

МАГНИТНАЯ ЦЕПЬ МАШИНЫ

Главные полюсы с обмотками возбуждения создают магнитодвижущую силу (МДС). МДС, в свою очередь, создает магнитное поле, магнитные линии которого замыкаются через участки машины, образующие ее магнитную систему. Рассмотрим магнитное поле машины при отсутствии нагрузки, т.е. при холостом ходе.

На поперечном разрезе машины (рис. 2.22) показан путь магнитного потока, из которого видно, что весь магнитный поток делится на две неравные части. При этом большая часть – основной магнитный поток Φ пронизывает через воздушный зазор якорь, разветвляется в его сердечнике, подходит к соседним полюсам и замыкается через станину. Основным магнитным потоком Φ называют поток в воздушном зазоре δ , приходящийся на один полюс.

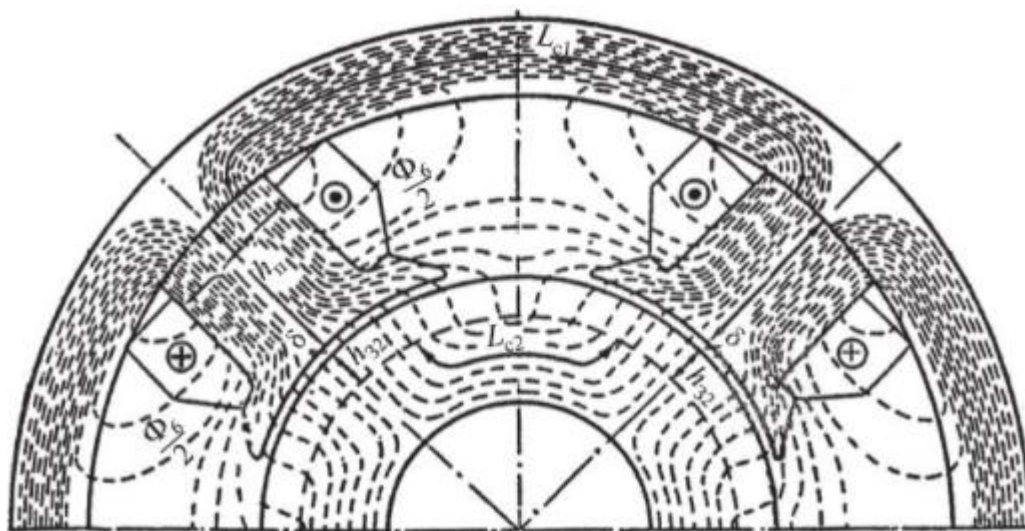


Рис. 2.22. Магнитная цепь машины постоянного тока

Меньшая часть – поток рассеяния $\Phi\sigma$ – замыкается между полюсами, минуя якорь. Тогда магнитный поток полюса:

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi + \Phi\sigma = (1 + \Phi/\Phi\sigma) * \Phi = K * \Phi,$$

где $K = 1 + \Phi/\Phi\sigma$ – коэффициент рассеивания главных полюсов. Для машин постоянного тока $K = 1,12 - 1,25$.

Магнитная цепь машины состоит из отдельных участков:

- $h_{\text{п}}$ – длина сердечников полюсов;
- δ – величина воздушного зазора между полюсом и якорем;
- $h_{\text{з2}}$ – длина зубцового слоя якоря;
- $L_{\text{с2}}$ – длина спинки якоря;
- $L_{\text{с1}}$ – длина участка станины.

Каждый из участков обладает разным магнитным сопротивлением, так как устройства отличаются как по физическим свойствам, так и по размерам. Все участки магнитной цепи изготавливают из ферромагнитных материалов:

- сердечник якоря – из тонколистовой электротехнической стали марок 2012, 2014 и 2411 толщиной 0,5 мм;
- сердечник главных полюсов – из листовой анизотропной (холоднокатаной) стали марки 3411 толщиной 1 мм;

– станина – из конструкционной стали Ст3, причем для тяговых электродвигателей используют стальное литье (в некоторых случаях изготавливают сварными из листовой стали), а в машинах малой мощности – из стальных цельнотянутых труб.

При заданном значении ЭДС машины E_a определяют значение Φ :

$$\Phi = (60 \cdot a \cdot E_a) / p \cdot N \cdot n.$$

где a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

p – число пар полюсов;

N – число активных проводников обмотки якоря;

n – частота вращения якоря, об/мин.

Магнитная характеристика машины имеет вид, показанный на рис. 2.23. В начале характеристики $\Phi = f(F)$ наблюдается линейная зависимость между Φ и F (линия 0–с), а затем наступает магнитное насыщение магнитной цепи машины и линейная зависимость нарушается (участок с–d). Участок между точками с и d называют коленом кривой намагничивания. Для уменьшения габаритов электрических машин их магнитную цепь делают насыщенной, т.е. рабочая точка машины располагается между точками d и A.

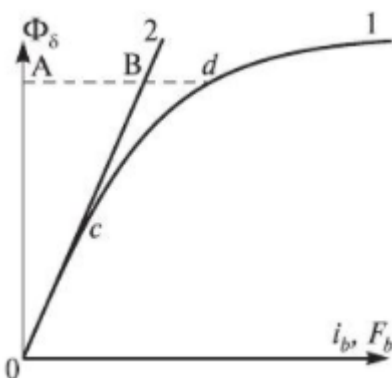


Рис. 2.23. Магнитная характеристика $\Phi = f(F)$

КОММУТАЦИЯ

Обмотка якоря состоит из отдельных секций, витков, которые присоединены к коллекторным пластинам. При вращении якоря коллекторные пластины и секции якоря непрерывно меняют свое положение относительно щеток и полюсов, которые закреплены неподвижно.

Процесс изменения направления тока в секции обмотки якоря, связанный с ее переходом из одной параллельной ветви в другую, называется *коммутацией*, а секция – *коммутируемой*.

Время T_k , в течение которого секция замкнута накоротко щеткой и коммутируется, называется *периодом коммутации*.

$$T_k = 60 / (K * n) * (b_{щ} / b_k)$$

где K – число коллекторных пластин;

n – частота вращения якоря, об/мин;

$b_{щ}$ – ширина щетки;

b_k – расстояние между серединами коллекторных пластин.

Обычно T_k равно 0,001-0,0003 с.

На рис. 2.25 показаны три положения одной и той же коммутируемой секции обмотки (выделена жирными линиями) в процессе вращения якоря. Ширина щетки $b_{щ}$ принята равной коллекторной пластине, а толщина изоляции между коллекторными пластинами не учитывается.

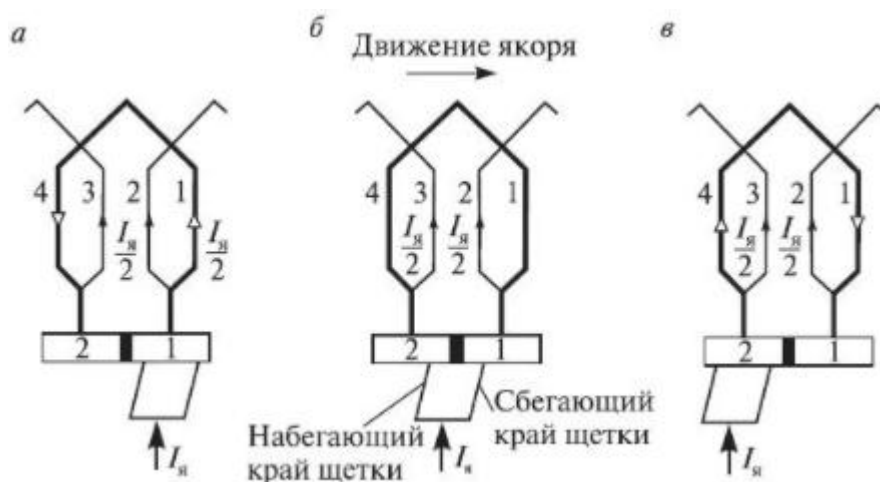


Рис. 2.25. Переход коммутируемой секции из одной параллельной ветви в другую:

а, в – щетка находится на первой (а) и второй (в) коллекторной пластине, б – щетка перекрывает обе коллекторные пластины

На рис. 2.25, а показано положение секции в начале коммутации. Щетка перекрывает пластину 1 и ток якоря I_a , пройдя щетку, распределяется по обеим сторонам коммутируемой секции поровну. Когда якорь вращается, то коллекторные пластины сдвигаются относительно щетки и в какой-то момент щетка равномерно перекрывает обе коллекторные пластины 1 и 2 (рис. 2.25, б). Тогда через коммутируемую секцию ток протекать не будет, а в параллельных ветвях он будет равен $I_a/2$.

В конце процесса коммутации (рис. 2.25, в) щетка сойдет с коллекторной пластины 1 и перекроет только пластину 2, вследствие чего ток в коммутируемой секции изменит свое направление по сравнению с первоначальным.

Прямолинейная и криволинейная коммутация

При очень малой частоте вращения $n \rightarrow 0$ ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции практически не возникает. Вследствие этого плотность тока под набегающим и сбегающим краями щеток остается неизменной. Из этого следует, что ток в коммутируемой секции будет изменяться по линейному закону (прямая 1, рис. 2.26).

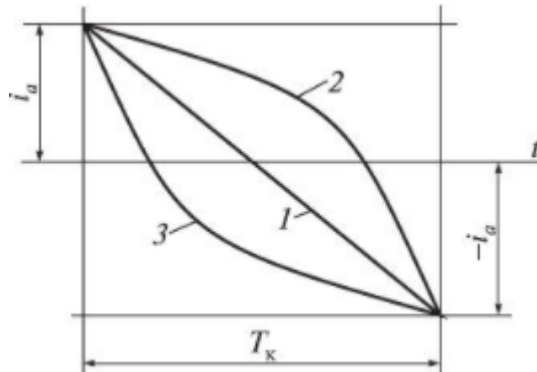


Рис. 2.26. График прямолинейной и криволинейной коммутации:

1 — линия прямолинейной коммутации; 2 — линия замедленной криволинейной коммутации;
3 — линия ускоренной криволинейной коммутации

В современных электрических машинах период коммутации T_k очень мал и составляет приблизительно $10^{-3} - 10^{-5}$ с. За такой очень и очень малый промежуток времени ток в коммутируемой секции должен изменить свое направление. Поэтому согласно правилу Ленца возникает ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L_c \cdot (di/dt),$$

где L_c — индуктивность секций;

i — ток секции.

Обычно щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, и в одном пазу якоря находится несколько пазовых сторон, принадлежащих разным секциям, одновременно находящихся в состоянии коммутации. Поэтому изменение магнитного потока каждой из этих частей индуцирует в пазовых сторонах других секций ЭДС взаимоиндукции:

$$e_m = -M_c \cdot (di/dt),$$

где M_c — взаимная индуктивность одновременно коммутирующих секций.

ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции направлены в одну сторону, поэтому суммируются и образуют реактивную ЭДС:

$$e_p = e_L + e_m = -(L_c + M_c) \cdot (di/dt).$$

Кроме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции, в коммутируемой секции от действия магнитного поля якоря индуцируется ЭДС e_{aq} , направление которой определяется правилом правой руки. Таким образом, эта ЭДС также стремится сохранить прежнее направление тока и также замедляет процесс коммутации:

$$e_{aq} = 2 \cdot B_{aq} \cdot w_c \cdot I_\delta \cdot v_a,$$

где B_{aq} — индукция поля реакции якоря;

w_c – число витков в секции;

v_a – окружная скорость якоря;

l_0 – длина активной стороны коммутируемой секции якоря.

Все рассмотренные ЭДС – e_L , e_m , e_{aq} – замедляют процесс коммутации и являются вредными. Коммутация становится *криволинейной замедленной* (см. рис. 2.26, кривая 2). При замедленной коммутации изменяется плотность тока под набегающим и сбегающим краями щетки. Под набегающим краем щетки плотность тока уменьшается, а под сбегающим – возрастает, причем до такой величины, что часть тока будет замыкаться по воздуху в виде искр. Искрение на коллекторе вызывает нагревание и порчу его поверхности, нарушение работы щеточного аппарата, вследствие чего снижается надежность машины.

Способы улучшения коммутации

В коммутируемой секции, которая закорочена щеткой, возникает реактивная ЭДС E_p , создающая добавочный реактивный ток I_p :

$$I_p = E_p / (\Sigma R)$$

где $\Sigma R = (R_c + R_k + R_{щ})$ – сопротивление контура коммутируемой секции;

R_c – сопротивление секции;

R_k – сопротивление коллектора;

$R_{щ}$ – сопротивление щеток.

Для улучшения коммутации необходимо уменьшить добавочный реактивный ток I_p до нуля. Для этого или увеличивают ΣR , или уменьшают E_p , или производят оба действия одновременно.

В случае увеличения сопротивления все три составляющие ΣR увеличивать нельзя. Например, если увеличивать сопротивление секций или коллектора, то уменьшится КПД машины. Наиболее приемлемым является подбор щеток с надлежащими характеристиками и сохранение «политуры» оксидной пленки на поверхности коллектора.

Для этого в машинах постоянного тока применяют щетки с повышенным значением переходного сопротивления; в машинах с тяжелыми режимами работы – электро-графитные и угольно-графитные; в низковольтных машинах – медно- или бронзо-графитные. Электрические свойства щеток характеризует величина, зависящая от их переходного сопротивления, – переходное падение напряжения на пару щеток $U_{щ}$ при номинальной плотности тока (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Электрические свойства щеток

Группа щеток, обозначение	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе, В	Номинальная плотность тока, А/мм ²	Область применения
Графитные, Г; 611М	1,9-2,0	0,11-0,12	Для машин с облегченными условиями коммутации
Электро-графитные, ЭГ	2,0-2,7	0,10-0,15	Для машин со средними и затруднительными условиями коммутации
Угольно-графитовые, УГ; Т	2,0	0,06-0,07	Для машин со средними условиями коммутации

Медно-графитные, М;МГ	0,2-1,5	0,15-0,20	Для машин низковольтных (до 48 В), контактных колец
-----------------------	---------	-----------	---

Для уменьшения реактивной ЭДС E_r целесообразно уменьшить глубину паза или увеличить его ширину, так как ЭДС самоиндукции зависит от индуктивности коммутируемой секции, т.е. от глубины паза якоря.

ЭДС взаимоиנדукции зависит от ширины щетки: чем шире щетка, тем большее количество коллекторных пластин она перекрывает и тем большее количество секций вступает в процесс коммутации, вызывая увеличение ЭДС взаимоиנדукции. Однако сделать узкие щетки, равные ширине одной коллекторной пластины, невозможно из-за недостаточной механической прочности. Площадь щетки определяется ее плотностью тока, поэтому при узкой щетке необходимо увеличивать длину коллектора, что в ограниченных габаритах электрических машин сделать очень сложно. Обычно ширина щетки составляет 2–3 коллекторных деления.

Эффективным средством уменьшения магнитной связи между переключаемыми секциями является их укорочение, т.е. выполнение с укороченным шагом ($y < \tau$). В этом случае для достижения предельной индукции в зубцах якоря целесообразно увеличивать ширину паза и уменьшать его глубину.

Добавочные полюсы

Предназначены для создания в зоне коммутации магнитного поля такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутируемой секции ЭДС компенсировала реактивную ЭДС E_r . Полюсный наконечник сердечника выполняют заостренным (рис. 2.27), чтобы магнитный поток, созданный добавочным полюсом, был направлен только в коммутируемую секцию.

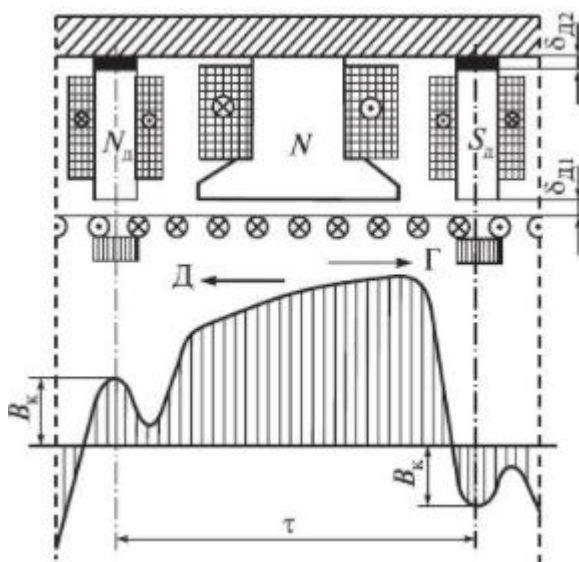


Рис. 2.27. Результирующее магнитное поле в воздушном зазоре машины с добавочными полюсами в генераторном (Г) и двигательном (Д) режимах

Обмотки возбуждения добавочных полюсов всегда включают последовательно с обмоткой якоря для того, чтобы происходило автоматическое усиление действия добавочных полюсов при увеличении внешней нагрузки, вызывающей усиление реакции якоря и реактивной ЭДС в коммутируемой секции. Для предотвращения сползания обмотки возбуждения со стороны наконечника прикреплены латунные угольники.

Добавочные полюсы обеспечивают удовлетворительную коммутацию только в пределах номинальной нагрузки. При перегрузке происходит насыщение магнитной цепи добавочных полюсов. В этом случае реактивная ЭДС E_r изменяется пропорционально току нагрузки, а ЭДС, созданная добавочным полюсом, не будет увеличиваться. Поэтому сердечник добавочного полюса делают ненасыщенным. Для этой цели между сердечником добавочных полюсов и остовом машины размещают второй зазор, где устанавливают диамагнитную прокладку из алюминия, гетинакса, текстолита и других диамагнитных материалов.

Полярность добавочных полюсов выбирают следующим образом. По направлению вращения якоря генератора полярность добавочного полюса такая же, как у следующего главного полюса, а у двигателя – как у предшествующего.

Число витков обмотки возбуждения добавочных полюсов рассчитывают так, чтобы при номинальной нагрузке происходила компенсация реактивной ЭДС. Если число витков обмотки возбуждения будет больше расчетного, то коммутация будет ускоренной (кривая 3, см. рис. 2.26). При значительных нагрузках это может привести к искрению под набегающим краем щетки.

ЗАДАНИЕ

Ответить на вопросы:

1. Какие участки содержит магнитная цепь машины?
2. Что такое коммутация?
3. Какие виды коммутации бывают?
4. Какие способы улучшения коммутации применяют?

Ответы оформить в текстовом редакторе **Microsoft Office Word** (или аналогичном текстовом редакторе) и сохранить в файл с расширением **doc (docx)**. Файл выслать личным сообщением в ВК:

<https://vk.com/id134665099>

Срок выполнения задания: **31.01.2022**