

## *1. Специализированные электрические машины постоянного тока..*

Электромашиностроительной промышленностью изготавливаются машины постоянного тока в диапазоне мощностей от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт, предназначенные для работы в различных условиях.

В зависимости от требований, которые предъявляются к электрическим машинам постоянного тока, последние разделяются на машины общего применения и специализированные. *Машиной общего применения* называется электрическая машина, удовлетворяющая комплексу требований, общему для большинства случаев применения, не включающему специфичные требования, характерные лишь для отдельных областей применения электрических машин. *Специализированной* называется машина, выполненная с учетом специфических требований, характерных лишь для отдельных областей применения электрических машин.

Электрические машины как общего применения, так и специализированные, широко используемые в промышленности, изготавливаются сериями.

*Серия машин представляет собой ряд электрических машин возрастающей мощности, имеющих однотипную конструкцию и удовлетворяющих общему комплексу требований.*

Наиболее распространенными машинами постоянного тока общего применения являются машины единой серии П. Электрические машины этой серии мощностью от 0,3 до 200 *квт* включают в себя электродвигатели на напряжение 110 и 220 *в* при скоростях вращения 3000, 1500, 1000, 750., 600 *об/мин* и генераторы на напряжение 115 и 230 *в* при скоростях вращения 2850 и 1450 *об/мин*. Электродвигатели серии П предназначены для работы в промышленных приводах, требующих широкого и плавного регулирования скорости вращения, а генераторы—для питания электрических цепей постоянного тока.

Специализированные электрические машины проектируются в соответствии с требованиями какой-либо определенной отрасли промышленности, для работы в которой они предназначены. Поэтому существует очень много разновидностей

специализированных электрических машин постоянного тока. В данной главе рассматриваются лишь наиболее распространенные типы таких машин.

## *2. Краново-металлургические и тяговые двигатели.*

Для привода механизмов, работающих при значительных перегрузках и частых реверсах, применяются двигатели постоянного тока серии МП. Эти двигатели используются в электроприводе краново-подъемных и металлургических устройств.

Тяговые электродвигатели предназначены для приведения в движение подвижного состава электрифицированного транспорта.

По сравнению с машинами стационарного типа условия работы тяговых двигателей намного тяжелее: работа происходит в условиях частого пуска в ход, сопровождается значительными изменениями напряжения, двигатель подвержен динамическим воздействиям, вызывающим вибрации щеток и щеткодержателей.

Исходя из этого, тяговые двигатели отличаются особо прочной конструкцией, тщательно настроенной коммутацией, специальной конструкцией щеткодержателей и т.п.

Тяговые электродвигатели выполняются с последовательным или смешанным возбуждением с преобладающей последовательной обмоткой. Напомним, что двигатели последовательного возбуждения, лучше других работают в тяжелых условиях эксплуатации.

## *3. Электромашинный усилитель.*

Электромашинным усилителем (ЭМУ) называется электрическая машина, работающая в режиме генератора и предназначенная для усиления электрических сигналов. Электромашинные усилители применяются в системах автоматики.

Простейшим <sup>126</sup>ЭМУ является генератор постоянного тока независимого возбуждения. Так как напряжение на выходе генератора зависит от тока возбуждения, то, изменяя ток возбуждения, можно управлять напряжением на выходе генератора.

Следовательно, сравнительно небольшой мощностью в цепи

обмотки возбуждения можно управлять значительной мощностью в цепи якоря.

Но ЭМУ, выполненные по принципу генератора независимого возбуждения, не нашли широкого применения, так как они не могут обеспечить достаточно большого коэффициента усиления по мощности (не более 80 — 100), представляющего собой отношение мощности на выходе усилителя к мощности на входе.

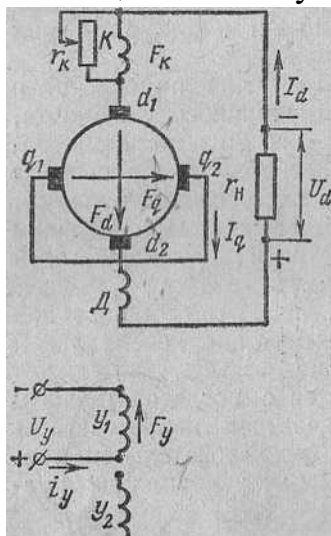
Наибольшее распространение в автоматике получили *электромашины усилители поперечного поля*.

В отличие от обычного генератора постоянного тока в электромашином усилителе поперечного поля основным рабочим потоком является магнитный поток, создаваемый током обмотки якоря, — поперечный поток реакции якоря.

На коллекторе ЭМУ установлено два комплекта щеток. Один комплект щеток (рис.1.) расположен по поперечной оси главных полюсов, т. е. на геометрической нейтрали; а другой комплект щеток  $d-d_2$  расположен по продольной оси главных полюсов. Щетки замкнуты накоротко, а к щеткам  $d, d_2$  подключена рабочая цепь ЭМУ.

Помимо обмотки якоря, усилитель имеет одну или несколько обмоток управления  $\{y_x, t/a\}$ , компенсационную обмотку  $K$  и обмотку добавочных полюсов  $D$ . Якорь усилителя приводится во вращение посредством электродвигателя.

Если к одной из обмоток управления подвести напряжение  $U^{\wedge}$ , то в этой обмотке появится ток управления  $i_{yy}$  который создаст намагничивающую силу обмотки управления  $F_y = i_y W_y$ . Эта сила, в свою очередь, создаст магнитный поток  $\Phi^{\wedge}$ , который наведет в цепи щеток  $q_1 q_2$  э. д. с.  $E_q$ . По величине эта э. д. с. невелика, но так как щетки замкнуты накоротко, то Э.Д.С.  $E_d$  создает значительный ток  $I_q$



Ток в обмотке якоря  $I_d$  создает намагничивающую силу  $F_q$  и магнитный поток  $\Phi_q$ , который оси главных полюсов, т. е. по геометрической нейтрали, и неподвижен в пространстве. В обмотке якоря, вращающейся в неподвижном потоке  $\Phi_q$ , наводится Э.Д.С.  $E_d$ , снимаемая с продольных щеток  $d_1 d_2$

При подключении нагрузки  $r_n$  к выходным зажимам ЭМУ Э.Д.С.  $E_d$  создает в цепи щеток  $d_x d_2$  рабочий ток  $I_d$ .

Наличие нескольких обмоток управления позволяет воздействовать на выходную мощность ЭМУ несколькими сигналами одновременно, используя прямые и обратные связи.

Как уже отмечалось, в ЭМУ имеется обмотка добавочных полюсов  $D$  и компенсационная обмотка  $K$ . Обмотка добавочных полюсов служит для улучшения коммутации на продольных щетках ( $\langle ijd_2 \rangle$ ).

Что же касается' компенсационной обмотки, то она предназначена для устранения размагничивающего влияния реакции якоря по продольной оси.

Дело в том, что ток рабочей цепи ЭМУ (ток нагрузки)  $I_d$  создает намагничивающую силу якоря по продольной оси  $F_d$ , направленную навстречу намагничивающей силе обмотки управления  $F_y$ . Эта сила намного меньше намагничивающей силы  $F_d$ . Поэтому даже при небольшой нагрузке усилителя размагничивающее влияние реакции якоря по продольной оси настолько велико, что усилитель размагничивается и напряжение на его выводах падает до нуля.

Для устранения этого нежелательного явления на статоре ЭМУ располагают компенсационную обмотку, включенную ' последовательно в <sup>129</sup> рабочую цепь якоря.

В этом случае напряжение на выходе ЭМУ остается неизменным' во всем диапазоне изменения нагрузки.

При *значительной перекомпенсации* внешняя характеристика (кривая 4) приобретает восходящий характер, так как намагничивающая сила'  $F_K$  не только компенсирует  $F_d$ , но и создает дополнительный продольный поток, который, накладываясь на магнитный поток „управления, вызывает увеличение Э.Д. С. Работа усилителя, с перекомпенсацией становится неустойчивой, так как <sup>126</sup> возникает опасность произвольного самовозбуждения ЭМУ, при котором увеличение напряжения на выходе усилителя вызывает рост тока нагрузки, что ведет к дальнейшему увеличению напряжения и т. д., т. е. происходит неограниченное увеличение: тока нагрузки.



Обычно в усилителе настраивают небольшую не декомпенсацию, при которой увеличение напряжения  $U_d$  при уменьшении тока  $I_d$  от номинального до нуля составляло бы 12—20%.

В отличие от обычного генератора постоянного тока ЭМУ поперечного поля обладает весьма малой инерционностью, т. е. он обладает свойством быстро реагировать на все изменения напряжения на обмотке управления.

Постоянная времени электрической цепи  $\tau$ , характеризующая скорость переходных процессов, прямо пропорциональна индуктивности этой цепи  $L$  и обратно пропорциональна ее активному сопротивлению  $R$ .

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Поэтому в целях повышения быстродействия ЭМУ его обмотку управления выполняют с большим активным сопротивлением при небольшой индуктивности. Это достигается тем, что часть обмотки выполняется бифилярно.

Повышению быстродействия ЭМУ способствует также небольшая индуктивность обмотки якоря в цепи поперечных щеток  $< 7_{\text{хД2}}$ .

Рассмотрим некоторые примеры применения ЭМУ в схемах автоматического регулирования. Рис. 2 приведена схема автоматического регулирования напряжения в генераторе независимого возбуждения посредством ЭМУ, имеющего две обмотки управления: одна обмотка подключена к аккумуляторной батарее и создает неизменную н.с.  $F_H$  а другая включена на напряжение управляемого генератора и создает н.с.  $F_2$ , направленную встречно н.с.  $F_H$ . Таким образом, результирующая н.с. управления равна

$$R_j = F_i - F_M.$$

При понижении напряжения генератора н.с.  $F_2$  уменьшается, а результирующая н.с. увеличивается, что вызывает увеличение тока возбуждения генератора до такой величины, при которой напряжение генератора достигает установленного значения.

ЭМУ можно также использовать для автоматической стабилизации скорости вращения двигателя постоянного тока рис.5. С этой целью

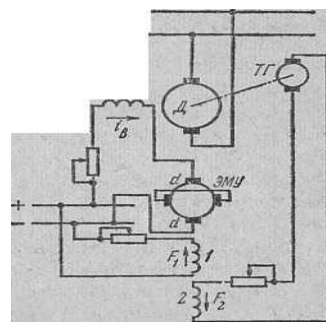


Рис. 5. Схема автоматического регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока посредством ЭМУ

включают последовательно с обмоткой возбуждения двигателя. Одна из обмоток управления включена в сеть с постоянно действующим напряжением и создает н. с.  $F_t = \text{const}$ , а другая подключается к тахогенератору ТГ, напряжение на выходе которого пропорционально скорости вращения двигателя. Таким образом, величина н. с. этой обмотки управления  $F_2$  зависит от скорости вращения двигателя. Установившейся скорости вращения двигателя соответствует разность н. с.

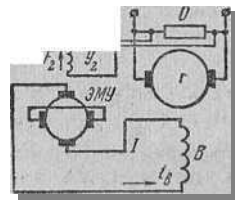


Рис. 4. Схема включения ЭМУ для стабилизации напряжения на выходе генератора постоянного тока.

Если же скорость вращения двигателя увеличится, то н. с. регулирующей обмотки управления  $F_2$  также увеличится, а результирующая, н. с.  $F_y$  уменьшится. Это уменьшит напряжение на щетках усилителя. Поскольку ЭМУ включен встречно к напряжению обмотки возбуждения двигателя, снижение напряжения на щетках  $d\varphi_2$  увеличит ток возбуждения двигателя. В итоге скорость вращения двигателя снизится до установленного значения. Если же скорость двигателя уменьшится, то процессы в системе пойдут в противоположном направлении, и скорость вращения опять будет восстановлена. Точность регулирования при этом получается достаточной.

#### 4. Тахогенераторы постоянного тока.

Тахогенераторы постоянного тока служат для измерения скорости вращения по величине выходного напряжения, а также для получения электрических сигналов, пропорциональных скорости вращения вала в схемах автоматического контроля и регулирования.

Тахогенератор постоянного тока представляет собой генератор. Малой

мощности с электромагнитным независимым возбуждением (рис.6, а) или с возбуждением постоянными магнитами.

Ввиду того что при постоянной величине тока возбуждения  $i_{\text{в}} = \text{const}$ , магнитный поток  $\Phi$  практически не зависит от нагрузки, выходная э.д.с.

тахогенератора  $E_{\text{вых}}$  прямо пропорциональна  
 где скорости вращения  $n$   
 $= C_e \Phi n = C_e n$ ,

$C_e$  —  $C_g(S)' = \text{const}$ . Полученное Выражение (3) справедливо и для тахогенератора с возбуждением постоянными магнитами, где  $\Phi = \text{const}$ .

Для измерения скорости вращения тахогенератором вал последнего механически соединяют с валом механизма, скорость вращения которого требуется измерить. На выводы тахогенератора подключают измерительный прибор со шкалой, градуированной в единицах скорости вращения (об/мин).

Наибольшая измеряемая скорость вращения тахогенератора постоянного тока составляет приблизительно 10 000 об/мин.

Точность работы тахогенератора определяется его *выходной характеристикой*, представляющей собой зависимость выходного напряжения от скорости вращения  $U_{\text{вн}} = f(n)$  при неизменной величине сопротивления нагрузки. Наиболее точная работа тахогенератора соответствует прямолинейной выходной характеристики.

Но практически выходная характеристика тахогенератора не прямолинейна (рис.6)

Основными причинами нарушения линейной зависимости  $U_{\text{вых}} = f(n)$  являются реакция якоря и падение напряжения в щеточном контакте.

Отклонение выходных характеристик от прямолинейной в современных тахогенераторах постоянного тока невелико и составляет 0,5—3%. Применение измерительных приборов с большим внутренним сопротивлением  $Z_n$  уменьшает нелинейность выходной характеристики.

Другим важным показателем свойств тахогенератора является *крутизна*

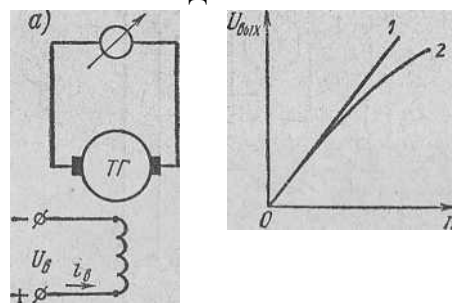


Рис. 6. Тахогенератор постоянного тока независимого возбуждения:  
 - принципиальная схема; б - выходная характеристика



выходной характеристики, которая представляет собой отношение приращения выходного напряжения к приращению скорости вращения

$$e = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta n}$$

где  $e$ —крутизна выходной характеристики,  $\text{в/об/мин}$ -,

$\Delta U_{\text{вых}}$ —приращение выходного напряжения,  $\text{в}$ ;

$\Delta n$  — приращение скорости вращения,  $\text{об/мин}$ .

В процессе работы тахогенераторов крутизна выходной характеристики может изменяться, что снижает их точность.

Происходит это, главным образом, под действием колебаний температуры обмотки возбуждения и переходного падения напряжения в щеточном контакте.

Для ослабления температурного влияния магнитная система тахогенератора при независимом возбуждении делается сильно насыщенной. В этом случае изменения сопротивления обмотки возбуждения, вызванные колебаниями температуры, хотя и сопровождаются изменениями величины тока возбуждения, но магнитный поток изменяется весьма незначительно.

В настоящее время отечественной электропромышленностью изготавливаются тахогенераторы нескольких серий (СЛ; ТД; ТГ), в том числе тахогенераторы с возбуждением постоянными магнитами (ТГП). Конструкция такого тахогенератора представлена на рис.7.

В конструктивном отношении этот тахогенератор отличается от машин с электромагнитным возбуждением лишь устройством магнитной системы, включающей в себя постоянный магнит. Следует отметить, что магнитные системы машин с возбуждением от постоянных магнитов отличаются большим разнообразием (рис. 8). Объясняется это тем, что постоянным магнитам гораздо легче придавать различные конструктивные формы, чем электромагнитам.

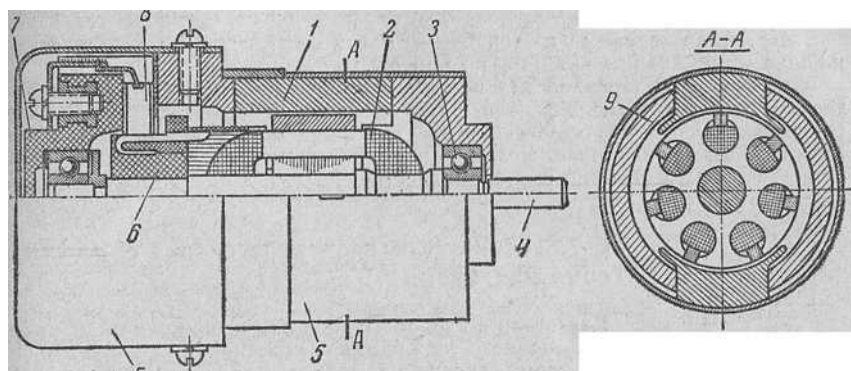


Рис. 7. Конструкция тахогенератора типа ТГП-2:

1—корпус с полюсами; 2 - якорь; 3 — подшипник; 4 - вал; 5 - кожух; 6 - коллектор; 7 - подшипниковый щит; 8 — щетки; 9 — постоянный магнит.

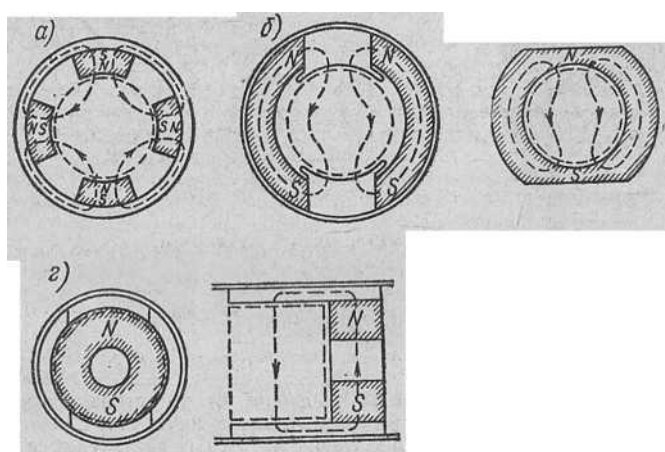


Рис.8. Разновидности магнитных систем с постоянными магнитами:

а - радиальные магниты; б — скобообразные магниты; в — кольцевой магнит; г — торцовый магнит.

Магнитная система с радиальным расположением магнитов (рис.8,а) получена путем замены электромагнитов постоянными магнитами, которые припаиваются к станине. Такая конструкция наиболее целесообразна в многополюсных машинах ( $2p > 2$ ). При  $2p = 2$  остается неиспользованным большое пространство между полюсами, которое при электромагнитном возбуждении заполняется обмоткой возбуждения. Указанный недостаток отсутствует в машинах со скобообразными конструкцией используется в двухполюсных машинах. Недостаток этой конструкции— ее сложность. Наиболее простую конструкцию магнитной системе обеспечивает кольцевой магнит (рис.8,в), получивший в двухполюсных машинах наибольшее распространение. Площадки у полюсов облегчают конструкцию, так как

материал в этой части магнита практически не используется.

Магнитная система с торцовым магнитом (рис.8,г) обеспечивает машине минимальный диаметр, но при этом возрастает ее длина.

В качестве материалов для постоянных магнитов применяются магнито-твердые материалы, обладающие широкой петлей гистерезиса. Наибольшее распространение для возбуждения электрических машин в настоящее время имеют сплавы на основе железо — никель—’алюминий, являющиеся лучшими по своим свойствам и экономичности.

### *5. Двигатели постоянного тока с печатной обмоткой якоря.*

Двигатели постоянного тока с печатной обмоткой якоря отличаются от машин постоянного тока обычной конструкции тем, что якорь этих двигателей имеет форму диска, на торцовые поверхности которого печатным способом нанесена обмотка якоря. Такая конструкция якоря привела к видоизменению и других узлов машины. Кроме того, двигатели с печатной обмоткой мощностью до 200 Вт не имеют отдельного коллектора. На рис.9 показана конструкция двигателя с печатной обмоткой якоря. Принцип работы этого двигателя такой же, что и двигателей с цилиндрическим якорем. При включении двигателя в сеть ток в обмотке якоря взаимодействует с магнитным полем возбуждения постоянных магнитов, расположенных на статоре двигателя и обращенных своими полюсными наконечниками к одной стороне пластмассового диска якоря. С другой стороны диска расположено кольцо из ферромагнитного материала. Это кольцо выполняет те же функции, что и сердечник, якоря в двигателях обычной конструкции, т. е. является элементом магнитной системы машины, через который замыкается основной магнитный поток. В двигателях с печатной обмоткой применяется также и электромагнитное возбуждение.



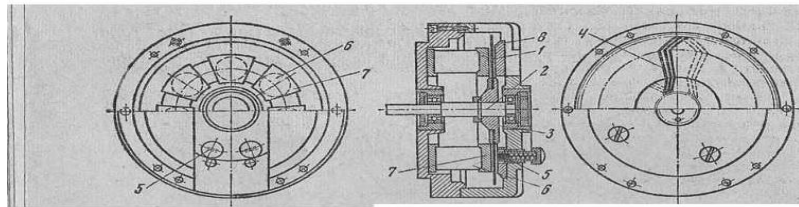


Рис. 9. Конструкция двигателя постоянного тока с печатной обмоткой якоря:

1—диск якоря; 2 - пал; 3 - втулка; 4 - обмотка якоря (печатная)) 5 - щеткодержатель со щеткой; 6 - постоянные магниты; 7 - полюсные наконечники; 8 — стальное кольцо

В этом случае каждый сердечник полюса снабжается полюсной катушкой возбуждения.

Обмотка якоря, т. е. ее медное изображение, наносится на обе стороны диска методом травления медной фольги. Для этого обе стороны диска покрываются медной фольгой требуемой толщины. Затем на поверхность фольги фотохимическим способом наносится изображение обмотки якоря а. виде защищающего проводники покрытия.

После травления диска раствором хлорного железа устраняется незащищенная часть фольги, а оставшаяся часть фольги образует обмотку якоря. Соединение частей обмотки, расположенных на противоположных сторонах диска, осуществляется через отверстия в диске.

Так как секции печатной обмотки одновитковые, а количество секций в обмотке ограничено площадью поверхности диска, то двигатели с печатной обмоткой выполняются обычно на низкое напряжение сети.

С целью увеличения мощности двигателя в некоторых конструкциях применяется многодисковое исполнение ротора. В этом случае двигатель представляет собой совокупность нескольких самостоятельных машин с печатной обмоткой ротора, собранных в одной магнитной системе, но с несколькими дисковыми роторами, укрепленными на общем валу. В

двигателях такой конструкции мощность может быть доведена до 20 кВт.

Наибольшее применение двигатели с печатной обмоткой якоря получили в автоматике, где они используются в качестве исполнительных двигателей.

Исполнительные двигатели предназначены для преобразования электрических сигналов в механическое перемещение. К таким двигателям предъявляется требование малоинерционности, т. е. быстроты воспроизведения электрического сигнала. Двигатели постоянного тока обычной конструкции не удовлетворяют этому требованию, так как их якоря включают в себя сердечник, что значительно повышает момент инерции якоря. В двигателях с печатной обмоткой якорь не имеет сердечника, что и обеспечивает двигателю необходимое быстродействие.

Кроме того, двигатели с печатной обмоткой обладают и другими достоинствами. Во-первых, более спокойной коммутацией, чем в Двигателях обычной конструкции, которая практически не сопровождается искрением. Объясняется это тем, что одновитковые секции обмотки якоря обладают незначительной индуктивностью, а поэтому реактивная э. д. с., наводимая в коммутирующих секциях, незначительная по величине. Кроме Того, одно- витковая конструкция секций обмотки способствует ослаблению реакции якоря, что также благоприятно влияет на процесс коммутации.

Следует также отметить, что конструкция ротора двигателя с печатной обмоткой способствует снижению уровня шумов, возникающих в процессе работы электрической машины.

Источниками шумов в машине являются механические и магнитные колебания.. В машинах постоянного тока обычной конструкции эти причины возникают из-за недостаточно точной балансировки якоря и пульсации магнитной индукции в зубцовом слое якоря. Но в двигателях с

печатной обмоткой небалансность якоря не вызывает значительных механических колебаний машины ввиду облегченной конструкции якоря, а пульсации магнитной индукции исключены, так как якорь имеет немагнитную конструкцию. Наряду с достоинствами двигателя с печатной обмоткой имеют некоторые недостатки. Во-первых, более низкий, чем в двигателях <sup>Глава VIII</sup> обычной конструкции, к.п.д. Объясняется это повышенной величиной немагнитного промежутка, который складывается из толщины диска якоря, удвоенной толщины- медной фольги и воздушных зазоров между поверхностями диска и полюсными наконечниками с одной стороны и стальным кольцом с другой стороны диска'. Значительная величина немагнитного промежутка создает большое магнитное сопротивление потоку возбуждения, что ведет к необходимости увеличения мощности системы возбуждения. При электромагнитном возбуждении это приводит к росту электрических потерь в обмотке возбуждения, а следовательно, к снижению к. и. д. машины.

Во-вторых, ограниченная долговечность двигателя с печатной обмоткой якоря без отдельного коллектора. В этих двигателях происходит износ печатных проводников обмотки якоря за счет истирания их коммутирующими щетками. Благодаря этому двигатели с печатной обмоткой, имеющие отдельный коллектор, более долговечны.





## ПОТЕРИ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.

### Виды потерь.

В процессе работы электрической машины в ней происходит преобразование одного вида энергии в другой. При этом часть энергии, поступающей в машину, рассеивается в отдельных ее участках, превращаясь в тепло.

В электрической машине существуют три вида потерь: магнитные (потери в стали), электрические (потери в меди) и механические. Расчет величины каждого вида потерь приводится ниже.

Магнитные потери вызываются перемагничиванием участков магнитной цепи машины. Они складываются из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов

$$P_c = P_\Gamma + P_{вх} \quad (1).$$

В процессе работы машины перемагничиваются только сердечник якоря и рубцовый слой.

Величина магнитных потерь в значительной степени зависит от значения магнитной индукции и частоты перемагничивания сердечника якоря /, т. е. от скорости вращения, так как  $f = \frac{pn}{60}$ . (2).

Величина магнитных потерь не зависит от нагрузки машины и при  $n = \text{const}$  их можно считать постоянными.

Электрические потери в машине обусловлены нагревом обмоток и щеточного контакта. Потери в цепи параллельной обмотки возбуждения

$$P_{эв} = U_{в} i_{в} \quad (3).$$

133

Здесь  $U_{в}$  — напряжение на зажимах обмотки возбуждения.

$$\text{Потери в обмотках цепи якоря} \quad P_{за} = I_a^2 \sum r_{75} \quad (4).$$

Здесь  $E_{78}$  — сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное температуре  $75^\circ \text{C}$ ,

$$\Sigma r_{75} = \Sigma r_1 [1 + \alpha(75^\circ - \theta_1)], \quad (5).$$

где  $\Sigma r_1$  — сопротивление обмоток в цепи якоря при температуре окружающей среды  $\theta_1$ ;

$\alpha$  — температурный коэффициент, для меди  $\alpha = 0,004 \text{ } 1/^\circ\text{град}$

Электрические потери имеют место также и в контакте щеток

$$P_{\text{щ}} = \Delta U_{\text{щ}} I_A \quad (6).$$

Здесь  $\Delta U_{\text{щ}}$  — переходное падение напряжения на щетках, принимается в соответствии с маркой щеток.

Как видно из формул (4) и (6), величина электрических потерь в цепи якоря и в щеточном контакте зависит от нагрузки машины, и поэтому эти потери называют *переменными*.

Механические потери в машине  $p_{\text{щ}}\%$  Складываются из потерь на трение в подшипниках  $p_{\text{в}}$ , трение щеток о коллектор  $p_{\text{к}}$  и потерь на вентиляцию  $p_{\text{в}}$ :

$$P_{\text{МЕХ}} = P_{\text{П}} + P_{\text{К}} + P_{\text{В}}$$

Все эти потери для данной машины зависят лишь от скорости вращения якоря, а поэтому при  $n = \text{const}$  их можно считать *постоянными*.

Сумма магнитных и механических потерь составляют *потери холостого хода*

$$P_0 = P_C + P_{\text{МЕХ}} \quad (7).$$

Если машина работает в качестве., двигателя в режиме холостого хода, то электрическая мощность на входе машины

133

$$P_{10} = P_0 + U_{\text{В}} I_{\text{В}},$$

откуда потери 'холостого хода

$$P_0 = P_{10} - U_{\text{В}} i_{\text{В}} \quad (8).$$

Таким образом, потери холостого хода могут быть определены

экспериментально.

Кроме перечисленных, потерь, в- машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь, которые складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в .уравнительных соединениях, потерь в стали якоря из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, потерь в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией основного потока вследствие зубчатости якоря и др . Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету величину. Поэтому, согласно ГОСТ 183—55, в машинах без компенсационной обмотки .величину добавочных потерь принимают равной 1% от полезной мощности для генераторов или 1% от подводимой мощности для двигателей. В машинах с компенсационной обмоткой величина добавочных потерь принимается равной 0,5%.

#### *Коэффициент полезного действия.*

Коэффициент полезного действия машины постоянного тока представляет собой отношение полезной мощности  $P_2$  к полной мощности  $P_1$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь

$$\Sigma p = p_C + p_{MEK} + P_{ЭВ} + P_{ЭА} + P_{Щ} + P_D, \quad (9) .$$

Обычно к. п. д. машин постоянного тока составляет 0,75—0,92 для машин мощностью до 100 *кет* и 0,93—0,97 для машин мощностью свыше 100 *кет*. Указанные значения к. п. д. соответствуют номинальной нагрузке машины. С изменением нагрузки машины изменяется ее к. п. д. Эта зависимость выражается графиком  $\eta = f(I)$

В режиме холостого <sup>133</sup>хода к. п. д. машины равен нулю, так как  $P_2 = 0$ . При увеличении нагрузки к. п. д. увеличивается сначала быстро, а затем медленнее; при нагрузке 0,75—0,85 от номинальной к. п. д. достигает максимального значения. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением к. п. д., так как при этом рост электрических потерь, пропорциональных квадрату тока, начинает превышать прирост полезной мощности.

