения при различных способах управления и схемы их реализации.

Управление двигателем путём изменения напряжения на его якорю, называемое также *якорным управлением*, является наиболее сложным и совершенным (рис. 12.12, а). При питании двигателя от источника постоянного тока  $U$  его обычно реализуют с помощью широтно-импульсного регулятора (ШИР) (см. разделы 5.3.3 и 5.4.3). Среднее значение выходного напряжения ШИР является близкой к линейной функции сигнала управления  $U_{\text{я}} \approx k \cdot s_U$ .

Механические и регулировочные характеристики двигателя при якорном управлении линейны, что очень важно для реализации высококачественных приводов. Регулирование производится вниз от номинальной скорости вращения при постоянной жёсткости механических характеристик, равной жёсткости естественной характеристики. Диапазон регулирования при этом максимален вплоть до нулевой скорости вращения. В случае использования реверсивного широтно-импульсного регулятора скорость вращения можно регулировать в пределах  $+n_{\text{ном}} \dots -n_{\text{ном}}$ .

Основным недостатком якорного управления является относительно большая мощность регулятора, т.к. он работает в цепи якоря, мощность кото-

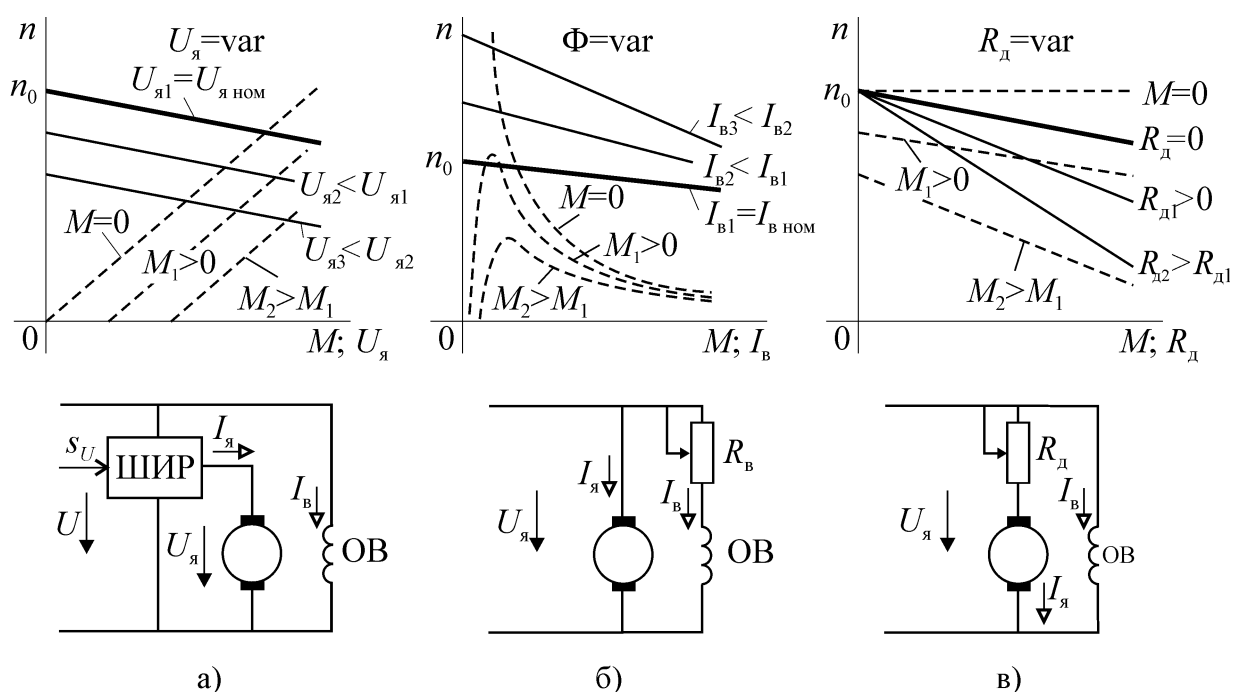


Рис. 12.12

рой в 3...4 раза больше мощности цепи обмотки возбуждения.

Регулирование скорости вращения выше номинальной в двигателях с электромагнитным возбуждением, если это возможно по условиям эксплуатации двигателя, осуществляется изменением величины магнитного потока главных полюсов и называется *полюсным управлением*.

Оно реализуется путём изменения тока обмотки возбуждения. В простейшем варианте это осуществляется с помощью включённого последовательно с обмоткой реостата (рис. 12.12, б). При необходимости автоматического или дистанционного управления для регулирования используют широтно-импульсный регулятор, аналогично схеме якорного управления рис. 12.12, а. В случае питания цепи возбуждения от источника переменного тока для регулирования используют управляемый выпрямитель.

Механические характеристики при полюсном управлении линейны, но сильная (квадратичная) зависимость жёсткости  $1/b$  от величины магнитного потока приводит к тому, что она заметно уменьшается с ростом скорости вращения (рис. 12.12, б) и двигатель сильнее реагирует на изменения момента нагрузки.

Регулировочные характеристики двигателя при полюсном управлении принципиально нелинейны. При нулевом моменте нагрузки регулировочная характеристика представляет собой гиперболу, а при нагрузке отличной от нуля – кривую второго порядка, имеющую максимум в области малых токов возбуждения. Нелинейность и неоднозначность регулировочных характеристик являются большими недостатками полюсного управления, которые нужно учитывать при разработке и эксплуатации. Достоинствами этого способа являются возможность получения при номинальном напряжении питания скоростей вращения, превышающих номинальную скорость, а также относительно малая мощность, расходуемая при регулировании.

Третий способ регулирования скорости вращения реализуется включением реостата в цепь якоря двигателя (рис. 12.12, в).

Оба вида характеристик при этом линейны, но регулирование возможно только в области скоростей вращения ниже номинальной. С увеличением сопротивления  $R_d$  жёсткость механических характеристик быстро уменьшается, а потери растут, т.к. через реостат протекает весь ток якоря двигателя. Диапазон регулирования зависит от нагрузки и при малом моменте регулирование становится вообще невозможным. Единственным достоинством этого способа является простота реализации, но в современных приводах он находит применение только в устройствах ограничения пусковых токов.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Что такое механические характеристики?
2. Какие способы регулирования скорости вращения возможны для двигателей постоянного тока?

3. Что такое естественная (искусственная) механическая характеристика?
4. Что такое жёсткость механической характеристики?
5. Какие параметры определяют жёсткость механической характеристики двигателя независимого возбуждения?
6. Какая механическая характеристика двигателя независимого возбуждения обладает максимальной жёсткостью?
7. Какие параметры определяют пусковой момент двигателя независимого возбуждения?
8. Как изменить направление вращения двигателя независимого возбуждения?
9. Какой вид имеют регулировочные характеристики двигателя независимого возбуждения при якорном управлении?
10. В каком диапазоне можно регулировать скорость вращения двигателя независимого возбуждения при якорном управлении?
11. Какими средствами реализуется регулирование скорости вращения двигателя независимого возбуждения при якорном управлении?
12. Какими средствами реализуется регулирование скорости вращения двигателя независимого возбуждения при полюсном управлении?
13. В каком диапазоне можно регулировать скорость вращения двигателя независимого возбуждения при полюсном управлении?
14. Укажите достоинства и недостатки якорного управления двигателем независимого возбуждения?
15. Укажите достоинства и недостатки полюсного управления двигателем независимого возбуждения?
16. Укажите достоинства и недостатки управления двигателем независимого возбуждения с помощью реостата в цепи якоря?

#### 12.7.2. Тормозные режимы двигателей параллельного возбуждения

Тормозные режимы в электрических машинах возникают при изменении знака вращающего момента или скорости вращения. Механическая мощность машины при этом становится отрицательной, т.е. вращение ротора происходит за счёт энергии нагрузки на валу машины. Следовательно, тормозные режимы соответствуют участкам механических характеристик, расположенным во втором и в четвёртом квадрантах (рис. 12.13).

Торможение с отдачей энергии в сеть или *рекуперативное торможение* двигателя соответствует встречному направлению протекания тока в якоре по отношению к напряжению (участок *ab* на рис. 12.13). Из выражения (12.4) это соответствует условию  $E_{\text{я}} > U_{\text{я}} \Leftrightarrow C_E n \Phi > U_{\text{я}} \Rightarrow n > U_{\text{я}} / (C_E \Phi) = n_0$ , которое можно выполнить либо повышением скорости вращения, либо понижением значения скорости холостого хода  $n_0$ . В первом случае двигатель разгоняется за счёт вращающего момента, действующего на вал двигателя со стороны нагрузки и может находиться в этом режиме длительное время, на-



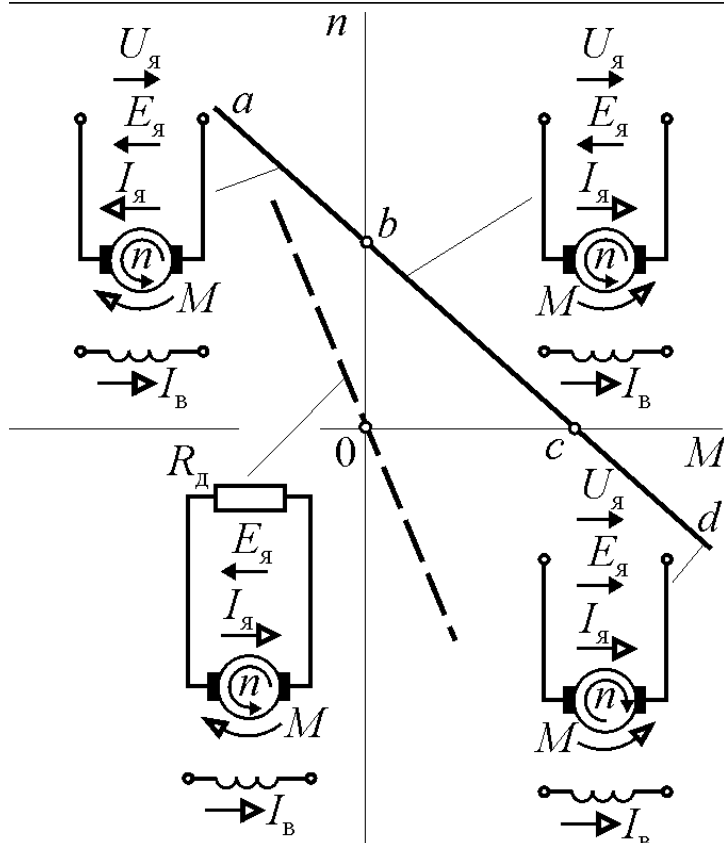


Рис. 12.13

*cd* на рис. 12.13) соответствует согласному направлению действия ЭДС и напряжения якоря, т.е. переход в этот режим возможен при изменении полярности одной из величин. В соответствии с (12.2), направление действия ЭДС якоря зависит от направления вращения и направления магнитного потока главных полюсов машины. Направление вращения двигателя может измениться при увеличении момента нагрузки до значения, превышающего пусковой момент  $M_c > M_n$ . Тогда двигатель вначале остановится, а затем изменит направление вращения и перейдёт в тормозной режим. Длительная работа в этом режиме опасна, т.к. при этом вся энергия, получаемая двигателем от источника питания и от нагрузки, рассеивается в нём в виде тепла. Кратковременно режим торможения формируют при остановке и при реверсе. Для этого изменяют полярность питания якоря или обмотки возбуждения. После чего двигатель останавливается и, если при этом питание не отключается, а  $M_c < M_n$ , то разгоняется в противоположном направлении. Согласное действие ЭДС и напряжения питания при торможении и реверсировании создаёт в цепи якоря ток, многократно превышающий номинальное значение. Поэтому при переходе в тормозной режим для ограничения тока в цепь якоря включают добавочное сопротивление.

Очень эффективным и часто используемым на практике является режим *динамического торможения*. Он формируется путём отключения цепи якоря от источника питания и замыкания её на добавочное сопротивление (рис.

пример, при движении транспортного средства под уклон. Во втором – скорость холостого хода понижается путём понижения напряжения на якоре  $U_я$  или увеличения тока возбуждения, т.е. увеличения магнитного потока главных полюсов  $\Phi$ . Это может происходить при якорном или полюсном регулировании скорости вращения. Переход в генераторный режим в этом случае носит кратковременный характер, и после снижения скорости машина возвращается в двигательный режим.

Режим *электромагнитного тормоза или торможения* противовключением (участок

12.13). Уравнение механической характеристики для этого режима работы получается из (12.7) при условии  $U_{я} = 0$

$$n = -\frac{R_{я} + R_{д}}{C_E C\Phi^2} M. \quad (12.9)$$

Выражение (12.9) является уравнением прямой линии, проходящей через начало координат и расположенной во втором и четвёртом квадрантах (штриховая линия на рис. 12.13). Название этого вида торможения связано с тем, что тормозной момент возникает только в динамике, т.е. при вращении якоря.

Режим динамического торможения является генераторным режимом, в котором механическая энергия, подведённая к ротору со стороны нагрузки, преобразуется в электрическую энергию, а затем рассеивается в виде тепла в активных сопротивлениях цепи якоря.

Эффективность торможения при прочих равных условиях зависит от величины добавочного сопротивления  $R_{д}$ . Оно уменьшает жёсткость тормозной характеристики и ограничивает тем самым тормозной момент и ток в цепи якоря. Кроме того, на добавочном сопротивлении рассеивается часть энергии, которая в противном случае рассеивалась бы в обмотке якоря.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Перечислите возможные режимы торможения двигателей независимого возбуждения.
2. По какому признаку можно определить тормозной режим на механической характеристике?
3. Как перевести двигатель независимого возбуждения в режим рекуперативного (динамического) торможения?
4. Как перевести двигатель независимого возбуждения в режим торможения противовключением?
5. Почему в режиме противовключения ток двигателя превосходит пусковой ток?
6. Во что преобразуется кинетическая энергия вращающихся масс при динамическом (рекуперативном) торможении?
7. Какой режим торможения является оптимальным с точки зрения преобразования энергии?

#### 12.7.3. Характеристики двигателей последовательного возбуждения

Двигатель последовательного возбуждения отличается от двигателя параллельного возбуждения наличием электрической связи между цепями якоря и возбуждения  $I_{в} = I_{я}$ . Поэтому уравнение механической характеристики можно получить из уравнения (12.7), если ввести в него эту зависимость. Полагая магнитную цепь двигателя ненасыщенной, определим магнитный поток главных полюсов машины как  $\Phi = kI_{в} = kI_{я}$ , где  $k$  – некоторый постоянный

коэффициент. Тогда электромагнитный момент и поток двигателя из (12.6) будут равны

$$M = C\Phi I_{\text{я}} = CkI_{\text{я}}^2 \Rightarrow \Phi = \sqrt{Mk/C}. \quad (12.10)$$

Подставляя выражение для  $\Phi$  в уравнение (12.7), получим

$$n = q \left( \frac{U}{\sqrt{M}\sqrt{Ck}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{Ck} \right); \quad \Omega = \frac{U}{\sqrt{M}\sqrt{Ck}} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{Ck}, \quad (12.11)$$

где  $q = C/C_E = 60/(2\pi)$ .

Из уравнения (12.11) следует, что механические характеристики двигателя последовательного возбуждения нелинейны. Причём, при уменьшении момента нагрузки  $M \rightarrow 0$  скорость вращения стремится к бесконечности, что создаёт опасность разрушения двигателя при малых нагрузках и принципиальную невозможность создания режима холостого хода, а также режима рекуперативного торможения.

При увеличении нагрузки  $M \rightarrow \infty$  и скорость вращения стремится к асимптоте с ординатой  $n_{\infty} = -q \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{д}}}{Ck}$ .

При пуске ЭДС вращения равна нулю и ток в цепи ограничивается только сопротивлениями последовательно соединённых обмоток и добавочным сопротивлением  $I_{\text{я}} = U/(R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{в}})$ . Тогда из (12.10) пусковой момент дви-

$$\text{гателя} - M_{\text{п}} = Ck \left( \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{д}} + R_{\text{в}}} \right)^2.$$

Механические характеристики двигателей последовательного возбуждения имеют гиперболический характер (рис. 12.14) и обеспечивают устойчивую работу практически при любом характере нагрузки.

Поскольку у двигателей последовательного возбуждения вращающий момент  $M \equiv I_{\text{я}}^2$ , а у двигателей параллельного возбуждения  $M \equiv I_{\text{я}}$ , то при той же кратности пускового тока двигатель последовательного возбуждения будет развивать значительно больший момент. Кроме того, у двигателей параллельного возбуждения естественная механическая характеристика жёсткая ( $\Omega \approx \text{const}$ ) и можно считать, что мощность на валу приблизительно пропорциональна моменту  $P_2 = \Omega M \equiv M$ . В то время как у двигателей последовательного возбуждения  $n \approx U/\sqrt{M} \Rightarrow P_2 \equiv \sqrt{M}$  и при изменении нагрузочного момента в широких пределах мощность меняется существенно меньше, чем у двигателей параллельного возбуждения. Поэтому для двигателей последовательного возбуждения перегрузки по моменту менее опасны и эти двигатели имеют существенные преимущества при эксплуатации в приводах с тяжёлыми условиями пуска и изменений нагрузки. До недавнего времени они широко применялись в электротранспорте и в подъемно-транспортных механизмах, но с развитием преобразовательной техники их

всё чаще заменяют более надёжными и дешёвыми асинхронными двигателями.

Регулирование скорости вращения двигателей последовательного возбуждения возможно теми же способами, что и двигателей параллельного возбуждения.

На рис. 12.14, а показаны характеристики и схема регулирования скорости двигателя с помощью управляемого выпрямителя (УВ), питающегося от сети переменного тока. При уменьшении напряжения характеристики становятся «мягче», пусковой момент уменьшается, но положение асимптоты, к которой стремится скорость вращения при увеличении нагрузки, сохраняется.

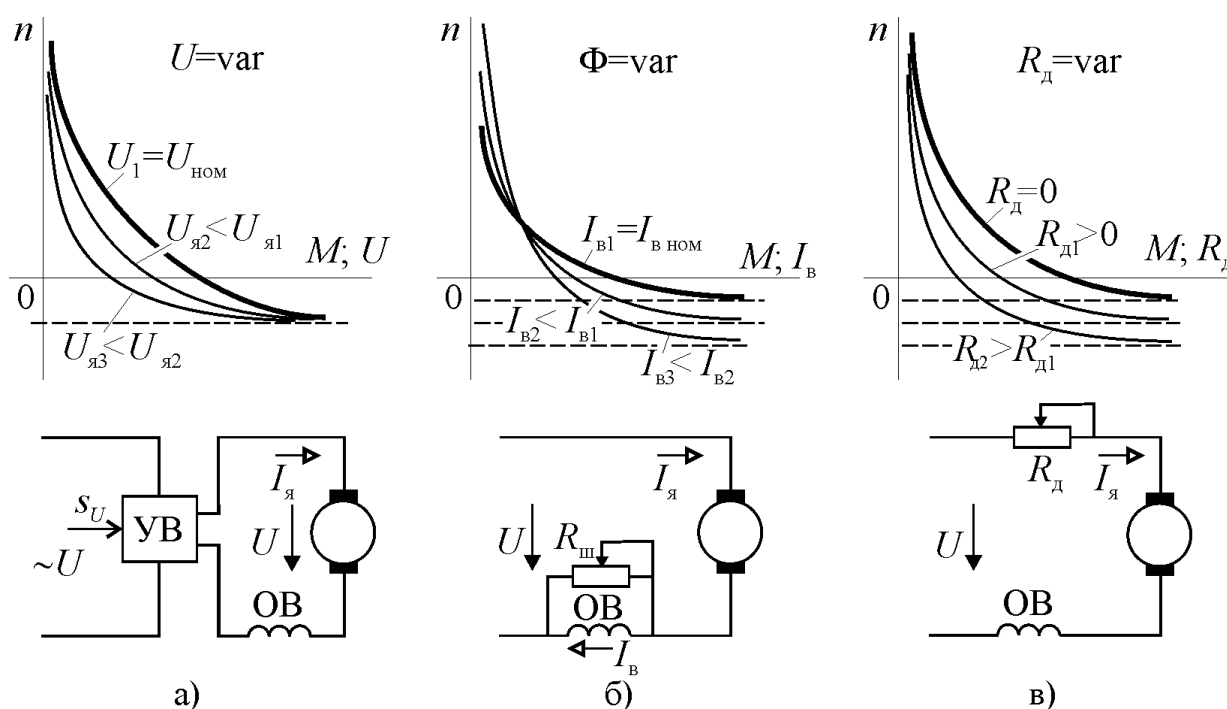


Рис. 12.14

Управление магнитным потоком в двигателях последовательного возбуждения обычно осуществляют с помощью реостата  $R_{ш}$ , шунтирующего обмотку возбуждения. При уменьшении сопротивления шунта ток в обмотке возбуждения уменьшается. Механические характеристики становятся мягче, и асимптота скорости вращения смещается вниз.

Похожая картина наблюдается при увеличении добавочного сопротивления  $R_{д}$ , с той лишь разницей, что искусственные характеристики не пересекают естественную характеристику.

#### 12.7.4. Тормозные режимы двигателей последовательного возбуждения

Перевод двигателя последовательного возбуждения в генераторный режим вращающим моментом нагрузки невозможен, т.к. скорость холостого хода у него равна бесконечности, что выражается в отсутствии участка механической характеристики во втором квадранте. Поэтому рекуперативное

торможение осуществляют переключением обмотки возбуждения на параллельное соединение.

Режимы торможения противовключением и динамического торможения можно получить также как в двигателях параллельного возбуждения.

### 12.7.5. Характеристики двигателей смешанного возбуждения

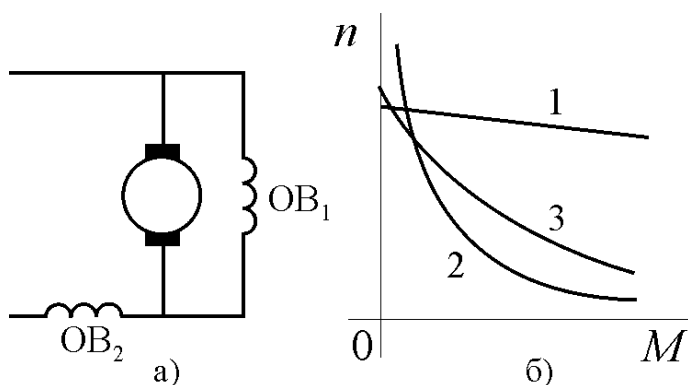


Рис. 12.15

Двигатели последовательного возбуждения имеют ряд преимуществ перед двигателями с параллельным возбуждением, но опасность разрушения двигателя при малых нагрузках, а также некоторая сложность режима рекуперации энергии заставляют принимать меры, исключающие эти недостатки.

Для этого на полюсах двигателя наматывают две обмотки. Одну из них включают параллельно обмотке якоря  $OB_1$ , а другую – последовательно  $OB_2$  (рис. 12.15, а). В зависимости от числа витков и величины тока в обмотках соотношение МДС обмоток может быть разным. Обычно МДС одной из обмоток в номинальном режиме составляет около 70% общей МДС, и эта обмотка считается основной. Кроме того, обмотки могут быть включены согласно или встречно. При всех этих комбинациях получаются различные характеристики и свойства двигателя. Наиболее часто встречаются двигатели, у которых обмотки соединены согласно и основной является параллельная обмотка.

Механическая характеристика двигателя смешанного возбуждения 3 представляет собой нечто среднее между характеристиками двигателей параллельного 1 и последовательного 2 возбуждения (рис. 12.15, б). Она позволяет получить значительный пусковой момент и обеспечивает устойчивую работу при любом характере нагрузки двигателя. При этом исключается возможность чрезмерного повышения скорости вращения при холостом ходе. Используя шунтирующие и добавочные сопротивления в цепях обмоток возбуждения можно получить практически любую промежуточную механическую характеристику.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Чем объясняется увеличение скорости вращения двигателя последовательного возбуждения при уменьшении нагрузки на валу?
2. Почему в двигателях последовательного возбуждения невозможно создать режим рекуперативного торможения повышением скорости вращения?
3. Укажите достоинства, недостатки и область применения двигателей последовательного возбуждения.

4. Как реализуют рекуперативное (динамическое) торможение в двигателях последовательного возбуждения?
5. Как реализуют реверсирование в двигателях последовательного возбуждения?
6. Какое включение обмоток чаще всего используется в двигателях смешанного возбуждения?

### **12.8. Исполнительные двигатели постоянного тока**

В системах автоматики и телемеханики находят широкое применение исполнительные двигатели постоянного тока. Это связано с тем, что двигатели постоянного тока позволяют просто, плавно и экономично регулировать скорость вращения в очень широком диапазоне. При этом они устойчиво работают при любых скоростях вращения и любом характере нагрузки. По массе и габаритам они в два-три раза меньше асинхронных двигателей.

Основным недостатком двигателей постоянного тока, ограничивающим область их применения, является наличие коллектора и щёток. Искрение при работе коллектора приводит к подгоранию контактов, изменению их переходного сопротивления и, как следствие, к нестабильности характеристик двигателя. Это требует систематического ухода за коллектором и щётками в процессе эксплуатации и снижает надёжность узлов и агрегатов, в которых используются двигатели.

Кроме того, из-за искрения коллекторные двигатели нормального исполнения не могут работать во взрывоопасных средах и требуют установки устройств подавления радиопомех, возникающих при их работе.

По конструкции исполнительные двигатели делятся на двигатели обычного исполнения, двигатели с беспазовым якорем и малоинерционные двигатели.

Двигатели обычного исполнения отличаются от силовых двигателей постоянного тока только тем, что имеют шихтованный магнитопровод статора. Это связано с необходимостью минимизации потерь в стали, т.к. эти двигатели значительную часть времени работают в переходных режимах с изменяющимся основным магнитным потоком.

Двигатели с беспазовым якорем отличаются от обычных двигателей тем, что обмотка якоря располагается на цилиндрической поверхности якоря. Это увеличивает воздушный зазор двигателя и требует увеличения тока возбуждения, но позволяет существенно снизить индуктивность обмотки якоря и за счёт этого улучшить условия коммутации. Кроме того, беспазовая конструкция позволяет уменьшить момент инерции якоря и увеличить быстродействие двигателя.

Одним из недостатков двигателей постоянного тока обычного исполнения является относительно большой момент инерции якоря, снижающий их быстродействие. Для уменьшения момента инерции якоря применяются различные конструктивные решения, одним из которых является использование

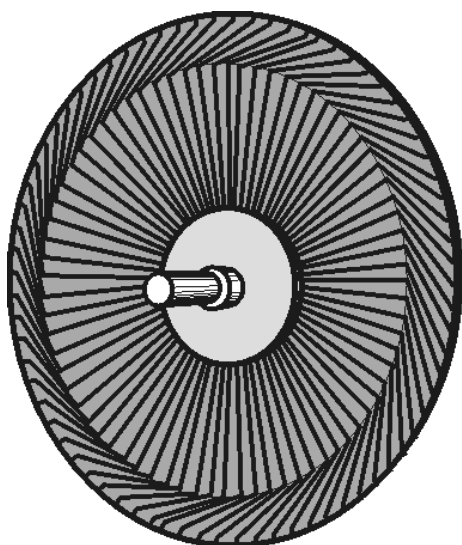


Рис. 12.16

обмотки якоря изготовленной печатным способом на немагнитном диске или цилиндре. Такая конструкция значительно повышает технологичность изготовления якоря и существенно снижается его момент инерции, т.к. якорь представляет собой лёгкий тонкий немагнитный диск или цилиндр, на который нанесена обмотка в виде тонких полос медной фольги (рис. 12.16). Малая индуктивность обмотки улучшает условия коммутации, а отсутствие ферромагнитного сердечника якоря исключает потери в стали. Однако якорь с печатной обмоткой имеет малую механическую и термическую прочность, что может вызывать его коробление и отказ двигателя в работе. Другим существенным недостатком является большой

немагнитный промежуток, состоящий из двух воздушных зазоров и толщины якоря. Поэтому двигатели с печатным якорем возбуждаются постоянными магнитами, т.к. использование обмотки возбуждения привело бы к значительным потерям в ней, из-за необходимости создания больших МДС (токов) для проведения потока через большой немагнитный участок магнитной цепи. Кроме того, это существенно увеличило бы массу и габариты двигателя.

Обмотку якоря малоинерционных двигателей выполняют также на немагнитных дисках или цилиндрах, но делают это обычным проводом с последующей заливкой полимерным составом. В результате образуется монолитный цилиндр или диск с проводниками обмотки, расположенными внутри. Такая технология более сложная и трудоёмкая, чем печатная, но позволяет увеличить механическую прочность конструкции якоря.

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Чем объясняется широкое применение двигателей постоянного тока в устройствах автоматики?
2. Что ограничивает применение исполнительных двигателей постоянного тока?
3. Чем отличаются исполнительные двигатели постоянного тока от двигателей общего применения?
4. Какие конструкции ротора используются в исполнительных двигателях постоянного тока?

### **12.9. Коллекторные двигатели переменного тока**

Вращающий момент двигателя создаётся в результате взаимодействия тока, протекающего в обмотке якоря, с магнитным полем главных полюсов. При изменении направления тока якоря или полярности магнитного поля направление действия вращающего момента меняется на противоположное, что

и используется для изменения направления вращения. В случае одновременного изменения направлений тока в обмотке якоря  $i_{\text{я}}$  и в обмотке возбуждения  $i_{\text{в}}$  вращающий момент будут действовать в прежнем направлении. Поэтому, если двигатель постоянного тока подключить к сети переменного тока, то он будет работать, создавая вращающий момент  $m$ , изменяющийся во времени по синусоидальному закону с двойной частотой по отношению к частоте сети и с некоторым постоянным средним значением  $M$  (рис. 12.17).

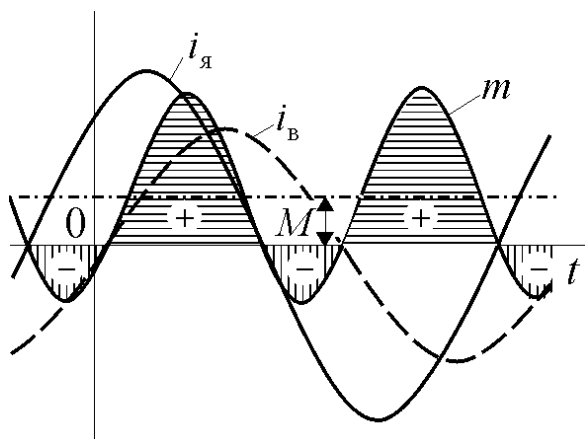


Рис. 12.17

Пренебрегая потерями в магнитопроводе и вихревыми токами в короткозамкнутых витках обмотки якоря, можно считать, что величина среднего значения момента зависит от сдвига фаз между токами обмотки якоря и обмотки возбуждения. При нулевом сдвиге фаз вращающий момент будет всегда положительным с максимально возможным средним значением. Величина фазового сдвига зависит от многих факторов, но, при прочих равных условиях, у двигателей с параллельным возбуждением она существенно больше, чем у двигателей с последовательным возбуждением. Поэтому коллекторные двигатели переменного тока с параллельным возбуждением практически не применяются.

Переменный магнитный поток наводит в коммутируемых секциях коллекторного двигателя трансформаторную ЭДС, компенсировать которую с помощью дополнительных полюсов можно только для какой-либо одной скорости вращения. Поэтому условия коммутации в этих двигателях значительно хуже, чем в двигателях постоянного тока.

Характеристики и свойства коллекторных двигателей переменного тока аналогичны характеристикам двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением. Маломощные двигатели находят широкое применение в промышленных и бытовых устройствах, где требуется получить высокие скорости вращения (до 30000 об/мин) и возможность плавного регулирования скорости в большом диапазоне.

*Вопросы для самопроверки*



1. Будет ли двигатель постоянного тока создавать вращающий момент, если его подключить к источнику питания переменного тока?
2. Чем отличается конструкция статора коллекторного двигателя переменного тока от конструкции статора двигателя постоянного тока?
3. Почему в коллекторных двигателях переменного тока в основном используется схема с последовательным включением обмотки возбуждения?
4. Почему условия коммутации в двигателе переменного тока хуже, чем в двигателе постоянного тока?
5. Укажите достоинства, недостатки и область применения коллекторных двигателей переменного тока.