

# **АВИАЦИОННЫЕ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ**

Лекция 15

**15.1 Принцип действия генератора и двигателя  
постоянного тока.**

**15.2 Устройство коллекторной машины постоянного  
тока.**

**15.3 Электродвижущая сила и электромагнитный  
момент машины постоянного тока.**

## 15.1 Принцип действия генератора и двигателя постоянного тока.

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них коллектора — механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим действие щеточно-коллекторного механизма на примере модели машины, работающей в режиме генератора (рис. 15.1).

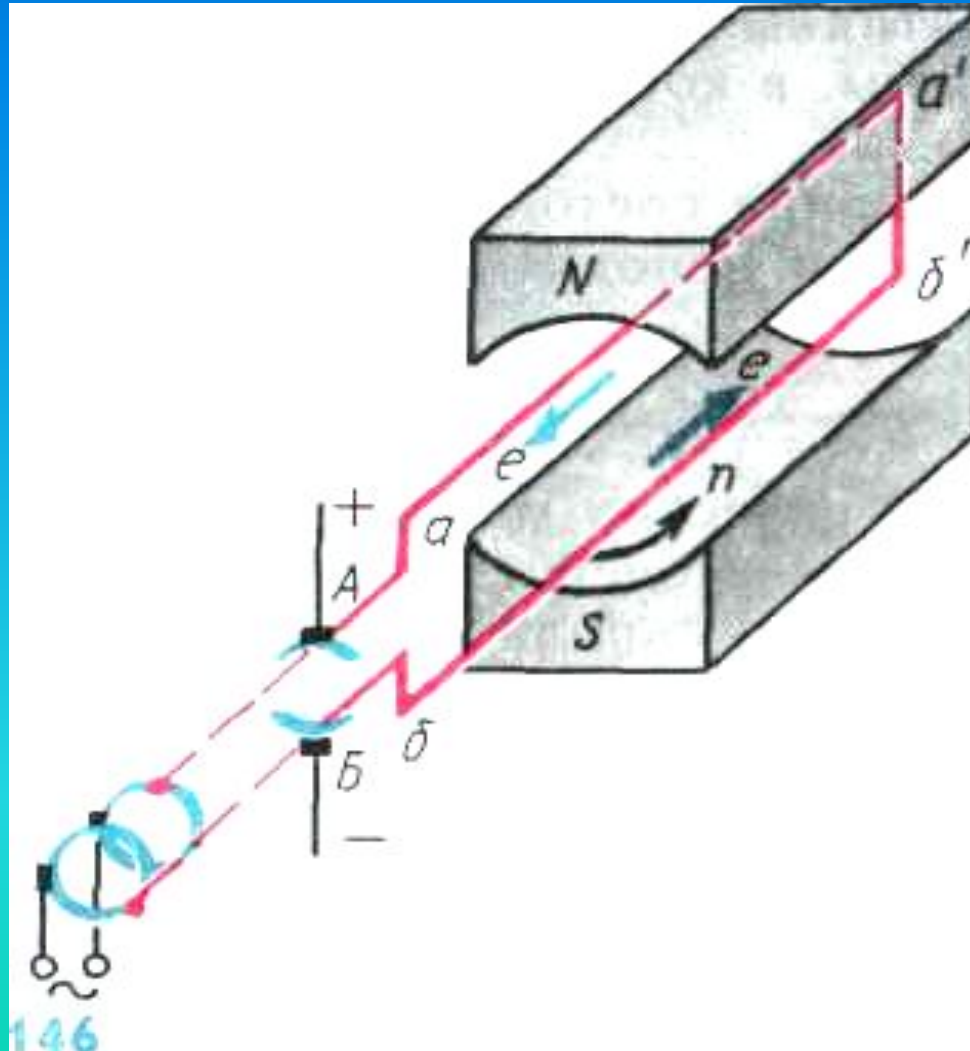


Рис. 15.1. Принцип действия машины постоянного тока

В магнитном поле полюсов N—S вращается цилиндр, на котором расположен виток — два проводника, соединенные между собой — с двумя активными сторонами (проводниками  $aa'$  и  $bb'$ ). В верхнем и нижнем положении одного из проводников витка индуцируемая в нем ЭДС  $E$  имеет разные направления. За период (один оборот) среднее значение ЭДС равно нулю.

Если проводники подключены к двум пластинам, по которым скользят щетки А и Б, то при переходе проводников от одного полюса к другому направление их ЭДС переключится от щетки А на щетку Б, и полярность ЭДС на щетках останется прежней. При этом электромагнитный момент сохранит прежнее направление.

При работе машины в режиме двигателя с помощью щеточно-коллекторного механизма изменяется направление тока в проводниках, когда они переходят из зоны северного в зону южного полюса. Тем самым создается постоянное взаимодействие полей статора и ротора, и, следовательно, непрерывное преобразование электрической энергии в механическую.

Переключение направления тока в проводниках посредством щеточно-коллекторного механизма называется *коммутацией*.

## 15.2 Устройство коллекторной машины постоянного тока

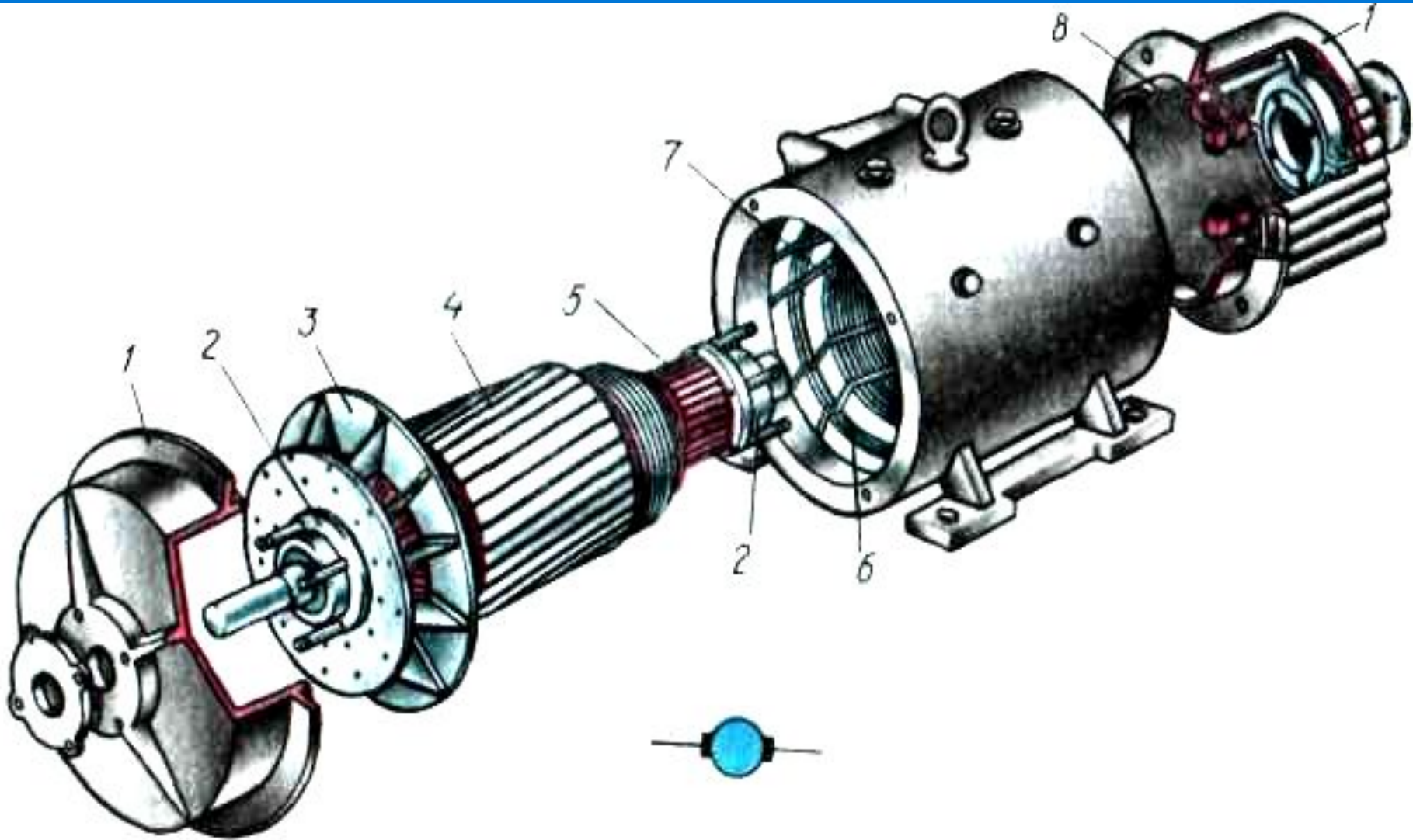


Рис. 15.2. Устройство машины постоянного тока

Конструкция электрической машины постоянного тока включает (рис. 13.2): подшипниковые щиты 1, подшипники 2, вентилятор 3, якорь 4, коллектор 5, главный 6 и дополнительный 7 полюсы и щеткодержатель с траверсой 8. Условное обозначение такой машины приведено на том же рисунке.

Статор. Состоит из станины и главных полюсов.

*Станина* служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины.

Станину изготавливают из стали — материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы для крепления машины к фундаментной плите, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов.

Главные полюсы предназначены для создания в машине магнитного поля возбуждения. Главный полюс состоит из сердечника и полюсной катушки.



Со стороны, обращенной к якорю сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1-2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например, марки 3411.

Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря.

Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния главных и добавочных полюсов.

В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными — намоткой медного обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку (рис. 15.3, а).

В большинстве машин (мощностью 1 *kВт* и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса (рис. 15.3, б).

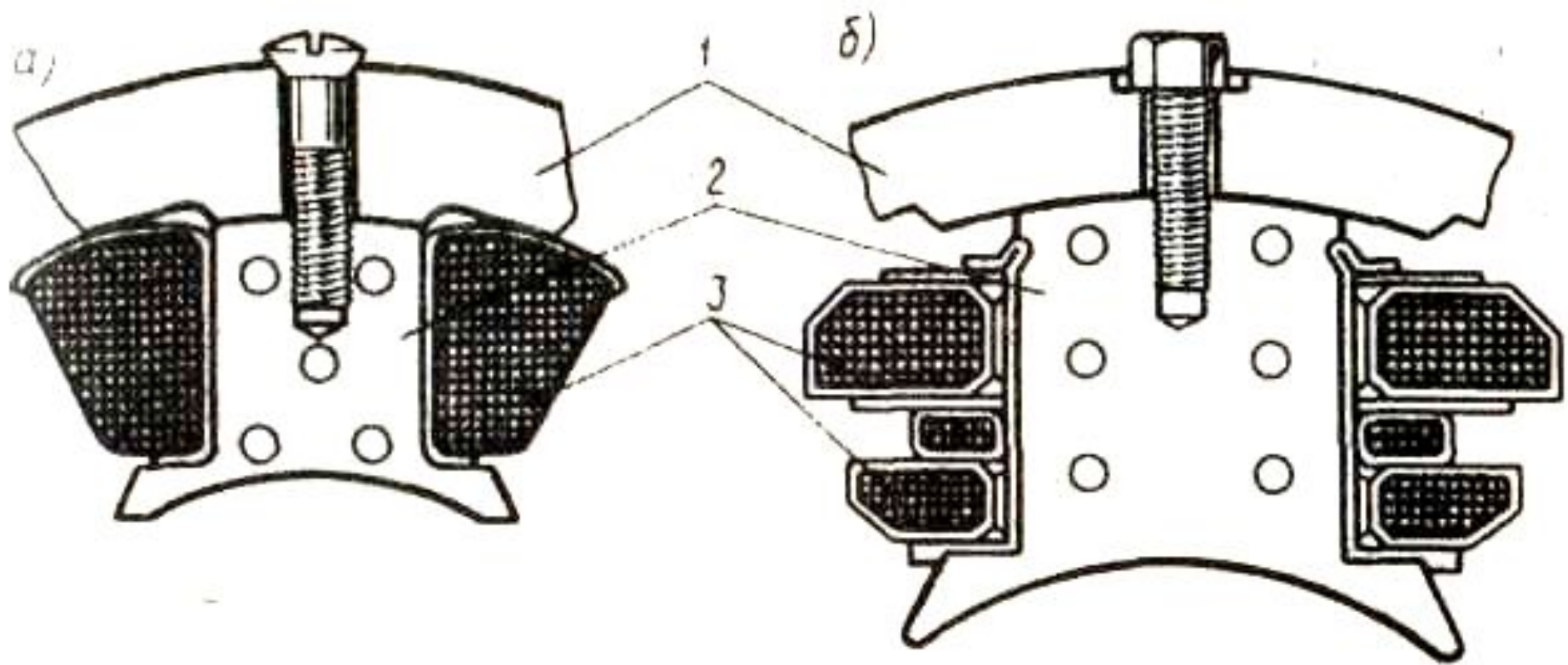


Рис. 15.3. Главные полюсы с бескаркасной (а) и каркасной (б) полюсными катушками

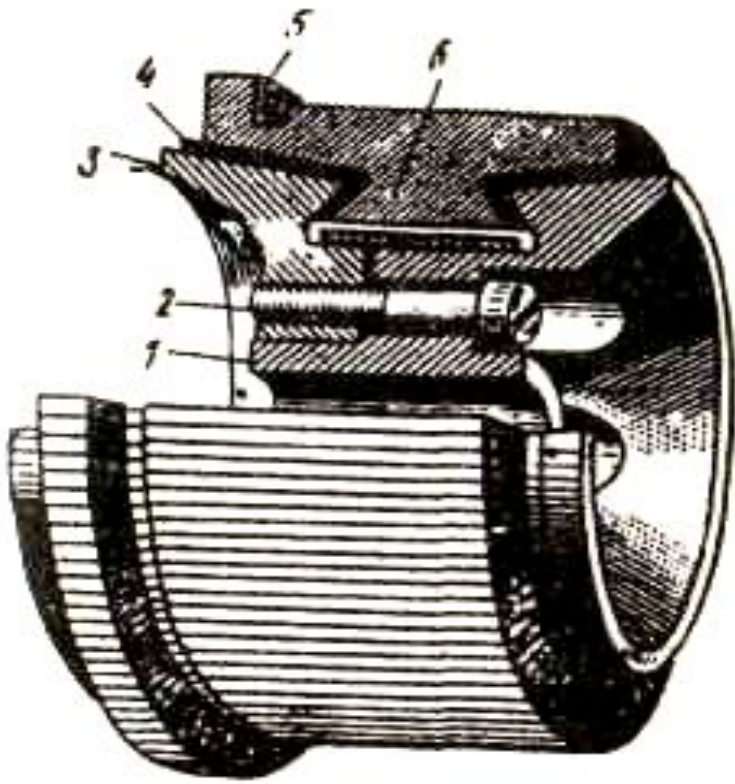
В некоторых конструкциях машин полюсную катушку для более интенсивного охлаждения разделяют по высоте на части, между которыми оставляют вентиляционные каналы.

Якорь. Якорь машины постоянного тока состоит из вала, сердечника с обмоткой и коллектора. *Сердечник якоря* имеет шихтованную конструкцию и набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали. Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле.

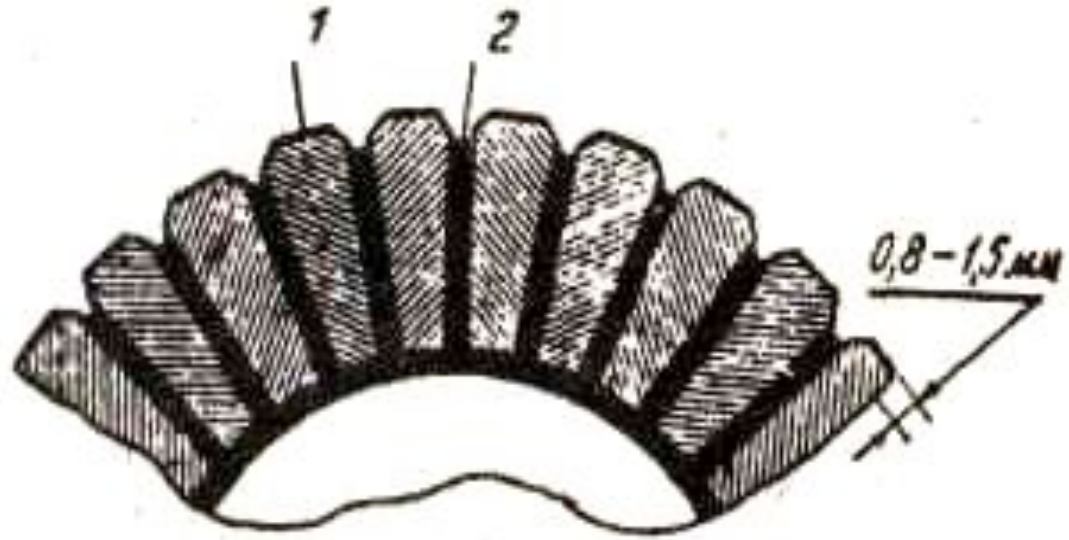
на поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы; в которые укладывают обмотку якоря.

Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части обмотки

Коллектор является одним из сложных узлов машины постоянного тока. Основными элементами коллектора являются пластины трапецеидального сечения из твердотянутой меди, собранные таким образом, что коллектор приобретает цилиндрическую форму. В зависимости от способа закрепления коллекторных пластин различают два основных типа коллекторов: со стальными конусными шайбами и на пластмассе. На рис. 15.4, а показано устройство коллектора со стальными конусными шайбами.



а)



б)

Рис. 15.4. Устройство коллектора с конусными шайбами



Нижняя часть коллекторных пластин 6 имеет форму «ласточкина хвоста». После сборки коллектора эти части пластин оказываются зажатыми между стальными шайбами 1 и 3, изолированными от медных пластин миканитовыми манжетами 4. Конусные шайбы стянуты винтами 2.

Между медными пластинами расположены миканитовые изоляционные прокладки. В процессе работы машины рабочая поверхность коллектора постепенно истирается щетками.

Чтобы при этом миканитовые прокладки не выступали над рабочей поверхностью коллектора, что вызвало бы вибрацию щеток и нарушение работы машины, между коллекторными пластинами фрезеруют пазы (дорожки) на глубину до 1,5 мм (рис. 15.4, б). Верхняя часть 5 коллекторных пластин (см. рис. 15.4, а), называемая петушком, имеет узкий продольный паз, в который закладывают проводники обмотки якоря и тщательно припаивают.

В машинах постоянного тока малой мощности часто применяют *коллекторы на пластмассе*, отличающиеся простотой в изготовлении. Набор медных и миканитовых пластин в таком коллекторе удерживается пластмассой, запрессованной в пространство между набором пластин и стальной втулкой 4 и образующей корпус коллектора. Иногда с целью увеличения прочности коллектора эту пластмассу 2 армируют стальными кольцами 3 (рис. 15.5). В этом случае миканитовые прокладки должны иметь размеры большие, чем у медных пластин 1, что исключит замыкание пластин стальными (армирующими) кольцами 3.

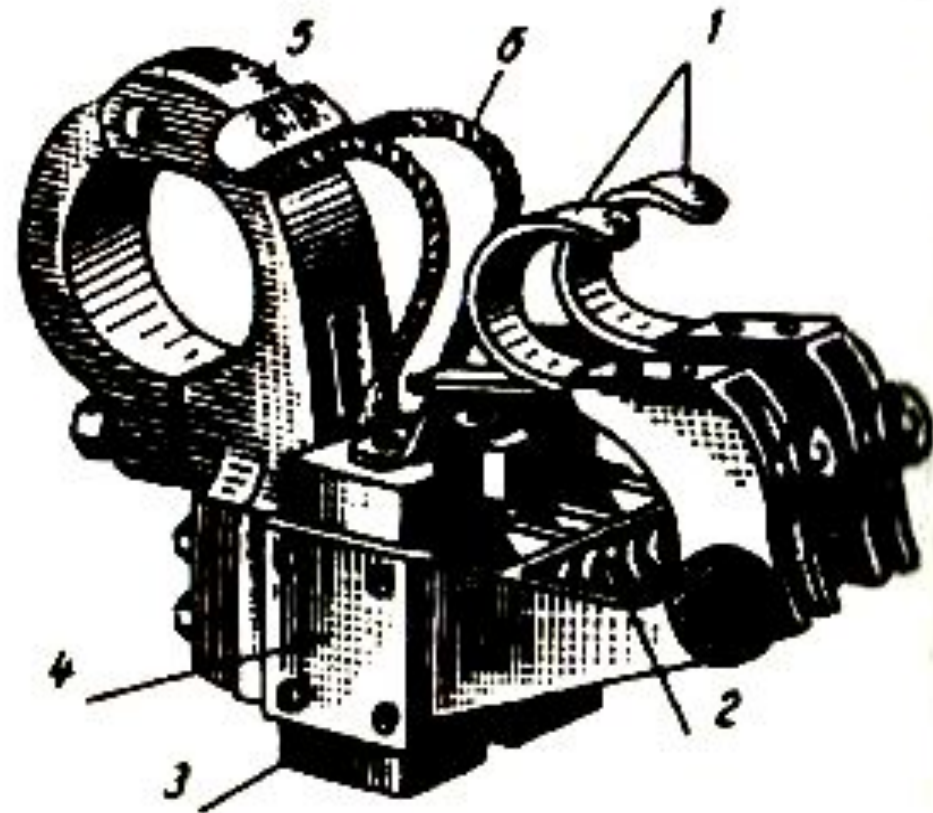


Рис. 15.5. Устройство коллектора на пластмассе.

Рис. 15.6. Щеткодержатель (сдвоенный) машины постоянного тока.

Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством щеток, располагаемых в щеткодержателях.

Щеткодержатель (рис. 15.6) состоит из обоймы 4, в которую помещают щетку 3, курка 1, представляющего собой откидную деталь, передающую давление пружины 2 на щетку. Щеткодержатель крепят на пальце зажимом 5. Щетка снабжается гибким тросиком 6 для включения ее в электрическую цепь машины. Все щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины.

Одно из основных условий бесперебойной работы машины — плотный и надежный контакт между щеткой и коллектором. Давление на щетку должно быть отрегулировано, так как чрезмерный нажим может вызвать преждевременный износ щетки и перегрев коллектора, а недостаточный нажим — искрение на коллекторе.

Помимо указанных частей машина постоянного тока имеет два подшипниковых щита: передний (со стороны коллектора) и задний (см. рис. 15.2). В центральной части щита имеется расточка под подшипник. На переднем подшипниковом щите имеется смотровое окно (люк) с крышкой, через которое можно осмотреть коллектор и щетки, не разбирая машины. Концы обмоток выведены на зажимы коробки выводов.

Вентилятор служит для самовентиляции машины: воздух поступает в машину обычно со стороны коллектора, омывает нагретые части (коллектор, обмотки и сердечники) и выбрасывается с противоположной стороны через решетку.

Из рассмотрения принципа действия и устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что неизменным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел - механический преобразователь рода тока. Таким образом, коллекторные машины сложнее бесколлекторных машин переменного тока (асинхронной и синхронной) и, следовательно, уступают им (особенно асинхронной машине) в надежности и имеют более высокую стоимость.



## 15.3 Электродвижущая сила и электромагнитный момент машины постоянного тока

Электродвижущая сила. Она наводится в обмотке якоря с основным магнитным потоком. Для получения выражения этого потока обратимся к графику распределения индукции в зазоре машины (в поперечном сечении), который при равномерном зазоре в пределах каждого полюса имеет вид криволинейной трапеции (рис. 15.7, а, график 1).

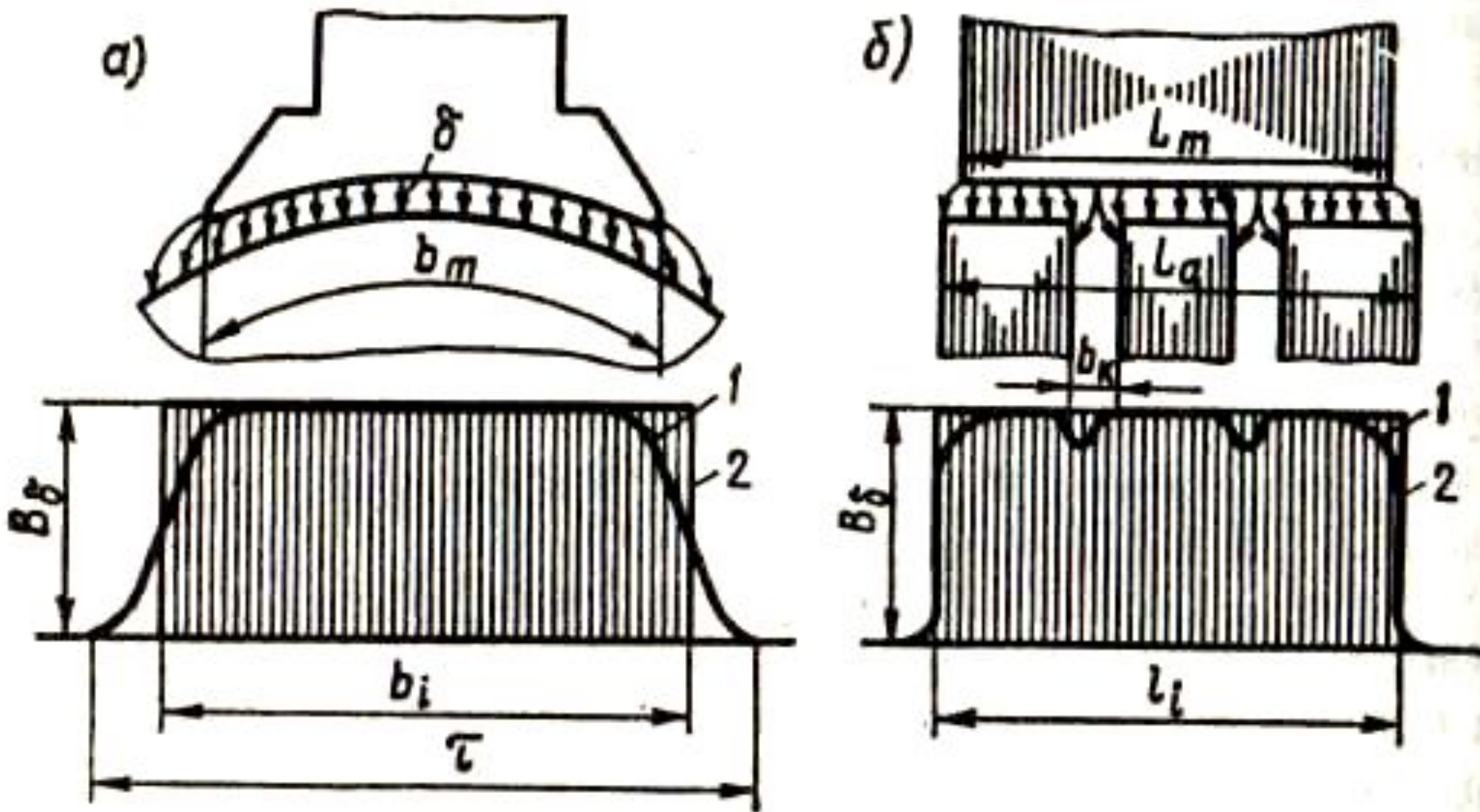


Рис. 15.7. Распределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины постоянного тока

Заменим действительное распределение индукции в зазоре прямоугольным (график 2), при этом высоту прямоугольника примем равной максимальному значению индукции  $B_{\delta}$ , а ширину - равной величине  $b_i$ , при которой площадь прямоугольника равна площади, ограниченной криволинейной трапецией. Величина  $b_i$  называется *расчетной полюсной дугой*.

В машинах постоянного тока расчетная полюсная дуга мало отличается от полюсной дуги  $b_m$

$$b_i \approx b_m + 2\delta, \quad (15.1)$$

или, воспользовавшись коэффициентом

полюсного перекрытия, получим  $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau}$

$$b_i = \alpha_i \tau \quad (15.2)$$

С учетом (15.2) основной магнитный поток (Вб)

$$\Phi = B_\delta b_i l_i \cdot 10^{-6} = B_\delta l_i \alpha_i \tau \cdot 10^{-6} \quad (15.3)$$

Здесь  $\tau$  полюсное деление, мм;

$l_i$  расчетная длина якоря, мм.

Коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_i$

имеет большое влияние на свойства машины постоянного тока. На первый взгляд, кажется целесообразным выбрать наибольшее значение  $\alpha_i$  так как это способствует увеличению потока  $\Phi$ , а следовательно, и увеличению по мощности машины (при заданных размерах). Однако слишком большое  $\alpha_i$  приведет к сближению полюсных наконечников смежных полюсов, что будет способствовать росту магнитного ротка рассеяния и неблагоприятно отразится на других свойствах машины.

При этом полезный поток машины может оказаться даже меньше предполагаемого значения.

Обычно  $\alpha_i = 0,6 \div 0,8$ , при этом меньшие значения  $\alpha_i$  соответствуют машинам малой

мощности.

На рис. 15.7, б показан продольный разрез главного полюса якоря с радиальными вентиляционными каналами. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре по продольному разрезу машины имеет вид зубчатой кривой (кривая 1).

Заменим эту кривую прямоугольником высотой  $B_\delta$  и основанием  $l_i$  величина которого такова, что площадь прямоугольника равна площади, ограниченной зубчатой кривой. Это основание представляет собой расчетную длину якоря (мм)

$$l_i = 0,5(l_m + l) \quad , \quad (15.4)$$

где  $l_m$  — длина полюса, мм;

$$l = l_a - n_K b_K \quad (15.5)$$

$l$  - длина якоря без радиальных вентиляционных каналов, мм;

$l_a$  - общая длина якоря, включая вентиляционные каналы, мм;

$b_K$  - ширина вентиляционного канала (обычно 10 мм), мм.

*Электродвижущая сила.* При выводе формулы ЭДС будем исходить из прямоугольного закона распределения индукции в зазоре, при этом магнитная индукция на участке расчетной полюсной дуги  $b_i = \alpha_i \tau$  равна  $B_\delta$ , а за ее пределами равна нулю и в проводниках, расположенных за пределами  $b_i$ , ЭДС не наводится. Это эквивалентно уменьшению общего числа пазовых проводников в обмотке якоря до значения  $N_i = \alpha_i N$ .



Исходя из этого и учитывая, что ЭДС обмотки определяется суммой ЭДС секций, входящих лишь в одну параллельную ветвь с числом пазовых проводников  $\frac{N}{2a}$ , запишем

$$E_a = E_{np} \left( \frac{N}{2a} \right) \alpha_i, \quad (15.6)$$

где

$$E_{np} = B_\delta l_i v, \quad (15.7)$$

- ЭДС одного пазового проводника обмотки,

активная длина которого  $l_i$ .

Окружную скорость вращающегося якоря (м/с)

заменим частотой вращения (об/мин):

$$v = \frac{\pi D_a n}{60} = \frac{2 r \tau n}{60},$$

где  $\pi D_a = 2 r \tau$

С учетом (15.6), (15.7) получим

$$E_a = B_{\delta} l_i \tau \alpha_i \frac{2 r n}{60} \frac{N}{2 a}$$

или, учитывая, что произведение  $B_{\delta} l_i \tau \alpha_i = \Phi$ , получим выражение

ЭДС машины постоянного тока (В):

$$E_a = \frac{pN}{60a} \Phi n = c_e \Phi n \quad , \quad (15.8)$$

где

$$c_e = \frac{pN}{60a} \quad (15.9)$$

- постоянная для данной машины величина;
- $\Phi$  — основной магнитный поток, Вб;
- $n$  — частота вращения якоря, об/мин.

Значение ЭДС обмотки якоря зависит от ширины секции  $y_1$ . Наибольшее значение ЭДС соответствует полному (диаметральному) шагу  $y_1 = \tau$ , так как в этом случае с каждой секцией обмотки сцепляется весь основной магнитный поток  $\Phi$ . Если же секция укорочена (то каждая секция сцепляется лишь с частью основного потока, а поэтому ЭДС обмотки якоря уменьшается.

Таков же эффект при удлиненном шаге секций ( $y > \tau$ ) так как в этом случае каждая секция обмотки

сцепляется с основным потоком одной пары полюсов и частично с потоком соседней пары, имеющим противоположное направление, так что результирующий поток, сцепленный с каждой секцией, становится меньше потока одной пары полюсов. По этой причине в машинах постоянного тока практическое применение получили секции с полным или укороченным шагом.

На ЭДС машины влияет положение щеток: при нахождении щеток на геометрической нейтрали ЭДС наибольшая, так как в этом случае в каждой параллельной ветви обмотки все секции имеют одинаковое направление ЭДС; если же щетки сместить с нейтрали, то в параллельных ветвях окажутся секции с противоположным направлением ЭДС, в результате ЭДС обмотки якоря будет уменьшена.

При достаточно большом числе коллекторных пластин уменьшения ЭДС машины при сдвиге щеток с нейтрали учитывается множителем  $\cos\beta$

$$E_a = c_e \Phi n \cos \beta \quad (4.10)$$

где

$\beta$  — угол смещения оси щеток относительно нейтрали (см. рис. 15.8).

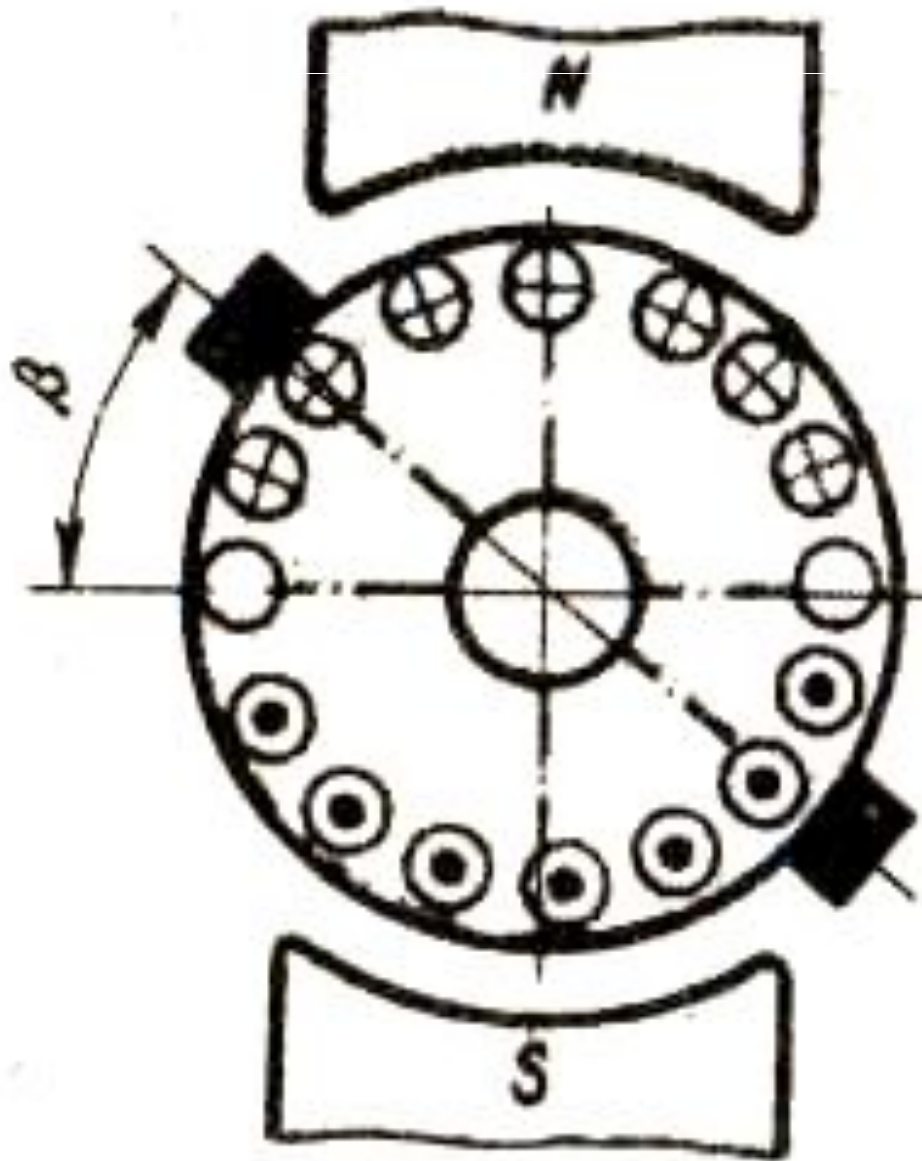


Рис. 15.8. Наведение ЭДС в обмотке якоря при сдвиге щеток с геометрической нейтрали на угол  $\beta$



*Электромагнитный момент.* При прохождении по пазовым проводникам обмотки якоря тока  $i_a$  на каждом из проводников появляется электромагнитная сила

$$F_{ЭМ} = B_{\delta} l i_a \quad (4.11)$$

Совокупность всех электромагнитных сил  $F_{ЭМ}$  на якоре, действующих на плечо, равное радиусу сердечника якоря  $\left(\frac{D_a}{2}\right)$ , создает на якоре электромагнитный момент  $M$ .

Исходя из прямоугольного закона распределения магнитной индукции в зазоре (см. рис. 4.7, а, график 2), следует считать, что одновременно действует на число пазовых проводников  $N_i = \alpha_i N$ .

Следовательно, электромагнитный момент машины постоянного тока (Н·м)  $M = F_{ЭМ} \alpha_i N \left( \frac{D_a}{2} \right)$ .

Учитывая, что  $F_{ЭМ} = B_\delta l_a i_a$ , а также что ток параллельной ветви  $i_a = \frac{I_a}{2a}$ , получим:

$$M = B_{\delta} l_i \frac{I_a}{2a} \alpha_i N \frac{D_a}{2}$$

Используя выражение основного магнитного

потока (15.3), а также имея в виду, что  $D_a = \frac{2p\tau}{\pi}$ , получим выражение

электромагнитного момента ( $H \cdot m$ ):

$$M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a = c_M \Phi I_a, \quad (15.12)$$

где

$I_a$  — ток якоря, А;

$$c_M = \frac{pN}{2\pi a} \quad (15.13)$$

- величина, постоянная для данной машины.

Электромагнитный момент машины при ее работе в двигательном режиме является вращающим, а при генераторном режиме — тормозящим по отношению к вращающему моменту приводного двигателя.

Подставив из (15.8) в (15.12) выражение основного магнитного потока

, получим еще одно выражение электромагнитного момента:

$$M = \frac{60}{2\pi n} E_a I_a = \frac{9,55 P_{\text{ЭМ}}}{n} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega}, \quad (15.14)$$

где

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ угловая скорость вращения;}$$

$$P_{\text{ЭМ}} = E_a I_a \quad (15.15)$$

- электромагнитная мощность машины

постоянного тока, Вт.

Из (15.14) следует, что в машинах равной мощности электромагнитный момент больше у машины с меньшей частотой вращения якоря.