

# **ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

---

- Принцип действия коллекторной машины постоянного тока наиболее наглядно можно показать на примере модели, состоящей из одного витка обмотки якоря с коллекторными пластинами, помещенного в поле постоянного магнита.

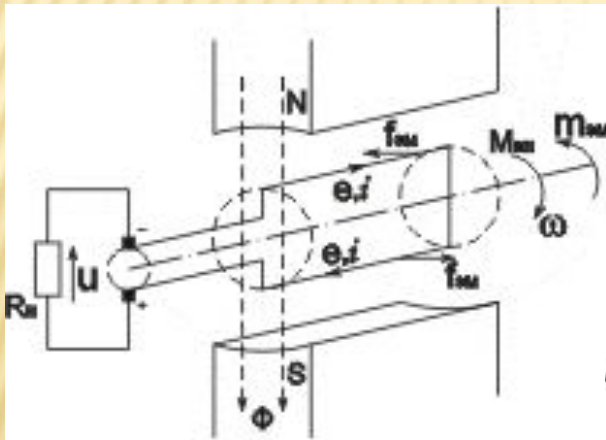


Рис.5.5  
а

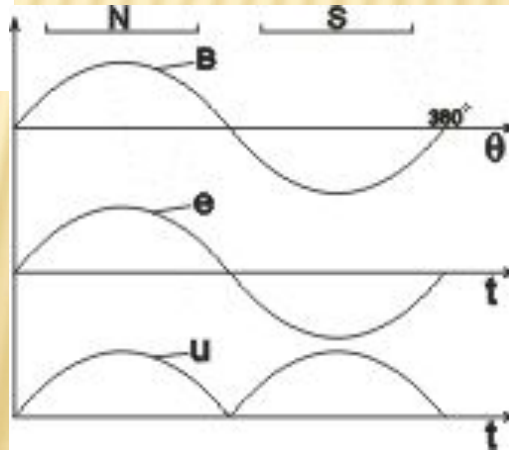


Рис.5.5  
б

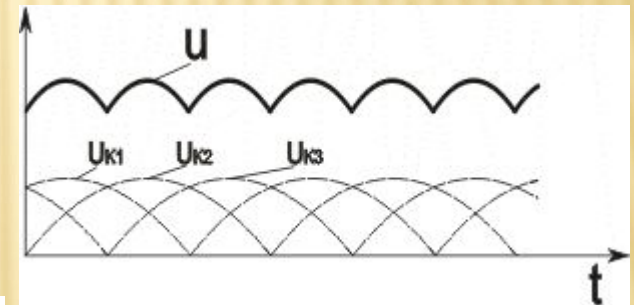


Рис.5.5  
в

- 
- В режиме генератора ([рис. 5.5а](#)) виток приводится во вращение внешним моментом с угловой скоростью, к щеткам подключен приемник электрической энергии – сопротивление нагрузки. Щетки расположены на коллекторе таким образом, чтобы их переход с одной коллекторной пластины на другую происходил в тот момент, когда виток проходит положение геометрической нейтрали. При вращении витка в каждом его проводнике в результате электромагнитной индукции появляется ЭДС вращения, направление которой может быть определено по мнемоническому правилу правой руки, а значение – по формуле
  - $\epsilon = Blv$  (5.1)



- где  $B$  – нормальная составляющая магнитной индукции поля возбуждения;  $l$  – активная длина проводника ( находящегося в магнитном поле );  
 $v$  – линейная скорость проводника.

Как видно из (5.1), характер изменения ЭДС во времени при постоянной угловой скорости целиком определяется законом распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. При законе, близком к синусоидальному ([рис.5.5.6](#)), ЭДС витка также будет переменной и изменяться по аналогичному закону с частотой  $f = \alpha P_M / 2 \pi$ . Каждая из щеток соприкасается только с той коллекторной пластиной и соответственно с тем проводником, который находится под полюсом определенной полярности. При переходе в зону противоположного полюса проводник подключается к противоположной щетке (катушка переходит из одной параллельной ветви обмотки якоря в другую). Поэтому полярность щеток в пределах оборота не меняется и происходит выпрямление переменной ЭДС витка в постоянное по знаку пульсирующее напряжение  $U$  на щетках. На сопротивлении выделяется электрическая энергия постоянного тока.

В реальной обмотке якоря с большим количеством катушек пульсация значительно сглаживается за счет последовательного соединения катушек, в каждой из которых создается пульсирующее напряжение, сдвинутое по фазе относительно остальных. Пульсация тем меньше, чем больше число катушек. На [рис. 5.5в](#) в качестве примера показаны временные диаграммы выходного напряжения каждой из катушек и обмотки в целом  $U$  при числе катушек в ветви, равном 3.

При замкнутой внешней цепи по катушке протекает ток ([рис. 5.5а](#)), направление которого совпадает с направлением ЭДС. Направление электромагнитных сил, действующих на проводники с током, определяется законом Ампера (мнемоническое правило левой руки). Как видно, электромагнитный момент, создаваемый силами, направлен навстречу, т.е. происходит потребление механической энергии от внешнего источника.

- 
- В режиме двигателя ([рис.5.6а](#)) к щеткам подводится напряжение  $U$  от источника постоянного тока, по катушке протекает ток и потребляется электрическая энергия от источника. На проводники с током действуют электромагнитные силы, значение которых определяется законом Ампера:

$$\square \quad f_{\text{эм}} = BIl \quad (5.2)$$

- Силы создают электромагнитный момент, и виток начинает поворачиваться. При переходе проводников из зоны одного полюса в зону другого полюса коллектор со щетками изменяет направление тока в витке ([рис. 5.6б](#)). Одновременное изменение знака индукции и направления тока обеспечивает неизменность направления вращающего момента в пределах оборота. На валу якоря появляется механическая энергия, которая может быть передана внешнему устройству.



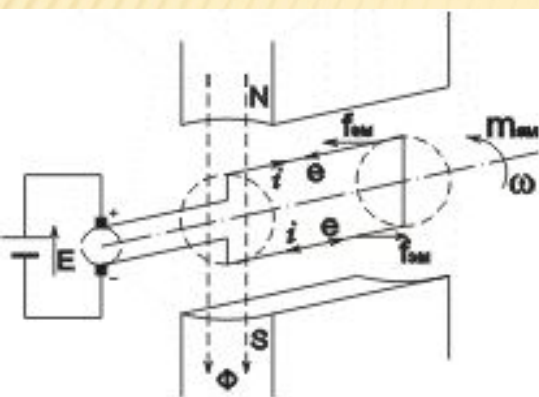


Рис.5.6  
а

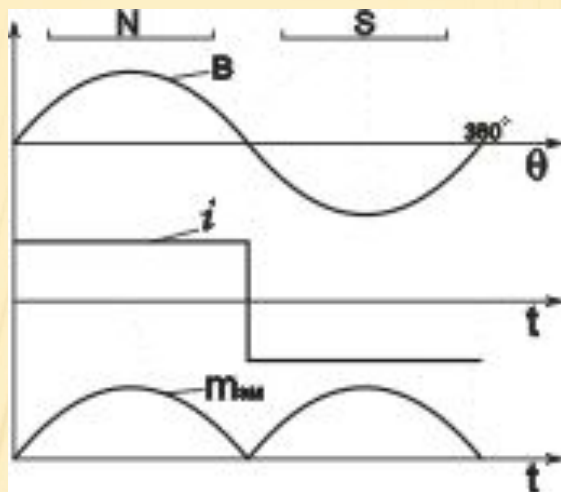


Рис.5.6 б

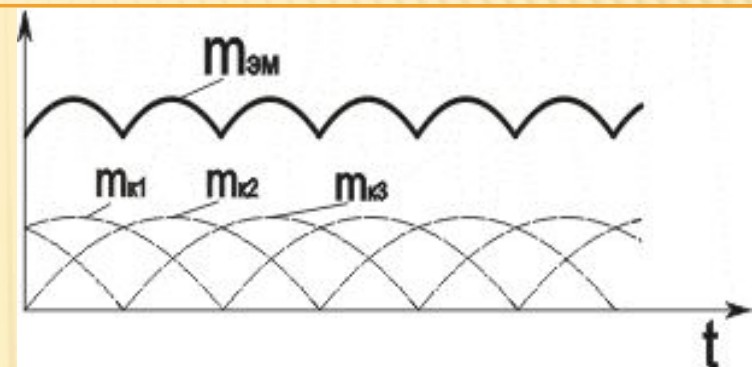


Рис.5.6  
в

Значение электромагнитного момента, создаваемого одной катушкой, пульсирует в пределах оборота. В реальной машине моменты отдельных катушек суммируются и результирующий момент практически не зависит от углового положения ротора; чем больше катушек якоря, тем меньше пульсация момента. На [рис. 5.6, в](#) в качестве примера показаны временные диаграммы момента каждой из катушек  $m_k$  и обмотки в целом  $m_{эм}$  при числе катушек в ветви, равном 3.

В проводниках вращающегося витка находится ЭДС  $e$ ; направление этой ЭДС, определяемое по правилу Ленца, противоположно направлению тока, что характерно для режима потребления электрической энергии.

# ЭДС ЯКОРЯ.

---

Рассмотрим выражение ЭДС обмотки якоря при холостом ходе машины ( ток якоря равен нулю ). Примем, что шаг катушек диаметральный, щетки установлены на геометрической нейтрали, число полюсов  $2p_m$ , число параллельных ветвей  $2a$ , число проводников обмотки  $N$ . Магнитная индукция поля возбуждения распределена в воздушном зазоре по закону, близкому к криволинейной трапеции (рис. 5.7).

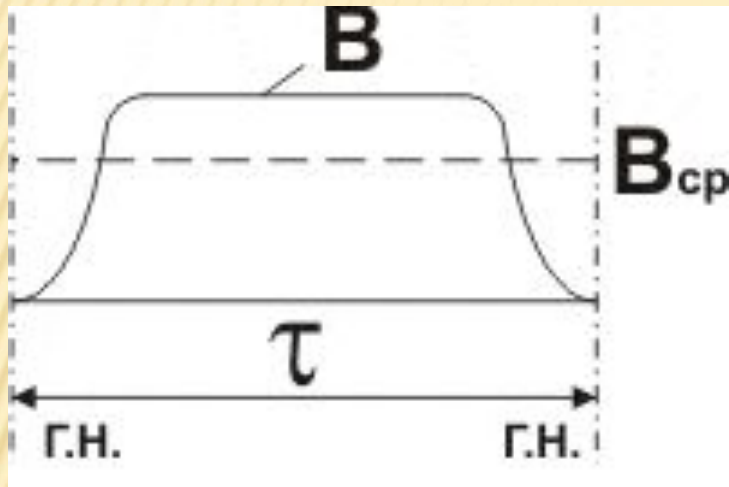


Рис.5.  
7

- Введем понятие средней индукции  $B_{ср}$ , при которой значение потока  $\Phi$  под полюсом сохраняется неизменным:
  - $B_{ср} = \Phi / \tau l$  (5.3)
- Тогда в соответствии с (5.1) ЭДС одного проводника
  - $e_{ср} = B_{ср} \cdot l v$  (5.4)
- а ЭДС параллельной ветви и якоря
  - $E_{я} = e_{ср} \cdot N / 2a$  (5.5)
- Преобразуя (5.5) с учетом (5.4) и (5.3), получим
  - $E_{я} = k \omega \Phi$  (5.6)
 где - конструктивный коэффициент машины.
- Как видно, ЭДС якоря прямо пропорциональна основному магнитному потоку и угловой скорости якоря.



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОМЕНТ.

Среднее значение электромагнитной силы, действующей на проводник обмотки якоря с током, определяется на основании ( 5.2 ) и ( 5.3 ):

$$\square \mathbf{F}_{\text{эм}} = \mathbf{B}_{\text{ср}} \cdot i l = \Phi i / \tau. \quad (5.7)$$

- Ток проводника может быть выражен через результирующий ток якоря :

$$\square i = I_{\text{я}} / 2a. \quad (5.8)$$

- Электромагнитный момент ( среднее значение ), создаваемый силами, действующими на все проводники якоря,

$$\square \mathbf{M}_{\text{эм}} = N \mathbf{F}_{\text{эм}} \mathbf{D} / 2. \quad (5.9)$$

- Преобразуя ( 5.9 ) с учетом ( 5.7 ) и ( 5.8 ), получаем

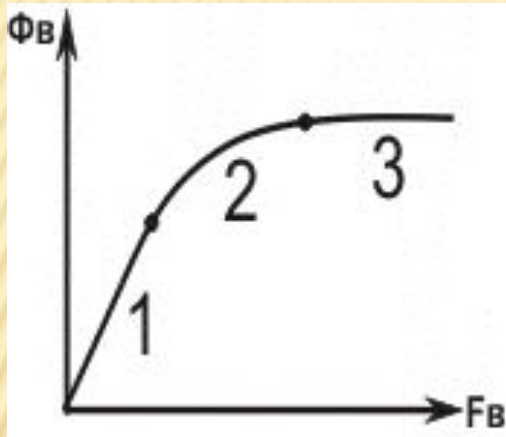
$$\square \mathbf{M}_{\text{эм}} = k \Phi I_{\text{я}}. \quad (5.10)$$

# ХАРАКТЕРИСТИКА МАГНИТНОЙ ЦЕПИ.

Основная магнитная цепь машины – это совокупность участков, по которым проходит магнитный поток возбуждения. В магнитной цепи можно выделить две группы участков, существенно отличающихся по магнитным свойствам: воздушные зазоры и участки из ферромагнитного материала, например стали (полюса, якорь, ярмо). МДС, необходимая для проведения потока по каждому из участков,  $F_i = \Phi R_{mi}$ , где  $R_{mi}$  - магнитное сопротивление  $i$ -го участка. Значение сопротивления зависит от магнитной проницаемости  $\mu$ , длины  $l$  и сечения  $S$  участка:  $R_{mi} = l_i / \mu_i S_i$ . Результирующая МДС возбуждения, необходимая для проведения потока по всей цепи, .

Характеристики электрических машин существенно зависят от параметров воздушного зазора, в частности, от его высоты и равномерности. Объясняется это тем, что магнитная проницаемость воздуха на 3 – 4 порядка меньше, чем стали, и на преодоление магнитного сопротивления воздушного зазора в машине с ненасыщенным магнитопроводом тратится основная часть результирующей МДС. Распределение индукции вдоль окружности машины, зависящее от равномерности зазора, определяет форму кривой ЭДС и тока в обмотке якоря.





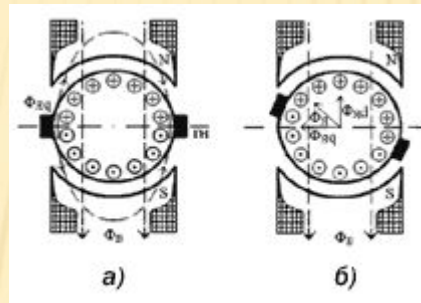
- Основной характеристикой магнитной цепи является кривая намагничивания  $\Phi_{\text{в}} = f(F_{\text{в}})$  ([рис. 5.8](#)), определяющая закон изменения потока возбуждения при изменении тока возбуждения (МДС) обмотки главных полюсов. На этой кривой можно условно выделить три участка. Участок **1** линейный, т.к. поток мал, сталь не насыщена, её магнитное сопротивление невелико и практически вся МДС тратится на преодоление воздушных зазоров с постоянной магнитной проницаемостью. С ростом  $\Phi_{\text{в}}$  магнитопровод начинает постепенно насыщаться, магнитная проницаемость стали уменьшается, а магнитное сопротивление увеличивается по нелинейному закону. Темп роста замедляется и появляется нелинейный участок **2** (коллено). На участке **3** происходит полное насыщение магнитопровода, и поток  $\Phi$  практически не



# РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ.



Магнитный поток  $\Phi$  при идеальном х.х. машины создается МДС обмотки возбуждения главных полюсов и распределяется в пределах полюсного деления симметрично относительно продольной оси машины (график индукции  $B$  на [рис. 5.7](#)). При нагрузке по обмотке якоря течет ток, создающий МДС и поток якоря. Воздействие МДС якоря на результирующее магнитное поле машины называется реакцией якоря.



[Рис.5.9](#)



Рассмотрим явление реакции якоря в машине с щетками, установленными на геометрической нейтрали ГН ([рис. 5.9,а](#)). Поскольку обмотки якоря разбиваются на параллельные ветви с одинаковым направлением тока щетками, направление результирующего потока якоря совпадает с линией щеток. В данном случае поток якоря направлен по линии геометрической нейтрали, т.е. по поперечной оси машины; такая реакция якоря называется поперечной. Так как в межполюсном пространстве в области геометрической нейтрали воздушный зазор значительно больше, чем под полюсами, то на внешнем для якоря участке поток замыкается через сердечники главных полюсов. При этом под одним краем полюса поток направлен встречно потоку возбуждения, под другим – согласно. Происходит искажение распределения магнитного поля под полюсом: под одним краем полюса индукция уменьшается, под другим – увеличивается.

- 
- Индукция на геометрической нейтрали становится отличной от нуля, и физическая нейтраль – линия, соединяющая точки окружности якоря с нулевой индукцией, - сдвигается относительно геометрической. В машине с ненасыщенной магнитной системой уменьшение потока под одним краем полюса компенсируется увеличением под другим, и результирующий поток машины  $\Phi$  остается равным потоку. В машине с насыщенной магнитной системой уменьшение потока под одним краем полюса не может быть скомпенсировано увеличением под другим и результирующий поток несколько уменьшается.

В некоторых машинах щетки специально или в результате технологических погрешностей оказываются сдвинутыми с геометрической нейтрали (рис. 5.9, б). При этом поток якоря имеет две составляющие: поперечную и продольную. Воздействие поперечной составляющей потока якоря уже было рассмотрено. Продольная составляющая в зависимости от направления тока в якоре является либо размагничивающей, либо подмагничивающей.

Реакция якоря может вызвать некоторые отрицательные явления в работе машины. Появление потока на геометрической нейтрали приводит, как будет показано ниже, к усилению искрения под щетками. Изменение результирующего потока машины в зависимости от значения тока якоря отрицательно сказывается на ряде выходных характеристик машин.



# КОММУТАЦИЯ В КОЛЛЕКТОРНОЙ МАШИНЕ.

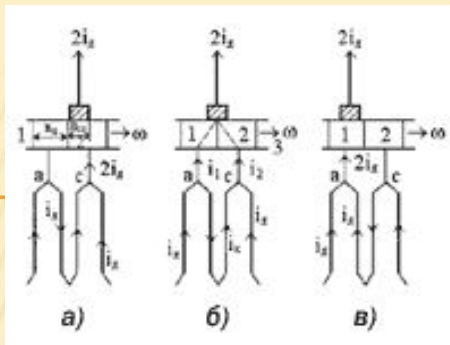


Если в данный момент времени в одной из параллельных ветвей ток течет по катушкам от начала к концу, то в другой – от конца к началу ([рис. 5.4](#)). Поскольку катушки вращаются с ротором, они по очереди переходят из одной параллельной ветви в другую. Направление тока в катушке меняется при этом на противоположное; изменение направления тока происходит в тот момент, когда катушка оказывается замкнутой накоротко через щетки. Процесс перехода катушки, замкнутой накоротко щетками, из одной параллельной ветви обмотки якоря в другую, сопровождающийся изменением направления тока в катушке, называется коммутацией.

Внешним проявлением неудовлетворительного протекания процесса коммутации служит искрение в скользящем контакте коллектор – щетки. Если искрение превосходит допустимые пределы (при плохой коммутации), то происходит ускоренный износ коллектора и щеток, снижается надежность машины. При определенных условиях искрение может привести к образованию электрической дуги на коллекторе и его разрушению. Искрение создает радиопомехи и ограничивает применение машин во взрывоопасных условиях.

Коммутация катушки происходит в течение времени перехода щетки с одной коллекторной пластины на другую; направление тока катушки меняется при этом на противоположное ( катушка  $aс$ , [рис. 5.10.а, б, в](#) ). В течение отрезка времени, называемого периодом коммутации , катушка замкнута щетками накоротко ([рис. 5.10. б](#)) и по ней протекает ток . Если бы в коммутирующей катушке не наводились ЭДС, то под набегающим краем щетки ток возрастал бы по линейному закону от 0 до  $2i$ , а под сбегающим – убывал по линейному закону от  $2i$  до 0. Следовательно, замыкание коммутирующей катушки под набегающим краем ветки и размыкание под сбегающим происходили бы без тока. Такая линейная коммутация является оптимальным вариантом коммутации, обеспечивающим при правильном выборе средней плотности тока под щетками отсутствие искрения в скользящем контакте.





**Рис.5.10**

В реальных машинах при вращении якоря ток в коммутирующей катушке изменяется с большой скоростью, и в катушке наводится ЭДС самоиндукции  $e_r$ .

Поток поперечной реакции якоря наводит в катушке, коммутирующей на геометрической нейтрали, ЭДС вращения. При  $v > v_0$  одновременно коммутируют несколько катушек, и в них наводятся ЭДС взаимоиндукции  $e_M$ . Суммарная ЭДС коммутирующей катушки  $e_K = e_L + e_M + e_{BP}$  создает в катушке добавочный ток, и коммутация становится нелинейной. Нелинейная коммутация сопровождается искрением, причем увеличение плотности тока под одной частью щетки и уменьшение – под другой увеличивает уровень искрения.

Уменьшить искрение можно путем создания условий, при которых коммутация будет линейной. Один из основных способов – использование дополнительных полюсов, создающих магнитный поток в зоне геометрической нейтрали. Индукцию этого поля выбирают таким образом, чтобы не только скомпенсировать поток якоря на геометрической нейтрали и уничтожить  $e_{BP}$  в коммутирующей катушке, но создать поле, необходимое для компенсации  $e_L + e_M$ . Чтобы значение и направление индукции под дополнительными полюсами автоматически приходили в соответствие со значением и направлением тока якоря, вызывающего реакцию якоря, обмотку дополнительных полюсов включают последовательно с якорем.

Следует отметить, что искрение может быть вызвано не только электромагнитными, но и механическими факторами: эллиптичностью и биением коллектора, неровностью его поверхности, вибрацией щеткодержателей и т.д. Эти факторы приводят к вибрации щеток, кратковременному отрыву щеток от поверхности коллектора и возникновению искры.

### **Способы возбуждения.**

Под способом возбуждения машины понимается схема соединения обмоток возбуждения главных полюсов и якоря. При независимом возбуждении обмотка главных полюсов получает питание от внешнего источника постоянного тока; независимым является также возбуждение машины с помощью постоянного магнита. Параллельное возбуждение обеспечивается параллельным подключением обмотки возбуждения и обмотки якоря по отношению к сопротивлению нагрузки или источнику питания, последовательное возбуждение – последовательным включением обмотки возбуждения и обмотки якоря. Машины смешанного возбуждения имеют на главных полюсах несколько обмоток, часть из которых включается независимо или параллельно, другая – последовательно по отношению к якорю. Конструктивно эти машины отличаются только параметрами обмоток главных полюсов: обмотки независимого и параллельного возбуждения выполняют с большим числом витков из провода малого сечения и относительно большим сопротивлением; обмотки последовательного возбуждения – с малым числом витков из провода большого сечения и относительно малым сопротивлением. Способ возбуждения весьма сильно влияет на основные характеристики машины.