СОДЕРЖАНИЕ

Часть 2

3 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА 41
3.1 Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ)....41
3.2 Устройство и принцип действия генератора постоянного тока (ГПТ)...42
3.3 Поперечная реакция якоря в МПТ.....43
3.4 Магнитодвижущие силы и э.д.с. обмоток МПТ.....46
3.5 Петлевые якорные обмотки МПТ, основные параметры 47
3.6 Волновые якорные обмотки МПТ, основные параметры.....48
3.7 Уравнение коммутации МПТ, виды коммутация. Средства улучшения коммутации 49
3.8 Двигатель параллельного возбуждения и его рабочие характеристики 51
3.9 Двигатель последовательного возбуждения и его рабочие характеристики 52
3.10 Двигатель смешанного возбуждения и его рабочие характеристики….53
3.11 Способы пуска ДПТ 54
3.12 Способы регулирования частоты вращения.....55
3.13 Генератор независимого возбуждения и его рабочие характеристики…57
3.14 Генератор параллельного возбуждения и его рабочие характеристики..58
3.15 Генераторы смешанного возбуждения и его рабочие характеристики…59
3.16 Условия параллельной работы ГПТ. Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности 60
3.17 Энергетические диаграммы и коэффициент полезного действия МПТ...61
3.18 Универсальный коллекторный двигатель 62
3.19 Тахогенератор постоянного тока 63

Часть 2

3 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1 Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока (ДПТ)

Вводная часть.

Все процессы, происходящие в машинах постоянного тока (МПТ), могут быть объяснены с использованием четырех правил, характеризующих электромагнитные явления (приложение А):

1) правило получения электрического тока – "Нужно в замкнутый контур *К* поместить источник э.д.с. *Е*. В таком контуре потечет ток *I*";

2) правило получения магнитного поля – "Нужно в проводнике создать электрический ток *I*. Вокруг такого проводника будет образовано магнитное поле *Ф*";

3) правило получения механической силы – "Нужно проводник с током *I* поместить в магнитное поле *Ф*. На такой проводник будет действовать механическая сила *F*";

4) правило получения индукционной э.д.с. *Е* – "При всяком изменении магнитного поля *Ф*, пронизывающем контур *К*, в контуре наводится э.д.с. *Е*; направление индукционной э.д.с. определяется правилом Ленца, причем перед применением правила контур с э.д.с. надо замкнуть".

Четвертое правило применительно к МПТ можно заменить на более простое правило правой руки (рис.3.1), причем процедура определения направления индукционной э.д.с. *Е* существенно проще правила Ленца.

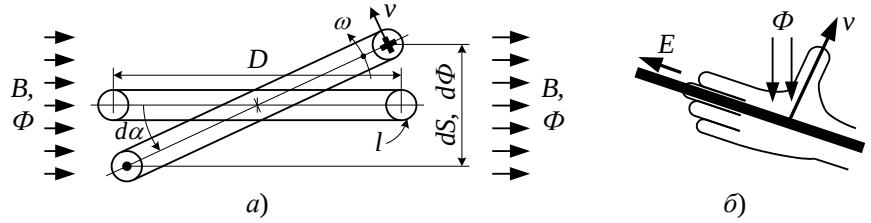


Рисунок 3.1 - К выводу правила правой руки из явления электромагнитной индукции (*а*) и правило правой руки (*б*)

Пусть контур (рис.3.1,а), вращающийся с частотой ω в магнитном поле, характеризуемым индукцией *B* поля, за время *dt* повернется на угол $d\alpha$, причем $d\alpha=\omega\cdot dt$. При поперечном *D* и продольном *l* размерах контура изменение площади *dS*, которую пронизывают лини магнитного поля индукцией *B*, за время *dt* будет равно

$$dS = l\cdot D\cdot d\alpha = l\cdot D\cdot\omega\cdot dt, \qquad (3.1)$$

а изменение $d\Phi$ магнитного потока Φ за то же время *dt* составит

$$d\Phi = B\cdot dS = B\cdot l\cdot D\cdot\omega\cdot dt \qquad (3.2)$$

В контуре в соответствии с явлением электромагнитной индукции наведётся э.д.с. E_2, равная

$$E_2 = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{B \cdot l \cdot D \cdot \omega \cdot dt}{dt} = B \cdot l \cdot D \cdot \omega = 2 \cdot B \cdot l \cdot \underbrace{\frac{D}{2} \cdot \omega}_{v} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v, \qquad (3.3)$$

где v - линейная скорость перемещения проводника относительно поля.

При вращении контура относительно поля перемещаются два продольных проводника l, и, поэтому в каждом и них будет наведена э.д.с. E, составляющая ровно половину э.д.с. E_2 (3.3). Учитывая это, в каждом из проводников контура, перемещающемся в магнитном поле, буде наведена э.д.с., равная

$$E = B \cdot l \cdot v \qquad (3.4)$$

Формулой (3.4) установлено правило получения индукционной э.д.с. E в МПТ: "В проводнике, перемещающемся со скоростью v в магнитном поле с индукцией B, наводится э.д.с. E".

Направление э.д.с. E, определенное с помощью правила Ленца будет таким, как показано на рис.3.1,а.

Построения, приведенные на рис.3.1,а и вид формулы (3.4), приводят к правилу правой руки (рис.3.1,б): "Правую руку нужно расположить так, чтобы в ладонь входили линии магнитного поля Φ, а большой отогнутый палец указывал на направление перемещения проводника в поле, то на направление э.д.с. укажут остальные четыре пальца".

Отмечаем, что правило правой руки не является универсальным, каким является правило Ленца, применительно к базовому определению получения индукционной э.д.с., но его применение при анализе МПТ является боле простым и, поэтому, предпочтительным.

Основная часть.

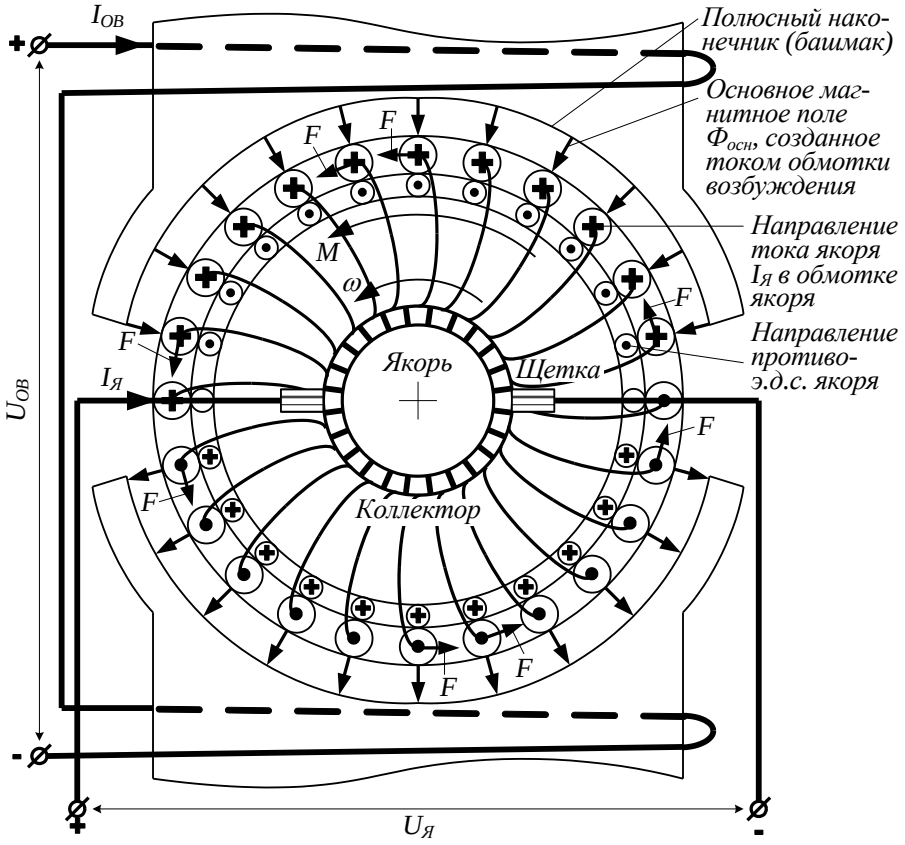
Двигатель постоянного тока (ДПТ) содержит (рис.3.2):

- обмотку возбуждения (ОВ), расположенную на статоре; к ОВ приложено постоянное напряжение возбуждения $U_{ОВ}$, которое создаёт в ней постоянный ток $I_{ОВ}$, который создает постоянное магнитное поле возбуждения $\Phi_{ОВ}$; с помощью полюсных наконечников, называемых из-за их формы, полюсными башмаками, вдоль их создается постоянное по величине магнитное поле, направленное к центру или от центра ДПТ; это поле называется основным $\Phi_{осн}$;
- ротор, называемый в ДПТ якорем; к обмотке якоря через расположенные на нем пластины коллектора и прилегающие к пластинам щетки, подводится внешнее постоянное напряжение, называемое напряжением якоря $U_Я$; это напряжение создает в обмотке якоря постоянный ток якоря $I_Я$.

Принцип действия ДПТ состоит в следующем: на проводники якоря, обтекаемые током $I_Я$, помещенные в магнитное поле $\Phi_{ОВ}$ обмотки возбуждения, действуют механические силы F. Направление сил F определяется правилом левой руки, что отображено на рис.3.2.

Проводники обмотки якоря укладываются в пазы якоря и подключаются к пластинам коллектора таким образом, что в частях обмотки якоря, расположенных по разные стороны относительно щеток, токи имеют одно и то же направление. Благодаря такому исполнению якоря, силы F, действующие на все проводники якорной обмотки, создают одинаковые по направлению вращающие моменты, следовательно, складываются и этим заставляют ротор вращаться в одну сторону, например против часовой стрелке, как показано на рис.3.2. Направление вращения якоря с частотой ω совпадает с направлением момента M. Если изменить полярность приложенного к якорю напряжения $U_Я$, то изменится направления тока $I_Я$ во всех проводниках обмотки якоря, и ДПТ будет

вращаться в другую сторону.



Риснок 3.2 - Устройство и принцип действия двигателя постоянного тока

Помимо основного эффекта – получения вращающего момента M, в ДПТ существует *побочный эффект* – возникновение в якоре э.д.с. вращения E. Эта э.д.с. возникает за счет того, что проводники якоря перемещаются в магнитном поле обмотки возбуждения $Ф_{ОВ}$. Направление э.д.с. вращения E, определенное по правилу правой руки, противоположно току $I_Я$. Так как ток $I_Я$ создается приложенным к якорю ДПТ напряжением $U_Я$, то направления $I_Я$ и $U_Я$ совпадают, а э.д.с. вращения E направлена навстречу к $U_Я$. Поэтому э.д.с. вращения E называют также противо-э.д.с. Установленное соотношение между направлениями E и $U_Я$ позволяет записать следующее уравнение цепи якоря ДПТ:

$$U_Я - E = R_Я I_Я \quad \Rightarrow \quad U_Я = E + R_Я I_Я \qquad (3.5)$$

В соответствии с (3.2) э.д.с. вращения E прямо пропорционально индуктивности B магнитного поля возбуждения, размерам обмотки D и l и частоте вращения ω якоря. Указанную пропорциональность принято записывать в виде

$$E = cФω, \qquad (3.6)$$

где c – коэффициент магнитного потока ДПТ.

Уравнение якорной цепи ДПТ примет вид

$$U_Я = cФω + R_Я I_Я \qquad (3.7)$$

Вопросы и задания

1. Какие электромагнитные явления наблюдаются в электрических машинах?

2. Как привести явление электромагнитной индукции к правилу правой руки?

3. Поясните устройство и назначение отдельных элементов ДПТ.

4. Каков принцип действия ДПТ?

5. Какой побочный эффект возникает во вращающемся ДПТ?

6. Поясните вывод уравнения электрического состояния якорной цепи ДПТ.

3.2 Устройство и принцип действия генератора постоянного тока (ГПТ)

Вводная часть та же, что и теме 3.1.

Основная часть.

Генератор постоянного тока (ГПТ) состоит из тех же элементов, что и ДПТ (сравните рис.3.2 и рис.3.3).

Назначением обмотки возбуждения является создание постоянного магнитного поля в зазоре между статором и якорем. Якорь ГПТ приводится во вращение сторонним двигателем, например, дизелем.

Принцип действия ГПТ состоит в следующем: в проводниках якоря, перемещающихся (вращающихся) в магнитном поле обмотки возбуждения $\Phi_{ОВ}$ наводится э.д.с. E. Направление э.д.с. E определяется правилом правой руки. Э.д.с. E снимается со щеток и выводится на клеммы генератора.

Если к клеммам ГПТ подключить нагрузку $R_Н$, замкнув ключ SA, то в нагрузке потечет ток якоря $I_Я$, которым будет создано на сопротивлении нагрузки $R_Н$ напряжение $U_Я$. Направление тока $I_Я$ совпадает с направлением э.д.с. E.

Уравнение цепи якоря, оставленное по 2-му закону Кирхгофа, имеет вид:

$$E = U_Я + R_Я I_Я \quad \Rightarrow \quad U_Я = E - R_Я I_Я \quad \Rightarrow \quad U_Я = c_Ф \omega - R_Я I_Я \qquad (3.8)$$

Уравнения ГПТ (3.8) и ДПТ (3.5 и 3.7) одинаковые по структуре и отличаются только знаком тока $I_Я$.

Помимо основного эффекта – получения э.д.с. E, в ГПТ существует *побочный эффект* – возникновение тормозящего момента M_T. направлено навстречу моменту $M_{диз}$ дизеля. Тормозящий момент M_T возникает за счет взаимодействия проводников обмотки якоря, обтекаемых током $I_Я$ нагруженного генератора, и магнитного поля обмотки возбуждения $\Phi_{ОВ}$. Направление момента M_T определенное по правилу левой руки, будет противоположным направлению момента $M_{диз}$, и если $M_{диз}$ заставляет якорь вращаться с частотой ω, то момент M_T будет направлен навстречу вращению. Величина тормозного момента M_T прямо пропорциональна коэффициенту магнитного потока $c_Ф$ ГПТ и току якоря $I_Я$:

$$M_T = c\,\Phi I_Я \qquad (3.9)$$

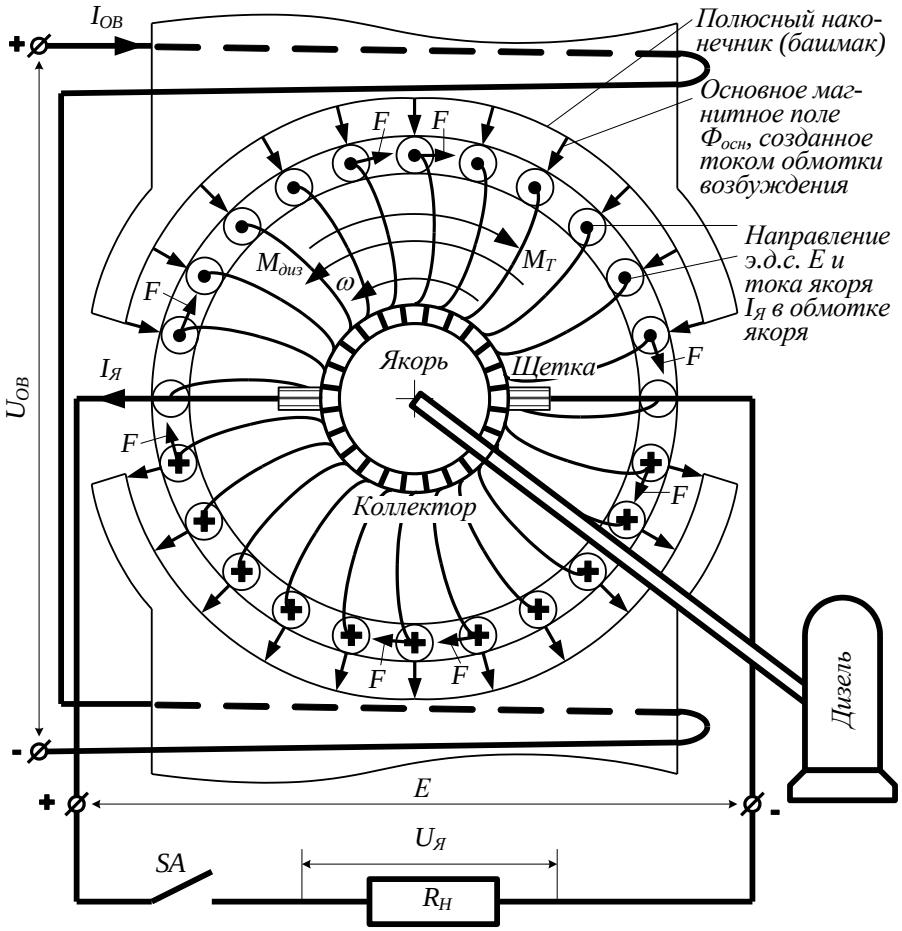


Рисунок 3.3 - Устройство и принцип действия генератора постоянного тока

Дизель развивает момент $M_{диз}$ за счет сжигания в нем топлива, что является расходованием тепловой энергии W_T. ГПТ вращается с постоянной частотой ω благодаря тому, что дизелем постоянно поддерживается равенство моментов: $M_{диз}=M_T$. Возникновение момента M_T связано с током $I_Я$ (3.9). Этим током в сопротивлении R_H выделяется электрическая энергия $W_Э = R_H I_Я^2 t$. Энергия $W_Э$ может взята только из тепловой W_T. Если якорь ГПТ приводится во вращение водяной турбиной падающим на нее потоком воды, то для вращения ГПТ расходуется механическая энергия. Значит, в ГПТ происходит преобразование в электрическую энергию энергии другого вида от устройства, способного вращать якорь ГПТ.

Вопросы и задания

1. Поясните принцип действия ГПТ и вид уравнения электрического состояния его якорной цепи.

2. Какой побочный эффект возникает в нагруженном ГПТ?

3. Поясните физику преобразования энергии сторонних механизмов, вращающих якорь ГПТ, в энергию электрическую.

3.3 Поперечная реакция якоря в МПТ

Вводная часть.

Для изложения сути вопроса понадобятся рисунки, составленные на основе рис.3.2 и 3.3. Для упрощения их начертания приняты следующие соглашения:

1). Обмотки возбуждения не будем отображать, оставим только изображения (в виде

стрелок) созданного ими магнитного поля.

2). Коллектор не будем изображать, переместив щеточный контакт с обмоткой якоря на сами проводники якоря, оголив их от изоляции в местах контакта. Места установки щеток определяем по перемычкам (изогнутым линиям), проведенным от обмотки якоря в пазу до пластины коллектора. Естественно, такая конструкция контакта на практике неприемлема из-за значительного истирания щеток об выступающую обмотку.

3). Все линии магнитного поля вокруг якоря, созданные обмоткой возбуждения, заменим одним суммарным вектором $\Phi_{осн}$ (рис.3.4,а), оставив за ним следующее свойство породившего его поля в зазоре: в верхней части относительно щеток магнитные поля зазора направлены к центру якоря, а в нижней – от центра.

4). Примем как реальной возможность восстановления линий магнитного поля в зазоре по результирующему вектору, например, $\Phi_{ря}$, задав дополнительно для поля в зазоре его равномерность вдоль дуги полюсного наконечника (рис.3.4,б).

Применение правил, изложенных в п.3 и 4, позволяет при построениях использовать только суммарные вектора $\Phi_{осн}$ и $\Phi_{ря}$, что упрощает графику рисунков, помня, что всегда можно перейти к полю в зазоре, отображенному множеством стрелок.

Основная часть.

Токи, протекающие в обмотке якоря МПТ, создают магнитное поле обмотки, называемое полем реакции якоря и обозначаемое как $\Phi_{ря}$. Направление вектора поля $\Phi_{ря}$ определяется правилом буравчика. Получается, что обмотка якоря МПТ взаимодействует с полем Φ_{Σ}, являющимся векторной суммой полей $\Phi_{осн}$ и $\Phi_{ря}$. Естественно, это отразится на работе и рабочих характеристиках МПТ. Влияние поля $\Phi_{ря}$ на рабочие характеристики МПТ называется *реакцией якоря.* Ввиду различия рабочих характеристик ДПТ и ГПТ, рассмотрим

явление реакции якоря раздельно для ДПТ и ГПТ.

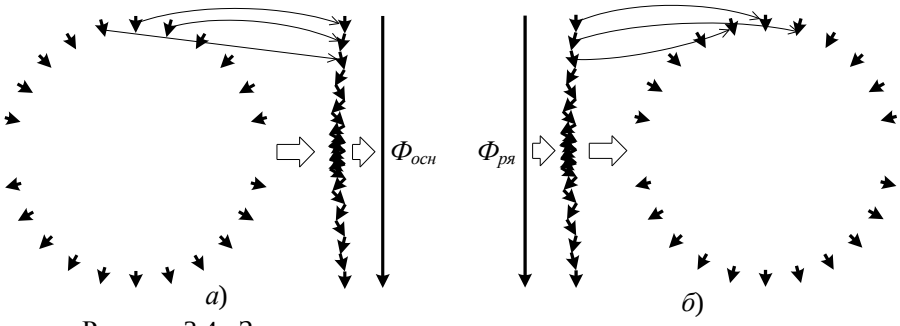


Рисунок 3.4 - Замена множества распределенных в пространстве векторов одним вектором их суммы (*а*) и наоборот (*б*)

Реакция якоря в ДПТ (рис.3.5).

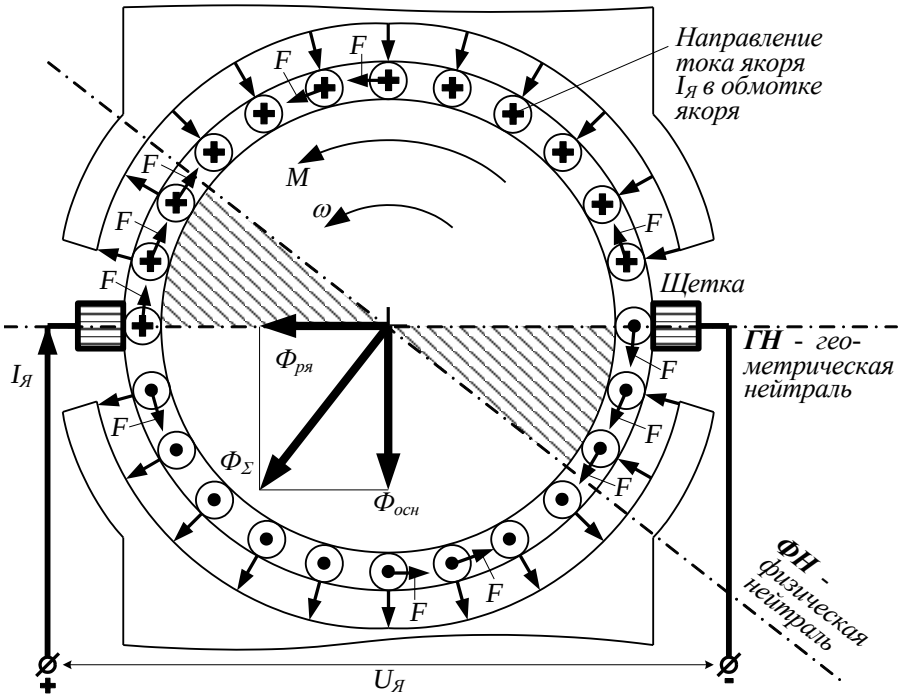


Рисунок 3.5 - Реакция якоря в ДПТ

Вектор основного магнитного потока $Ф_{осн}$, созданного обмоткой возбуждения направлен вниз и перпендикулярен оси, на которой установлены щетки. Ось, проходящая через щетки, называется *геометрической нейтралью – ГН.*

Ток $I_Я$ в обмотке якоря создает магнитное поле якоря $Ф_{ря}$, которое направлено влево. Его направление определено по правилу буравчика. Суммой двух полей $Ф_{осн}$ и $Ф_{ря}$ является поле $Ф_Σ$. Линия перпендикулярная полю $Ф_Σ$ называется *физической нейтралью – ФН*. Если поле $Ф_Σ$ разложить на составляющие поля вдоль зазора между полюсами статора и якорем по правилу, отображенному на рис.3.4,б, то окажется:

- над *ФН* линии магнитного поля зазора будут направлены к центру якоря;
- на линии *ФН* поле зазора будет нулевым;
- под *ФН* линии магнитного поля зазора будут направлены от центра якоря.

С учетом реакции якоря направление поля зазора в заштрихованных секторах изменится на противоположное. Этим полные магнитные потоки полюсов по их основному направлению уменьшатся, и такое явление называется *размагничивающим действием реакции якоря.* Направление тока $I_Я$ во всех проводниках обмотки якоря не изменится, так оно определяется исключительно полярностью якорного напряжения $U_Я$. Если применить к проводникам якоря, расположенных в заштрихованных секторах, правило левой руки, то окажется, что механическая сила *F* в них будет направлена навстречу вращению якоря – по часовой стрелке. В не заштрихованной части ротора механическая сила будет вращать ротор против часовой стрелки. Суммарный момент, действующий на якорь, уменьшится в сравнении с моментом, развиваемым без учета поля $Ф_{ря}$. Следовательно, реакция якоря ДПТ уменьшает его вращающий момент, а это ухудшение основной характеристики двигателя.

Из построений, приведенных на рис.3.5, следует, что при реакции якоря в ДПТ происходит поворот *ФН* относительно *ГН* против направления вращения якоря. Это правило должно учитываться при практическом устранении отрицательного действия реакции якоря на вращающий момент ДПТ.

<u>Реакция якоря в ГПТ (рис.3.6).</u>

Вектор основного магнитного потока $\Phi_{осн}$, созданного обмоткой возбуждения направлен вниз и перпендикулярен оси, на которой установлены щетки. Ось, проходящая через щетки, называется *геометрической нейтралью – ГН*.

В уложенных в пазы проводниках обмотки якоря будут индуктироваться э.д.с. $E_П$, направления которых определяется правилом правой руки. Сумма э.д.с. $E_П$ образует э.д.с. E ГПТ, которая подведена к щеткам. Направление тока якоря $I_Я$ нагруженного ГПТ будет совпадать с направлением суммарной э.д.с. E. Ток $I_Я$ создает магнитное поле якоря $\Phi_{ря}$, которое направлено вправо. Его направление определено по правилу буравчика. Суммой двух полей $\Phi_{осн}$ и $\Phi_{ря}$ является поле Φ_Σ. Линия перпендикулярная полю Φ_Σ называется *физической нейтралью – ФН*. Распределение линий поля Φ_Σ в зазоре будет отличающимся от распределения линий поля $\Phi_{осн}$ (рис.3.5):

- над *ФН* линии магнитного поля зазора будут направлены к центру якоря;
- на линии *ФН* поле зазора будет нулевым
- под *ФН* линии магнитного поля зазора будут направлены от центра якоря.

С учетом изложенного направление поля зазора в заштрихованных секторах изменится на противоположное, что также как и в ДПТ отражает размагничивающее действие якоря. Вследствие изменения направления поля в заштрихованных секторах изменится на противоположное, направления э.д.с. $E_П$
в проводниках пазов якоря, попавших в эти сектора. В не заштрихованной части ротора э.д.с. $E_П$ не изменят направления и будет такой, как при работе ГПТ вхолостую. Суммарная э.д.с. E, определяемая как алгебраическая сумма э.д.с. в витках, ограниченных щетками, уменьшится в сравнении с суммой э.д.с. без учета поля $\Phi_{ря}$. Следовательно, реакция якоря ГПТ уменьшает его э.д.с. E, а это ухудшение основной характеристики генератора.

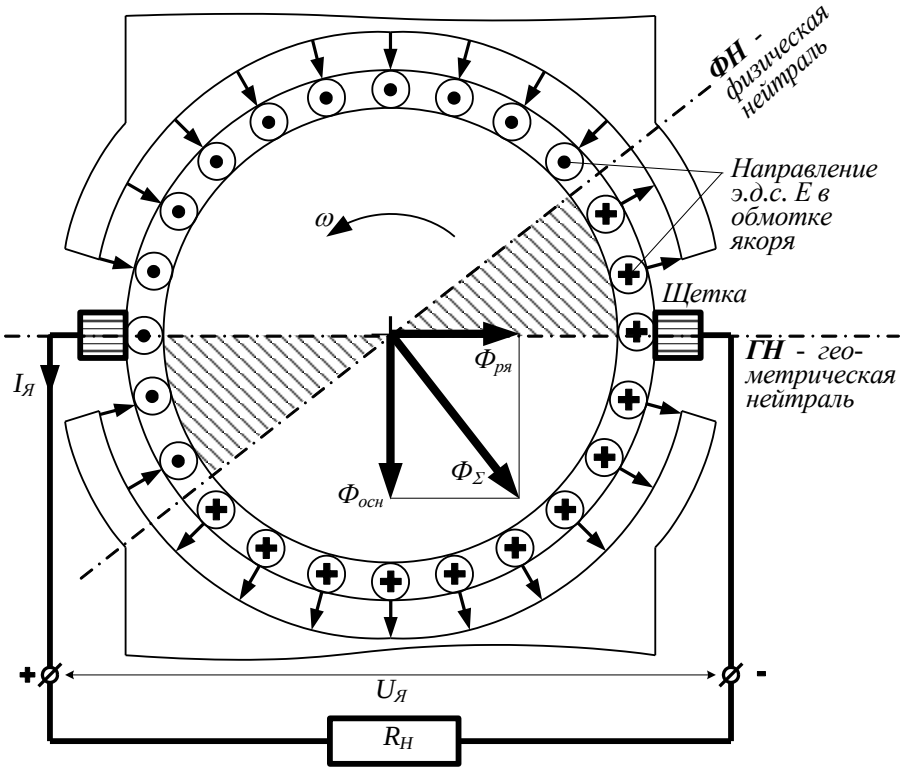


Рисунок 3.6 - Реакция якоря в ГПТ

Из построений, приведенных на рис.3.6, следует, что при реакции якоря в ГПТ происходит поворот нейтрали по направлению вращения якоря. Это правило важно для практического устранения отрицательного действия реакции якоря на величину э.д.с.

ГПТ.

Компенсация реакции якоря в МПТ.

Влияние реакции якоря как на ДПТ, так и на ГПТ, отрицательное, так как у ДПТ понижается вращающий момент, а ГПТ понижается э.д.с. E и, следовательно, напряжение $U_Я$ на нагрузке.

Если ДПТ или ГПТ работают со стабильной нагрузкой, то реакцию якоря можно скомпенсировать путем поворота траверсы, на которой установлены щетки:

- у ДПТ траверсу щеток нужно поворачивать против вращения якоря;
- у ГПТ траверсу щеток нужно поворачивать по вращению якоря.

Если ДПТ или ГПТ работают с изменяющейся в больших пределах нагрузкой, то реакцию якоря можно скомпенсировать установкой на статоре МПТ дополнительных полюсов (рис.3.7).

Между основными полюсами статора на оси геометрической нейтрали устанавливаются сердечники дополнительных полюсов *ДП*, и на них наматывается катушка из толстого провода, выдерживающего большой ток якоря (десятки – тысячи ампер). *ДП* создают вдоль оси геометрической нейтрали поле $Ф_{ДП}$. Поле реакции якоря также направлено вдоль оси геометрической нейтрали (см. рис.3.5 и 3.6). Параметры катушки *ДП* (размеры полюса, количество витков катушки) выбираются такими, чтобы поле $Ф_{ДП}$ было равно полю $Ф_{ря}$. Тогда в сумме трех полей - $Ф_{осн}$, $Ф_{ря}$ и $Ф_{ДП}$ – сумма полей $Ф_{ря}$ и $Ф_{ДП}$ будет нулевой, суммарное поле $Ф_{\Sigma}$ будет равно полю $Ф_{осн}$. Реакция якоря полностью скомпенсирована и эта компенсация действует при любой загрузке ДПТ или ГПТ.

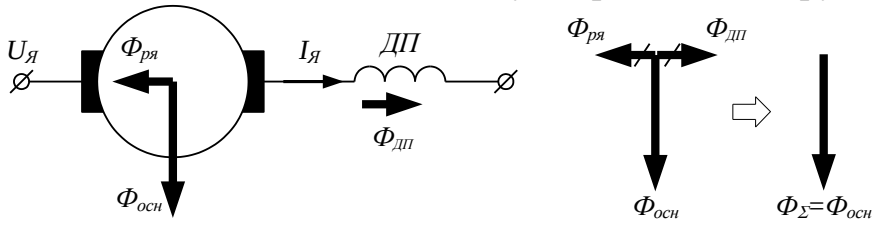


Рисунок 3.7 - Компенсация реакции якоря дополнительными полюсами (*ДП*)

Вопросы и задания

1. Что называется реакцией якоря у МПТ?

2. К каким отрицательным последствиям приводит реакция якоря у ДПТ?

3. К каким отрицательным последствиям приводит реакция якоря у ГПТ?

4. Поясните принцип компенсации реакции якоря с помощью дополнительных полюсов.

3.4 Магнитодвижущие силы и э.д.с. обмоток МПТ

Сначала рассмотрим ГПТ.

Обмотка якоря ГПТ состоит из многовитковых секций, уложенных в пазы ротора. Каждая секция подключена к смежным пластинам коллектора. К коллектору прилегают щетки (рис.3.8). Чтобы снять с обмотки якоря во внешнюю цепь максимальное напряжение, необходимо:

- секции соединить последовательно, чтобы обеспечить суммирование индуктируемых в секциях э.д.с. E;
- наложить щетки на те пластины коллектора, между которыми напряжение минимальное, чтобы уменьшить искрение щеточно-коллекторного узла.

Такие смежные пластины при холостом ходе ГПТ расположены на физической нейтрали (рис.3.6), а при наличии дополнительных полюсов (рис.3.7) – на геометрической нейтрали.

Обмотками возбуждения, заканчивающимися фигурными полюсными наконечниками (рис.3.2 и 3.3), в зазоре между полюсами и якорем реальное поле (рис.3.8), которое:

- в пределах наконечников значение индукции поля B_x практически постоянное;
- на участках якоря, расположенных между полюсами индукция магнитного поля B_x непрерывно изменяется от максимальной одного знака (под северным полюсом *N*) до максимальной другого знака (под южным полюсом *S*).

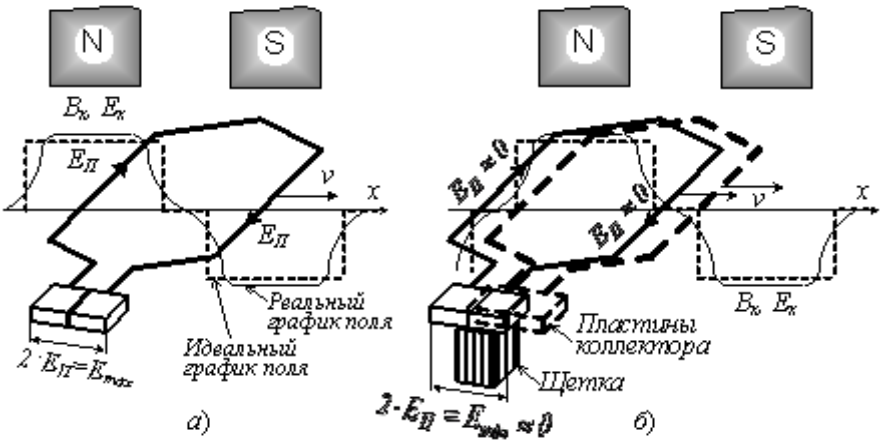


Рисунок 3.8 - Графики распределения индукции магнитного поля возбуждения B_x и э.д.с. E_x между соседними пластинами коллектора при расположении проводников якоря под полюсами (*а*) и между полюсами (*б*)

Рамки секций якорной обмотки имеют ширину, практически равную расстоянию между центрами полюсов. Концы секции выведены на смежные пластины. Рамка перемещается относительно полюсов со скоростью *v*. Если сторона рамки перемещается в магнитном поле с индукцией B_x, то в ней индуктируется э.д.с. E_x прямо пропорциональная индукции B_x (3.4). Значит графики э.д.с. E_x и индукции B_x подобные по форме (на рис.3.8 эти графики показаны совпадающими, что возможно после выбора соответствующего масштаба для графика E_x).

В секциях якорной обмотки, которые перемещаются под полюсами, индуктируется максимальная э.д.с. E_{max} (рис.3.8,а), а перемещающихся в межполюсном промежутке э.д.с. минимальная E_{min} (рис.3.8,б).

При вращении якоря щетками неизбежно будут происходить замыкания накоротко смежных коллекторных пластин, что приведет к протеканию в щетке и пластинах коллектора тока короткого замыкания. Очевидно, что для уменьшения тока короткого замыкания и, соответственно, искрения щеточно-коллекторного узла, щетки должны прилегать к той паре смежных пластин коллектора, на которые выведена секция, стороны которой перемещающихся в межполюсном промежутке. Значит, *щетки должны располагаться точно под центрами полюсов*.

Другие секции якорной обмотки, к пластинам коллектора которых не прижаты щетки, должны быть соединены последовательно, чтобы э.д.с. $E_П$ проводников секций суммировались, что позволит снять с ГПТ максимальную э.д.с. *E*. Это достигается соответствующими схемами укладки обмотки в пазы якоря.

Рассмотрим ДПТ.

В уравнении $U_Я = E + R_Я I_Я$ (3.5) цепи якоря ДПТ величина падения напряжения $R_Я I_Я$ на сопротивлении $R_Я$ проводников обмотки намного меньше (около *2...5%*) значений

подведенного напряжения $U_Я$ и э.д.с. вращения E. Поэтому, можно считать, что $U_Я=E$. Так как э.д.с. E равна сумме э.д.с. $E_П$, индуктируемых в уложенных в пазы проводниках обмотки якоря, то распределение подведенного извне якорного напряжения $U_Я$ между смежными пластинами коллектора будет в точности повторять распределение э.д.с. E. Для уменьшения искрения щеточно-коллекторного узла, щетки должны прилегать к той паре смежных пластин коллектора, на которые выведена секция, стороны которой перемещающихся в межполюсном промежутке. Значит, *щетки должны располагаться точно под центрами полюсов*.

Другие секции якорной обмотки, к пластинам коллектора которых не прижаты щетки, должны быть соединены так, чтобы протекающие по ним токи в пределах полюсных наконечников с ГПТ имели одно и то же направление, что обеспечит получение от ДПТ максимального вращающего момента. Это достигается соответствующими схемами укладки обмотки в пазы якоря.

Таким образом, требования к выбору места установки щеток для ГПТ и ДПТ совпали. Также определены требования к исполнению якорной обмотки ГПТ и ДПТ.

Вопросы и задания

1. Какие требования к обмотке якоря и к установке щеток должны быть выполнены, чтобы можно было снять с обмотки якоря ГПТ во внешнюю цепь максимальное напряжение?

2. Какие требования к обмотке якоря и к установке щеток должны быть выполнены, чтобы можно было снять с обмотки якоря ГПТ во внешнюю цепь максимальное напряжение?

3.5 Петлевые якорные обмотки МПТ, основные параметры

Вводная часть.

Якорные обмотки выполняются по шаблону в виде секций и укладываются в пазы якоря. Основным способом укладки является двухслойный, когда в одном пазу на разных ярусах уложены пучки витков, образующих стороны двух секций. Два вывода каждой секции припаяны (приварены) к паре коллекторных пластин. По способу подключения секций к пластинам якорные обмотки подразделяются на петлевые и волновые. Независимо от вида обмоток обязательными являются два условия:

- две активные стороны секции обмотки должны располагаться под разноименными полюсами – одна под северным полюсом, а другая – под южным;
- активные стороны секций, выводы которых подключены к тем пластинам коллектора, к которым прилегают щетки, должны находиться в межполюсном промежутке.

Для упрощения начертания схем обмоток якоря реальные многовитковые секции будет изображать в виде одного витка.

Рассмотрим четырехполюсную МПТ. Схема укладки в пазы и подсоединения секций к коллекторным пластинам, показанные на рис.3.9 и 3.10, выполнены с учетом следующих положений:

- количество пластин коллектора равно числу пазов на якоре;
- сторона секции, уложенная в нижний ярус паза, показана пунктиром, а в верхний ярус – сплошной линией;
- разделительный изоляционный промежуток между смежными коллекторными пла-

стинами расположены на оси симметрии той секции, концы которой присоединены к указанным пластинам;

- щетки устанавливаются на осях симметрии (центрах) полюсов;
- сдвиг по якорю между соседними секциями равен одному пазу.

Основная часть.

ГПТ с петлевой обмоткой (рис.3.9,а)

Рассмотрим секции якорной обмотки, выводы которых подсоединены к смежным пластинам *8-9* и *10-11* коллектора (на рис.3.9 эти секции выделены утолщенными линиями).

Стороны секции, подсоединенной к пластинам *8-9*, движутся вправо со скоростью *v* в межполюсном пространстве, в котором индукция магнитного поля близка к нулю (рис.3.8,б). Поэтому э.д.с. секции практически нулевая и она приложена к двум смежным пластинам *8* и 9, которые замкнуты накоротко прилегающей к ним щеткой. Тока короткого замыкания в щетке не будет, что и нужно для недопущения ее искрения.

К смежным пластинам *10-11* подключена секция, левая сторона которой перемещается в поле полюса *S*, а правая – в поле полюса *N*. Найденные с помощью правила правой руки направления э.д.с. *e* в активных сторонах этой секции направлены согласно и, поэтому складываются в э.д.с. $2 \cdot e$. Аналогично можно установить, что между смежными пластинами *9-10* и *11-12* действуют э.д.с. $2 \cdot e$. В целом между тремя парами смежных пластин *9-10, 10-11* и *11-12* действуют э.д.с. $2 \cdot e$, которые складываются и дают $6 \cdot e$. Э.д.с. $6 \cdot e$ выводится на левую клемму генератора с полярностью "+", а на правую – с полярностью "-". Подобно изложенному можно установить, что между парами смежных пластин с *4*-й по *7*-ю действуют однонаправленные э.д.с. $2 \cdot e$ и общая э.д.с. $6 \cdot e$ выводится также на левую клемму генератора с полярностью "+", а на правую – с полярностью "-". Всего на клеммы выводится со всех секций якорной обмотки э.д.с. равная $6 \cdot e$, причем образуется она в четырех параллельных ветвях якорной обмотки. Поэтому петлевую обмотку называют параллельной обмоткой. Она рассчитана на большой ток якоря.

ДПТ с петлевой обмоткой (рис.3.9,б)

Рассмотрим секции якорной обмотки, подсоединенным к пластинам с *4*-й по *8*-ю. Ток $I_Я$, создаваемый напряжением $U_Я$, втекает в щетку под пластиной *8* слева и вытекает через щетку *4* (путь прохождения тока отмечен утолщенной линией). Из проведенных построений видно, что:

- токи в сторонах секций, уложенных в один паз в разных ярусах, направлены в одну и ту же сторону;
- направления токов в сторонах секций, расположенных под полюсами *S* и *N* имеют противоположные направления.

Найденные с помощью правила левой руки направления сил $2 \cdot F$, действующих на стороны двух секций, размещенных в одном пазу, показывают, что все силы направлены в одну и ту же стороны, т.е. складываются арифметически по всем пазам.

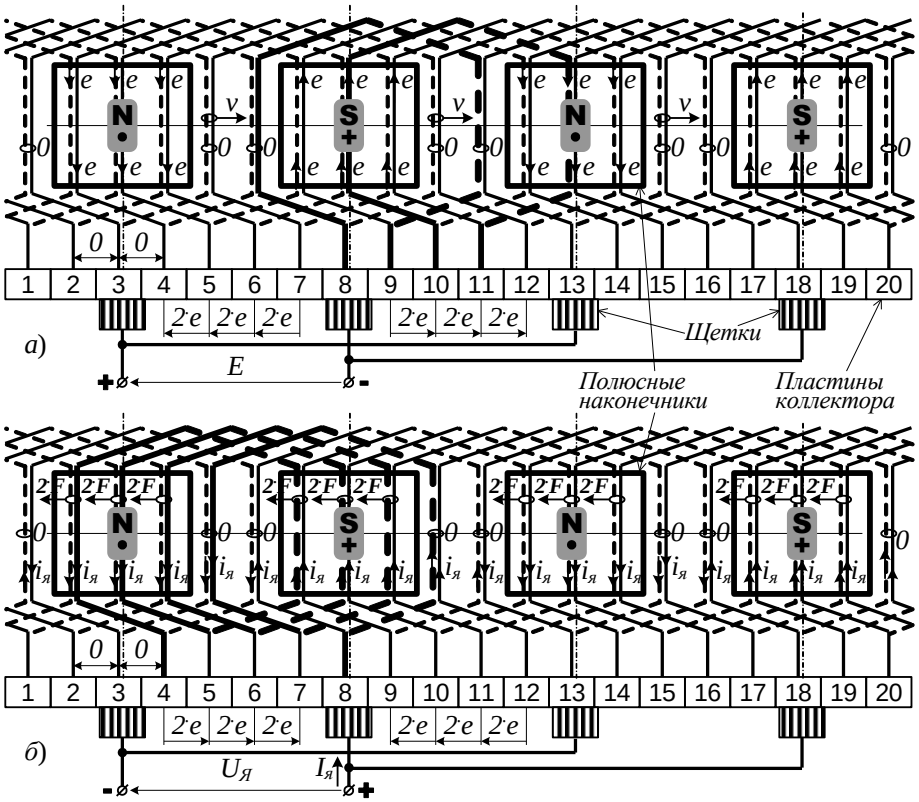


Рисунок 3.9 - Схемы петлевых обмоток якоря для ГПТ (*а*) и ДПТ (*б*); значения э.д.с. *e* в активных сторонах секций и э.д.с. *2·e* между смежными пластинами ГПТ; направления токов $i_Я$ в активных сторонах секций и направления механических сил *2·F*, действующих на витки якорной обмотки ДПТ

В каждой из активных секций при вращении якоря ДПТ индуктируется э.д.с. вращения величиной *2·e*, а между пластинами, к которым прилегают щетки, э.д.с. вращения будет нулевой, так соответствующие этим пластинам секции перемещаются в межполюсном пространстве с нулевым полем.

Вопросы и задания

1. Какие условия учитываются при укладке секций обмотки якоря в пазы и определении места установки щеток?

2. Обоснуйте принцип выбора места установки щеток в ГПТ.

3. Как направлены э.д.с. в активных секциях якорной обмотки ГПТ?

4. Обоснуйте принцип суммирования секционных э.д.с. в общую э.д.с. E ГПТ и принцип согласованности направлений э.д.с., образуемых в параллельных ветвях между щетками.

5. Как направлены токи во всех секциях якорной обмотки ДПТ?

6. Обоснуйте принцип суммирования механических сил, действующих на стороны активных секций в ДПТ.

3.6 Волновые якорные обмотки МПТ, основные параметры

Вводная часть та же, что и теме 3.5.

Основная часть.

ГПТ с волновой обмоткой (рис.3.10,а)

Рассмотрим секции якорной обмотки, выводы которых подсоединены к смежным пластинам *7-8* и *10-11* коллектора (на рис.3.9 эти секции выделены утолщенными лини-

ями).

При движении от пластины *7* будет пройдена секция, подсоединенная к промежуточной пластине *17*, и от нее будет пройдена секция, оканчивающаяся на пластине *8* (весь описанный путь показан утолщенной линией). Все стороны пройденных секций перемещаются в межполюсном пространстве, в котором индукция магнитного поля близка к нулю. Поэтому э.д.с. секциц практически нулевая и она приложена к двум смежным пластинам *7* и 8, которые замкнуты накоротко прилегающей к ним щеткой. Тока короткого замыкания в щетке не будет, что и нужно для недопущения ее искрения.

При движении от пластины *11* будет пройдена секция, подсоединенная к промежуточной пластине *1*, и от нее будет пройдена секция, оканчивающаяся на пластине *10* (весь описанный путь показан утолщенной линией). Все стороны пройденных секций перемещаются под полюсными наконечниками, которыми создается основное магнитное поле ГПТ. Найденные с помощью правила правой руки направления э.д.с. *e* в активных сторонах двух секциях направлены согласно и, поэтому складываются в э.д.с. *4·e*. Аналогично можно установить, что между смежными пластинами *9-10* и *11-12* действуют э.д.с. *4·e*. В целом между тремя парами смежных пластин *9-10, 10-11* и *11-12* действуют э.д.с. *4·e*, которые также складываются в *12·e*. Э.д.с. *12·e* выводится на левую клемму генератора с полярностью "-", а на правую – с полярностью "+". Из изложенного видно, что к смежным коллекторным пластинам выводится э.д.с. из двух последовательно соединенных секций Поэтому волновую обмотку называют последовательной обмоткой.

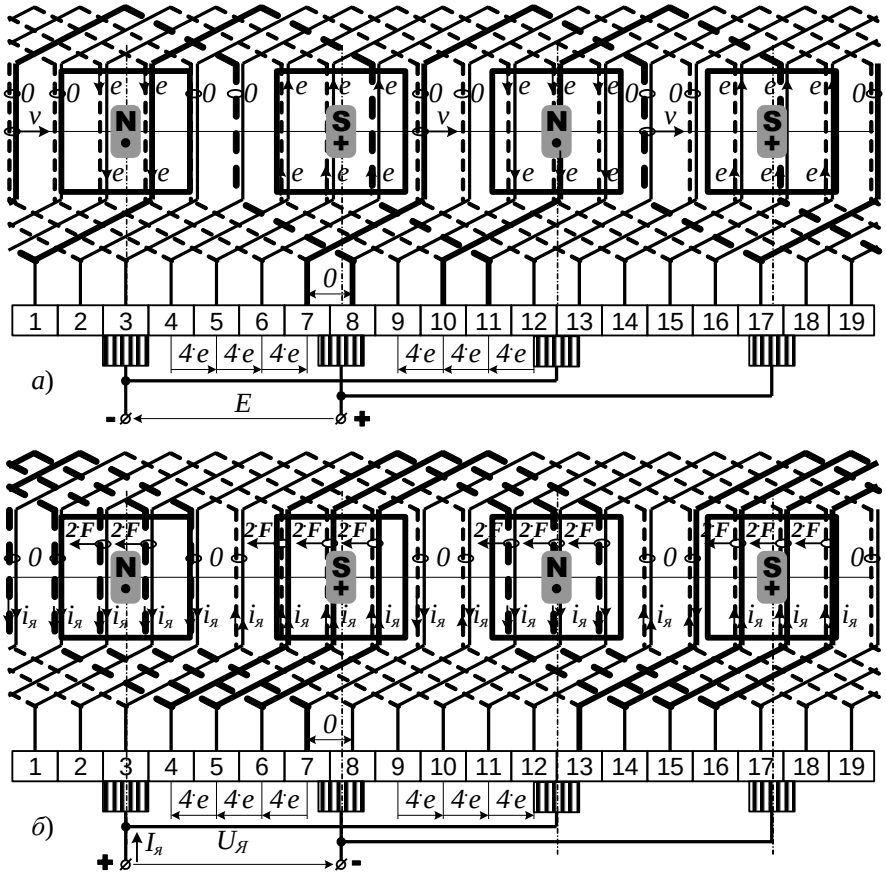


Рисунок 3.10 - Схемы волновых обмоток якоря для ГПТ (*а*) и ДПТ (*б*); значения э.д.с. *e* в активных сторонах секций и э.д.с. *4·e* между смежными пластинами ГПТ; направления токов $i_Я$ в активных сторонах секций и направления механических сил *2·F*, действующих на витки якорной обмотки ДПТ

<u>ДПТ с волновой обмоткой (рис.3.10,б)</u>

Рассмотрим секции якорной обмотки, к которым через пластину *13* подведен "+"

якорного напряжения $U_Я$. Далее, двигаясь по утолщенной линии, последовательно проходим пластины *5, 15, 6, 16, 7*. Ток $I_Я$, создаваемый напряжением $U_Я$, втекает в пластину *13* и вытекает через пластину *7*. Из проведенных построений видно, что:

- токи в сторонах секций, уложенных в один паз в разных ярусах, направлены в одну и ту же сторону;
- направления токов в сторонах секций, расположенных под полюсами *S* и *N* имеют противоположные направления.

Найденные с помощью правила левой руки направления сил $2 \cdot F$, действующих на стороны двух секций, размещенных в одном пазу, показывают, что все силы направлены в одну и ту же стороны, т.е. складываются арифметически по всем пазам.

В каждой из активных секций при вращении якоря ДПТ индуктируется э.д.с. вращения величиной $2 \cdot e$, а между пластинами, к которым прилегают щетки, э.д.с. вращения будет нулевой, так соответствующие этим пластинам секции перемещаются в межполюсном пространстве с нулевым полем.

Выбор типа обмотки МПТ.

Петлевая обмотка за счет параллельно соединенных секций выдерживает большие токи. Межколлекторные напряжения у МПТ малое. Поэтому петлевые обмотки применяют в МПТ большой мощности или же в низковольтных.

Волновая обмотка обеспечивает высокое межколлекторные напряжение, а ток в обмотках мал из-за того, что секции не соединены параллельно. Поэтому петлевые обмотки применяют в МПТ малой мощности или же в высоковольтных.

Вопросы и задания

1. Как направлены э.д.с. в активных секциях якорной обмотки ГПТ и почему напряжение между коллекторными пластинами выше, чем у ГПТ с петлевой обмоткой?

2. Обоснуйте принцип выбора места установки щеток в ГПТ.

3. Как направлены токи во всех секциях якорной обмотки ДПТ?

4. Обоснуйте принцип суммирования механических сил, действующих на стороны активных секций в ДПТ.

3.7 Уравнение коммутации МПТ, виды коммутация. Средства улучшения коммутации

Коммутацией называется процесс изменения тока в секциях обмотки якоря при переходе щетки с одной коллекторной пластины на другую смежную с ней (рис.3.11). Если щетки искрят, то МПТ имеет плохую коммутацию, а если искрение отсутствует, то коммутацию называют хорошей.

Причины искрения щеток разбиваются на две группы: механические и электромагнитные.

К механическим причинам относятся:

- биение коллектора, вызванное его эллиптичностью;
- шероховатость рабочей поверхности коллектора;
- наличие выступающих коллекторных пластин и изоляционных прокладок;
- вибрация щеткодержателей или заедание щеток в них;
- износ и ослабление прижимных пружин и др.

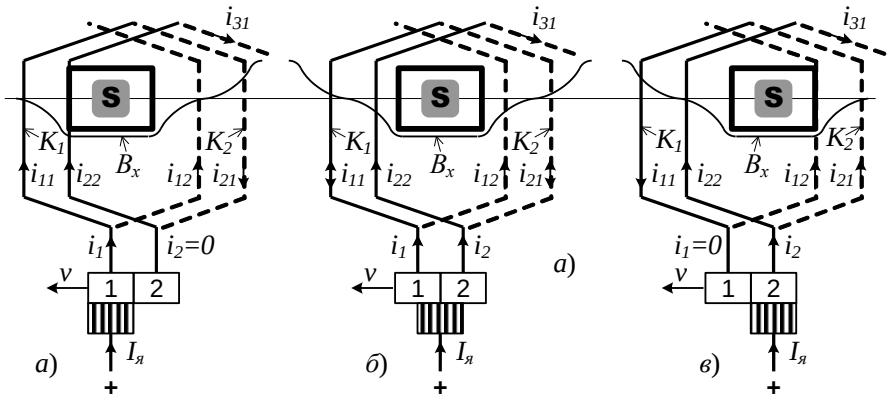


Рисунок 3.11 - Процесс коммутации при перемещении коллекторных пластин *1-2* относительно щетки в последовательности (*а*) → (*б*) → (*в*)

Электромагнитные причины проявляются в процессе перемещения щетки по коллектору, в результате которого происходит как замыкание секции, когда щетка перекрывает две и более пластины, так и разрыв цепи в момент схода щетки со смежной пластины. Затраты на эксплуатацию щеточно-коллекторного узла велики и в год достигают 1/3 стоимости самой МПТ.

Рассмотрим электромагнитные причины искрения щеток.

Пусть вначале щетка прижималась к пластине *1* коллектора (рис.3.11,а). Ток i_1 в петушке (петушком называется место подключения вывода секции обмотки якоря к коллекторной пластине) секции K_1 обмотки якоря равен току якоря $I_Я$, а ток i_2 в петушке пластины *2* нулевой. Направления токов i_{11}, i_{12}, i_{21} и i_{22} в сторонах секций K_1 и K_2 проставлены на рисунке. Пусть вращающийся якорь перемещается со скоростью *v* относительно неподвижной щетки справа-налево. Началом процесса коммутации является момент, когда щетка коснется пластины *2*, оставаясь в контакте с пластиной *1*. Окончанием процесса коммутации является момент, когда обрывается контакт щетки с пластиной *1* и щетка сцепляется только с пластиной *2* (рис.3.11,в). Теперь ток i_1 в петушке секции K_1 обмотки якоря будет нулевым, а ток i_2 в петушке пластины *2* будет равен току якоря $I_Я$. Направления токов i_{11}, i_{12}, i_{21} и i_{22} в сторонах секций K_1 и K_2 проставлены на рисунке.

Из сопоставления рис.3.11,а и рис.3.11,в видно, что направления токов i_{11} и i_{21} изменилось на противоположное, а направления токов i_{12} и i_{22} не изменилось. Смена направлений токов i_{11} и i_{21} сопровождается индуктированием в соответствующих сторонах секций э.д.с.

$$e_{11} = L\frac{di_{11}}{dt}, \qquad e_{21} = L\frac{di_{21}}{dt}$$

Так как токи i_{11} и i_{21} на рис.3.11,а и рис.11.3,в являются одним и тем же током, то производные от них совпадающие и индукционная э.д.с. $e_И$ в секции, подключенной к пластинам *1* и *2* равна сумме найденных э.д.с. e_{11} и e_{21}

$$e_И = 2L\frac{di_{11}}{dt} = 2L\frac{di_{21}}{dt} \qquad (3.10)$$

На рис.3.11 показан наконечник магнитного полюса, например, южного *S*, и график индукции B_x магнитного поля в зазоре (плоская часть графика) и в межполюсном промежутке (наклонные части). Площадь, ограниченная графиком B_x и осью нулевого значения B_x, является величиной магнитного потока *Ф*. На рис.3.11,а магнитный поток контура $Ф_{K1}$ максимальный и имеет направление южного *S* полюса. Магнитный поток контура $Ф_{K2}$ в целом имеет направление южного *S* полюса, но его величина будет

меньшей $Ф_{К1}$. На рис.3.11,в магнитный поток контура $Ф_{К2}$ будет южным S и максимальным, а магнитный поток контура $Ф_{К1}$ в целом имеет направление южного S полюса, но его величина будет меньшей $Ф_{К2}$. Значит при перемещении контуров $К_1$ и $К_2$ в них будет наводиться э.д.с. вращения $e_В$.

Сумма э.д.с. $e_И$ и $e_В$, приложенная к секции, подключенной к пластинам *1* и *2* коллектора, вызовет в этой секции переходный процесс изменения токов i_{11} и i_{21}, который ввиду их тождественности обозначим как ток i. Уравнения переходного процесса составляем для схемы, изображенной на рис.11.3,б, в которой как раз и происходят изменения направления токов i_{11} и i_{21}. Уравнение имеет вид:

$$e_И + e_В = R_{Щ1} i_1 + R_С i - R_{Щ2} i_2, \qquad (3.11)$$

где $R_{Щ1}$ и $R_{Щ2}$ – сопротивления скользящих контактов между щеткой и пластинами коллектора;

$R_С$ – сопротивление проводников секции.

Обычно значения $e_И$ и $e_В$ намного превосходят $R_{Щ1} i_1 + R_С i - R_{Щ2} i_2$, и, поэтому, простейшее уравнение коммутации можно принять следующим:

$$e_{È} + e_В = 0 \quad \text{или с учетом (3.10)} \quad 2L\frac{di}{dt} = -e_В \qquad (3.12)$$

Решением уравнения (3.12) является закон изменения тока в процессе коммутации в МПТ

$$i = -\frac{1}{2L}\int e_В dt + C, \qquad (3.13)$$

где $T_К$ – время коммутации, равное времени перемещения щетки с пластины *1* на пластину *2*.

Если в процессе коммутации э.д.с. $e_В$ была постоянной, то интеграл (3.13) примет вид

$$i = -\frac{e_В}{2L} t + C \qquad (3.14)$$

Подставляем в (3.14) граничные условия, получаем систему уравнений

$$i(0) = -\frac{e_В}{2L} 0 + C = I_Я, \qquad i(T_К) = -\frac{e_В}{2L} T_К + C = -I_Я,$$

откуда находим

$$C = I_Я \quad \text{и} \quad \frac{e_В}{2L} = \frac{2I_Я}{T_К} \qquad (3.15)$$

Подставляем найденное (3.15) в (3.14)и получаем окончательно

$$i = I_Я\left(1 - \frac{2}{T_К} t\right) \qquad (3.16)$$

Выражение (3.16) описывает *идеальную прямолинейную коммутацию* (рис.3.12, график 2), при которой в момент схода щетки с пластины *1* ток в петушке этой пластины будет нулевым (рис.3.11,в) и, поэтому, искрения щетки не будет.

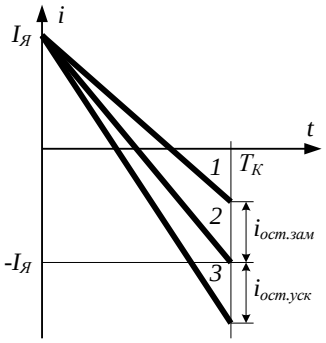


Рисунок 3.12 - Переходные процессы при замедленной (*1*), идеальной (*2*) и ускоренной (*3*) коммутации

Если э.д.с. $e_В$ будет так изменяться, что ток i не успеет обратиться в ноль (останется остаточный ток $i_{ост.зам}$), то в момент схода щетки с пластины *1* возникнет искра. Такая коммутация называется *замедленной* (рис.3.12, график 1). Если э.д.с. $e_В$ будет так изменяться, что она в момент схода щетки с пластины создаст ток остаточный ток $i_{ост.уск}$ обратного направления (в сравнении с замедленной коммутацией) и также в момент схода щетки с пластины *1* возникнет искра. Такая коммутация назы-

вается *ускоренной* (рис.3.12, график 3).

Основным средством улучшения коммутации является применение дополнительных полюсов (рис.3.7). Этим снижается величина э.д.с. e_B и, соответственно, величины остаточного тока $i_{ост}$ как замедленной, так и ускоренной коммутации. Искрение под щеткой становится малым.

В машинах большой мощности устанавливают еще компенсационную обмотку. Укладывают ее в пазы, нарезанные в торце полюсного наконечника, обращенного к якорю.

Вопросы и задания

1. Поясните электромагнитные причины искрения щеток.

2. Поясните смысл э.д.с. $e_И$ и e_B.

3. Составьте уравнение коммутации и найдите его решения для случая идеальной прямолинейной коммутации.

4. Что представляет собой замедленная и ускоренная коммутация и почему при этих коммутациях возникает искрение щеток?

5. Какие существуют методы устранения причин механического и электромагнитного искрения щеток?

3.8 Двигатель параллельного возбуждения и его рабочие характеристики

Якорь *Я* и обмотка возбуждения *ОВ* подключены параллельно к источнику постоянного напряжения *U* через регулировочные дополнительные сопротивления $R_{ДЯ}$ и $R_{ДВ}$ (рис.3.13). Такой ДПТ называют также *шунтовым*. Двигатель вращается с частотой ω и развивает на валу вращающий момент *M*.

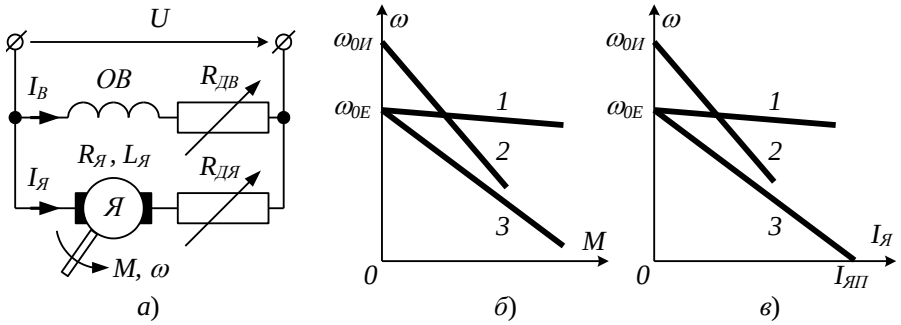


Рисунок 3.13 - Схема включения ДПТ с параллельным возбуждением (*а*), механическая (*б*) и электромеханическая (*в*) характеристики

Уравнение обмотки возбуждения

$$U = \left(R_{ОВ} + R_{ДВ}\right) I_B \qquad (3.17)$$

Уравнения цепи якоря в переходном и установившемся режимах

$$U = e + \left(R_Я + R_{ДЯ}\right) i_Я + L_Я \frac{di_Я}{dt} \quad \text{и} \quad U = E + \left(R_Я + R_{ДЯ}\right) I_Я, \qquad (3.18)$$

где *e* либо *E* - э.д.с. вращения ДПТ, определяемая по выражению (3.6).

Уравнение цепи якоря (3.18) для установившегося режима с учетом (3.6)

$$U = c_Ф \omega + \left(R_Я + R_{ДЯ}\right) I_Я, \qquad (3.19)$$

где *c* ф– коэффициент магнитного потока ОВ, который пропорционален току I_B в ней, определяемый согласно (3.17):

$$c_Ф = k_{OB} I_B = \frac{k_{OB} U}{R_{OB} + R_{ДВ}}, \qquad (3.20)$$

где k_{OB} - конструктивный коэффициент обмотки возбуждения.

Решением уравнения (3.19) относительно ω является электромеханическая характеристика (ЭМХ) ДПТ:

$$\omega = \frac{U}{c_Ф} - \frac{R_Я + R_{ДЯ}}{c_Ф} I_Я, \qquad (3.21)$$

показывающая зависимость частоты вращения ω ДПТ от тока якоря $I_Я$.

Если ДПТ не нагружен (работает вхолостую), то ток якоря $I_Я$ нулевой, а частота вращения ω называется частотой ω_0 холостого хода, которая согласно (3.21) равна

$$\omega_0 = \frac{U}{c_Ф} \qquad (3.22)$$

После замены в (3.21) тока якоря $I_Я$ на найденное из (3.9) значение $I_Я = \frac{M}{c_Ф}$, получим механическую характеристику (МХ) ДПТ:

$$\omega = \omega_0 - \frac{R_Я + R_{ДЯ}}{c_Ф^2} M, \qquad (3.23)$$

МХ показывает зависимость частоты вращения ω ДПТ от вращающего момента M.

ЭМХ и МХ, определяемые выражениями (3.21) и (3.23), являются прямыми линиями (рис.3.13,б,в).

Если напряжение питания U схемы номинальное $U_{ном}$ и ОВ и якорь подключены к питанию напрямую без дополнительных сопротивлений $R_{ДВ}$ и $R_{ДЯ}$, то ЭМХ и МХ называются естественными (графики *1* на рис.3.13,б,в), а частота холостого хода ω_{0E} называется естественной. Коэффициенты наклона естественных ЭМХ и МХ согласно (3.21) и (3.23) равны

$$k_{ЭМХ.Е} = \frac{R_Я}{c_Ф} \quad \text{и} \quad k_{МХ.Е} = \frac{R_Я}{c_Ф^2} \qquad (3.24)$$

Если напряжение питания U схемы номинальное $U_{ном}$ и ОВ и якорь подключены к питанию через дополнительные сопротивления $R_{ДВ}$ и $R_{ДЯ}$, то ЭМХ и МХ называются искусственными (графики *2* и *3* на рис.3.13,б,в). Частота холостого хода при номинальном возбуждении (сопротивление $R_{ДВ}$ выведено) равна естественной ω_{0E} (графики *3* на рис.3.13,б,в). При введении сопротивления $R_{ДВ}$ ток возбуждения I_B в соответствии с (3.17) понижается и снижается коэффициент магнитного потока $c_Ф$ (3.20). Частота холостого хода ω_0 становится больше ω_{0E} (3.22) и называется она частотой холостого хода $\omega_{0И}$ искусственной характеристики (графики *2* на рис.3.13,б,в).

Коэффициенты наклона естественных ЭМХ и МХ согласно (3.24) увеличиваются как при введении сопротивления $R_{ДЯ}$ (числители формул (3.24), так и при введении $R_{ДВ}$, так как ослабляется магнитный поток и уменьшается коэффициент потока $c_Ф$ (3.20).

Ток якоря $I_Я$ в момент пуска, определяемый из ЭМХ при частоте $\omega=0$, называется пусковым $I_{ЯП}$. При прямом пуске ДПТ на естественной характеристике (без сопротивления $R_{ДЯ}$), пусковой ток $I_{ЯП}$ в *5...40* раз превышает номинальный ток якоря $I_{Я.НОМ}$. Этот ток намного превышает допустимый, равный (*2...3*)$I_{Я.НОМ}$, по условиям возникновения опасного искрения щеточного узла якоря.

Если обмотка возбуждения и якорь получают питание от двух независимых источников постоянного напряжения и , то ДПТ является двигателем с независимым возбуждения. Для него ЭМХ и МХ такие же, как и для ДПТ с параллельным возбуждением.

Вопросы и задания

1. Составьте уравнения цепи обмотки возбуждения и якоря.

2. Выведите выражения ЭМХ и МХ ДПТ.

3. Какие характеристики ДПТ называются естественными, а какие искусственными?

4. Как влияют дополнительные сопротивления $R_{ДЯ}$ и $R_{ДВ}$ на наклон и частоту холостого хода ЭМХ и МХ?

3.9 Двигатель последовательного возбуждения и его рабочие характеристики

В двигателе с последовательным возбуждением (*сериесном* ДПТ) основной магнитный поток создается обмоткой возбуждения, которая включена последовательно с якорем и по которой протекает ток якоря $I_Я$ (рис.3.14,а).

Уравнение цепи якоря сериесного ДПТ, выражения э.д.с. вращения *е*, момента *М* а также ЭМХ и МХ ДПТ по структуре такие же, как у шунтового:

$$U_Я = c_Ф(I_Я)\omega + (R_Я + R_{ОВ})I_Я \quad \Rightarrow \quad \omega = \frac{U_Я}{c_Ф(I_Я)} - \frac{R_Я + R_{ОВ}}{c_Ф(I_Я)} I_Я \text{ – ЭМХ,}$$

$$M = c_Ф(I_Я)\cdot I_Я \quad \Rightarrow \quad I_Я = f(M) \text{ – определение момента,} \qquad (3.25)$$

$$\omega = \frac{U_Я}{c_Ф(f(M))} - \frac{R_Я + R_{ОВ}}{c_Ф(f(M))} f(M) \text{ – МХ.}$$

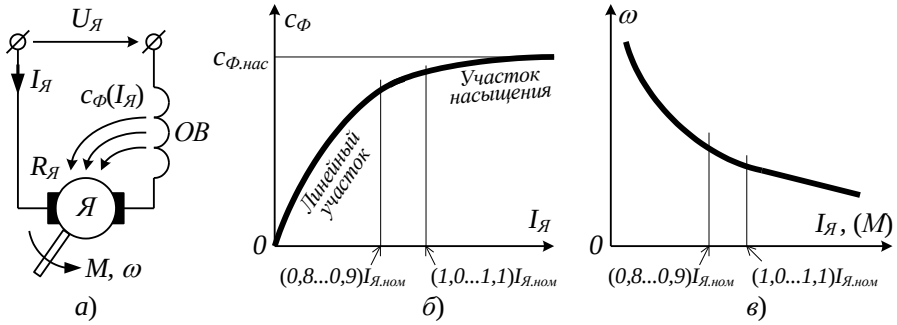


Рисунок 3.14 - Схема включения ДПТ с последовательным возбуждением (*а*), характеристика намагничивания (*б*) и электромеханическая характеристика (*в*)

Для конкретизации зависимостей

$$c_Ф(I_Я), \quad M = c_Ф(I_Я)\cdot I_Я \quad \text{и} \quad I_Я = f(M) \qquad (3.26)$$

и, в последующем, формы ЭМХ и МХ нужно учесть нелинейный вид кривой намагничивания магнитопровода основных полюсов (рис.3.14,б). Для тока $I_Я$ якоря в интервале от нуля до $(0,7...0,9)I_{Я.ном}$ коэффициент потока $c_Ф$ практически прямо пропорционален току $I_Я$, т.е. $c_Ф=k_ФI_Я$. Для тока $I_Я$ якоря в интервале $(1,0...1,1)I_{Я.ном}$ коэффициент потока $c_Ф$ практически не меняется, достигнув своего насыщенного значения $c_{Ф.нас}$.

<u>Расчет и построение ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода ДПТ.</u>

Для линейного участка с $I_Я>(1,0...1,1)I_{Я.ном}$ зависимости (3.26) принимают вид:

$$c_Ф(I_Я) = k_ФI_Я, \quad M = k_ФI_Я^2 \quad \text{и} \quad I_Я = f(M) = \sqrt{\frac{M}{k_Ф}} \qquad (3.27)$$

Подставляем (3.27) в выражения ЭМХ и МХ, представленные в (3.25), и получаем:

$$\omega = \frac{U_Я}{k_Ф I_Я} - \frac{R_Я + R_{ОВ}}{k_Ф} \quad – \quad ЭМХ,$$
$$\omega = \frac{U_Я}{\sqrt{k_Ф M}} - \frac{R_Я + R_{ОВ}}{k_Ф} \quad – \quad МХ. \qquad (3.28)$$

Графиками ЭМХ и МХ являются гиперболы (рис.3.14,в)

Расчет и построение ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода ДПТ.

Для насыщенного участка зависимости (3.26) принимают вид:

$$c_Ф(I_Я) = c_{Ф.нас}, \quad M = c_{Ф.нас} I_Я \quad и \quad I_Я = f(M) = \frac{M}{c_{Ф.нас}} \qquad (3.29)$$

Подставляем (3.29) в выражения ЭМХ и МХ, представленные в (3.25), и получаем:

$$\omega = \frac{U_Я}{c_{Ф.нас}} - \frac{R_Я + R_{ОВ}}{c_{Ф.нас}} I_Я \quad – \quad ЭМХ,$$
$$\omega = \frac{U_Я}{c_{Ф.нас}} - \frac{R_Я + R_{ОВ}}{c^2_{Ф.нас}} M \quad – \quad МХ. \qquad (3.30)$$

Графиками ЭМХ и МХ являются прямые линии (рис.3.14,в)

Анализ ЭМХ и МХ сериесного ДПТ.

В диапазоне допустимой нагрузки длительного режима работы сериесного ДПТ механические характеристики являются мягкими и имеют гиперболический вид. Это приводит к значительному изменению частоты вращения ω при изменении механической нагрузки на валу. При малых нагрузках частота вращения ω резко возрастает и может превысить максимально допустимое значение – двигатель идет в "разнос". Поэтому сериесные ДПТ нельзя применять для привода механизмов, которые могут работать без нагрузки. Обычно минимально допустимая нагрузка составляет $(0{,}2...0{,}25)M_{ном}$.

Несмотря на указанный недостаток сериесные ДПТ для получения некоторого значения момента M потребляют ток $I_Я$ меньший, чем в тех же условиях потребляет шунтовой ДПТ. Например, если вращающий момент M нужно увеличить в *4* раза, то у шунтового ДПТ ток $I_Я$ должен быть увеличен также в *4* раза, а у сериесного ДПТ ток $I_Я$ в соответствии с (3.27) увеличится только в *2* раза. За это свойство значительного увеличения момента при умеренном увеличении потребления тока сериесные ДПТ называют тяговыми двигателями.

Вопросы и задания

1. Приведите выражения ЭМХ и МХ в общем виде.

2. Приведите выражения ЭМХ и МХ для линейного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.

3. Приведите выражения ЭМХ и МХ для насыщенного участка кривой намагничивания стали магнитопровода.

4. Какие недостатки и достоинства имеют сериесные ДПТ?

3.10 Двигатель смешанного возбуждения и его рабочие характеристики

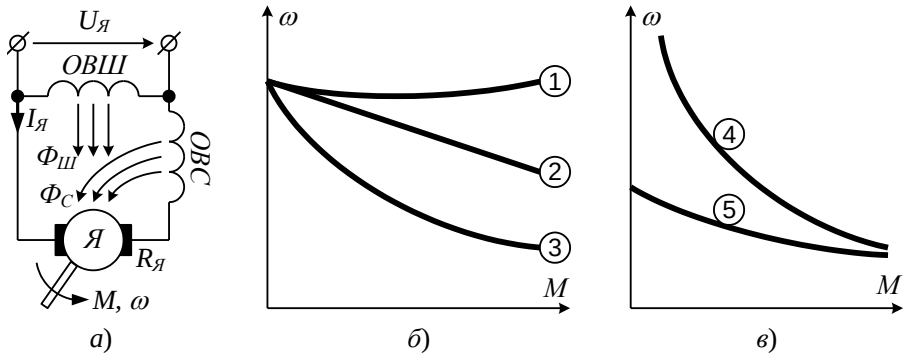
Двигатель смешанного возбуждения, называемый также *компаундным* ДПТ, содержит шунтовую и сериесную обмотки возбуждения (рис.3.15,а). Совместным действием обоих обмоток возбуждения создается суммарный поток

а) $Ф_{ОВ}=Ф_Ш \pm Ф_С$ – для ДПТ параллельно-последовательного возбуждения, если поток $Ф_Ш$ шунтовой обмотки больше потока $Ф_С$ сериесной ($Ф_Ш > Ф_С$);

б) $Ф_{ОВ}=Ф_С+Ф_Ш$ – для ДПТ последовательно-параллельного возбуждения, если поток

Φ_C сериесной обмотки больше потока $\Phi_Ш$ шунтовой ($\Phi_C > \Phi_Ш$).

У первого типа ДПТ возможно как согласное включение шунтовой и сериесной обмоток (потоки $\Phi_Ш$ и Φ_C складываются), так и встречное (потоки $\Phi_Ш$ и Φ_C вычитаются). У второго типа ДПТ применяется только согласное включение шунтовой и сериесной обмоток (потоки Φ_C и $\Phi_Ш$ складываются).



Риснок 3.15 - Схема включения ДПТ со смешанным возбуждением (*а*), механические характеристика ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением (*б*) и с последовательно-параллельным (*в*)

<u>ДПТ параллельно-последовательного возбуждения.</u>

Механическая характеристика, созданная основной, шунтовой обмоткой является прямой линией *2* (рис.3.15,б).

При согласном включении шунтовой и сериесной обмоток ($\Phi_{ОВ}=\Phi_Ш+\Phi_C$) суммарный магнитный поток $\Phi_{ОВ}$ превышает поток шунтовой $\Phi_Ш$. Так как в выражения МХ магнитный поток входит в знаменатель обоих слагаемых (формулы (3.23) и (3.25)), то результирующая МХ *3* проходит ниже характеристики *2*. Кроме того МХ сериесной обмотки является мягкой и, поэтому, результирующая МХ *3* также мягче МХ *2*.

При встречном включении шунтовой и сериесной обмоток ($\Phi_{ОВ}=\Phi_Ш-\Phi_C$) суммарный магнитный поток $\Phi_{ОВ}$ меньше потока шунтового $\Phi_Ш$. Так как в выражения МХ магнитный поток входит в знаменатель обоих слагаемых (формулы (3.23) и (3.25)), то результирующая МХ *1* проходит выше характеристики *2*. Кроме того, МХ сериесной обмотки является мягкой и вычитается из МХ шунтовой обмотки, поэтому результирующая МХ *1* также жестче МХ *2*.

Согласное включение ОВШ и ОВС применяют для повышения нагрузочной способности ДТ при незначительном увеличении тока якоря. Встречное включение ОВШ и ОВС применяют для увеличения жесткости МХ, что позволяет практически стабилизировать частоту вращения ДПТ при изменении нагрузки в широких пределах изменения механической нагрузки двигателя.

<u>ДПТ последовательно-параллельного возбуждения.</u>

Механическая характеристика, созданная основной, сериесной обмоткой является гиперболой *4* (рис.3.15,в). Согласное включение шунтовой обмотки позволяет исключить снижение результирующего потока $\Phi_{ОВ}$ до нуля при значительной разгрузке ДПТ по моменту. Это позволяет избежать "разноса" ДПТ (МХ *5* на рис.3.15,в).

Компаундные ДПТ с МХ типа *5* применяют преимуществе в электротранспорте, как обладающие наилучшими тяговыми свойствами.

Вопросы и задания

1. Какие способы включения шунтовой и сериесной обмоток применяют в компаундном ДПТ?

2. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с параллельно-последовательным возбуждением.

3. Поясните особенности МХ компаундного ДПТ с последовательно-параллельным возбуждением.

3.11 Способы пуска ДПТ

Существуют три основных способа пуска ДПТ:

1. Прямой пуск.
2. Разгон с пусковым сопротивлением в цепи якоря.
3. Разгон с плавным повышением якорного напряжения.

Критериями выбора способа пуска являются:

- ограничение тока во время разгона ДПТ на уровне, который является безопасным для щеточно-коллекторного узла;
- получение большого вращающего момента на всем интервале разгона.

Ограничение тока снижает искрение щеток и коллектора, чем продлевается ресурс эксплуатации ДПТ. Повышение вращающего момента ДПТ сокращает время разгона ДПТ с неподвижного состояния до номинальной частоты вращения, что сокращает время, в течение ток ДПТ был выше номинальным и, следовательно, уменьшает разогрев обмоток и наиболее чувствительной его части – изоляции обмоток. Этим также продлевается ресурс эксплуатации ДПТ.

<u>Прямой пуск.</u>

Схема прямого пуска приведена на рис.3.16.

Обмотка возбуждения ОВ предварительно подключается к питающему напряжению $U_Я$. По истечении некоторого времени, когда ток в ОВ установится, замыкают ключ *SA*. На якорь напрямую подается полное напряжение питания $U_Я$. Пусковой ток достигает максимального для ДПТ значения

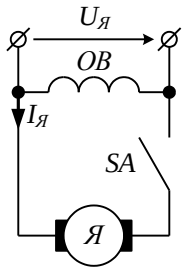


Рисунок 3.16 - Схема прямого пуска ДПТ

$$I_П = \frac{U_Я}{R_Я} = I_{Я.\max} \qquad (3.31)$$

Этот способ наиболее простой, но проходит при большом токе якоря. Прямой пуск применяется для маломощных ДПТ с мощностью до нескольких сотен ватт, у которых пусковой ток не превышает *15...20 А*. Такой ток ниже сварочного тока (от *40 А* и выше). Поэтому, коллектор хотя и разогреваются во время разгона ДПТ, но не оплавляется.

<u>Разгон с пусковым сопротивлением в цепи якоря.</u>

Схема пуска приведена на рис.3.17,а.

В цепь якоря последовательно с его обмоткой включены *3...5* ступеней пускового сопротивления $R_{Пx}$ с шунтирующими их контактами *Kx* контакторов (*x=1, 2, ...*). На МХ ДПТ назначаются два момента:

- момент $M_{П1}$ – максимальный момент в процессе разгона ДПТ, который принимают равным $c_Ф I_{Я.мах}$, где $I_{Я.мах}$ – максимально допустимый ток якоря ДПТ (каталожная величина);
- момент $M_{П2}$ – минимальный момент в процессе разгона ДПТ, который принимают равным $(1,1...1,3)I_{Я.ном}$, где $I_{Я.ном}$ – номинальный ток якоря ДПТ (каталожная величина).

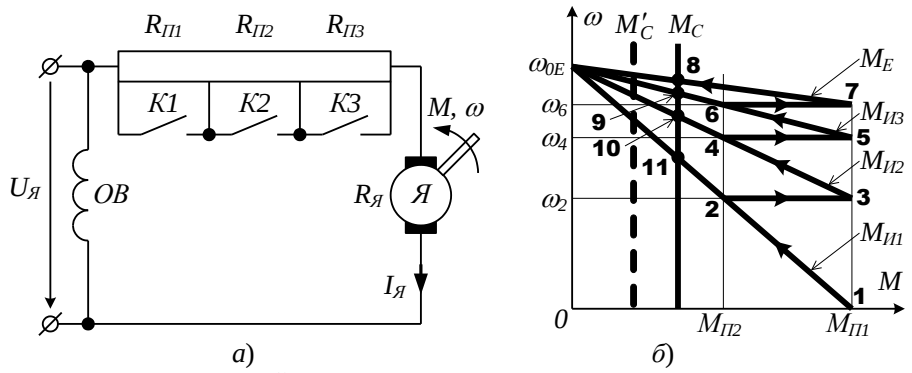


Рисунок 3.17 - Схема разгона ДПТ с использованием пусковых сопротивлений (*а*) и механические характеристики процесса разгона (*б*)

Процесс разгона заключается в последовательном выведении ступеней пусковых сопротивлений $R_{Пх}$ путем шунтирования их контактами *Кх*:

1). Разгон по первой искусственной механической характеристике $M_{И1}$ (рис.3.17,б), когда все контакты *К1, К2* и *К3* разомкнуты. МХ $M_{И1}$, описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_Я + R_{П1} + R_{П2} + R_{П3}}{c_Ф^2} M$$

Наклон МХ максимальный. Момент в точке *1* равен моменту $M_{П1}$. Так как Момент ДПТ превышает момент сопротивления нагрузки M_C, то двигатель разгоняется. По достижении точки *2*, в которой момент ДПТ равен моменту $M_{П2}$, замыкается контакт *К1*, шунтирующий сопротивление $R_{П1}$. Следует скачок на вторую искусственную МХ $M_{И2}$ при постоянной частоте вращения ω_2.

2). Разгон по второй искусственной механической характеристике $M_{И2}$ (рис.3.17,б), когда контакты *К2* и *К3* разомкнуты. МХ $M_{И2}$, описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_Я + R_{П2} + R_{П3}}{c_Ф^2} M$$

Далее разгон от точки *3* до точки *4*, шунтирование $R_{П2}$, скачок на третью искусственную характеристику при частоте вращения ω_4.

3). Разгон по третьей искусственной механической характеристике $M_{И3}$ (рис.3.17,б), когда только контакт *К3* разомкнут. МХ $M_{И3}$, описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_Я + R_{П3}}{c_Ф^2} M$$

Далее разгон от точки *5* до точки 6, шунтирование $R_{П3}$, скачок на естественную характеристику при частоте вращения ω_6.

4) Разгон по естественной механической характеристике M_E (рис.3.17,б), когда все контакты замкнуты. МХ M_E, описывается выражением

$$\omega = \omega_{0E} - \frac{R_Я}{c_Ф^2} M$$

Далее разгон от точки *7* до точки *8*, в которой наступает равенство вращающего момента M_E ДПТ моменту сопротивления M_C нагрузки.

Как следует из построений, в процессе разгона вращающий момент ДПТ не превышал $M_{П1}$ и, следовательно, ток якоря ДПТ был ограничен максимально допустимым $I_{Я.мах}$.

<u>Разгон с плавным повышением якорного напряжения.</u>

Схемы пуска приведены на рис.3.18.

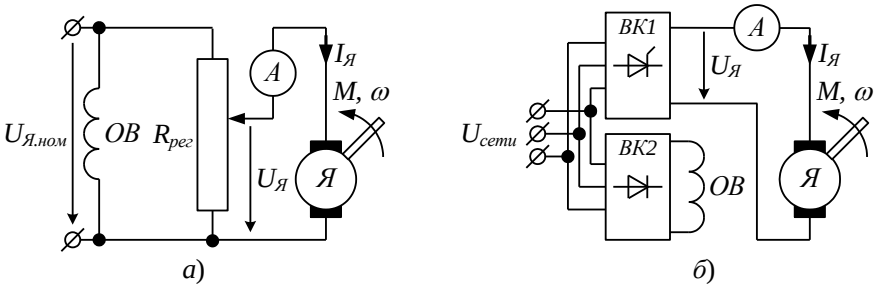


Рисунок 3.18 - Схема разгона ДПТ с использованием регулируемого напряжения якоря

Для маломощных (до *1 кВт*) ДПТ применяют реостатное регулирование напряжения $U_Я$ на якоре. С помощью регулировочного сопротивления $R_{рег}$ плавно повышают напряжение $U_Я$ с контролем тока якоря $I_Я$, чтобы он не превысил $I_{Я.max}$. Недостатками схемы являются ограниченность тока через реостат и большие потери мощности в нем.

Для любых по мощности ДПТ применяют тиристорное регулирование напряжения $U_Я$ с помощью вентильного комплекта *ВК1*. К нерегулируемому вентильному комплекту *ВК2* подключена обмотка возбуждения ДПТ.

Вопросы и задания

1. Какие существуют способы пуска ДПТ и каковы критерии качества процесса пуска?

2. Поясните способ прямого пуска ДПТ. В чем его недостатки?

3. Поясните способ реостатного пуска ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

4. Поясните способ пуска ДПТ с регулируемым якорным напряжением. В чем его достоинства и недостатки?

3.12 Способы регулирования частоты вращения ДПТ

Существуют три основных способа регулирования частоты вращения ДПТ:

1. Реостатное с регулируемым сопротивлением в цепи якоря.
2. Якорное с регулируемым напряжением на якоре.
3. Полевое с регулируемым напряжением на обмотке возбуждения.

Критериями выбора способа регулирования являются:

- диапазон регулирования частоты вращения $\omega_{max}/\omega_{min}$;
- непрерывность регулирования частоты вращения;
- наклон (жесткость) МХ;
- к.п.д. схемы регулирования и потери мощности.

<u>Реостатное регулирование.</u>

Схема реостатного регулирования в силовой части полностью совпадает с приведенной на рис.3.17 схемой разгона ДПТ с пусковым сопротивлением.

С помощью ступенчато изменяющегося сопротивления в цепи якоря создаются искусственные характеристик, например, как на рис.3.17,а, три МХ $M_{И1}$, $M_{И2}$ и $M_{И3}$. Существует также естественная МХ M_E. Для оценки регулирующего эффекта на плоскость МХ (рис.3.17,б) нужно нанести МХ нагрузки – график M_C. Частоты вращения в установившихся режимах определяется точками пересечения МХ нагрузки и ДПТ. Это точки *8, 9, 10* и *11*.

Достоинством реостатного регулирования является отсутствие дополнительных затрат на регулировочное оборудование, так как пусковые сопротивления можно также

использовать в качестве регулировочных.

Недостатки реостатного регулирования:

- малый диапазон регулирования частоты вращения – отношение максимальной частоты ω_8 к минимальной ω_{11} не превышает трех;
- ступенчатость регулирования, так как набор достижимых частот определяется количеством точек пресечения (*8, 9, 10* и *11*) МХ нагрузки и конечного числа МХ ДПТ;
- мягкость искусственных МХ, приводящая к тому, что при изменении момента сопротивления нагрузки (на рис.3.17,б пунктирная линия M'_C) изменяются положения точек пересечения МХ и, следовательно, частота вращения ДПТ;
- низким к.п.д., так как теряется большая мощность на нагрев регулировочных сопротивлений.

Якорное регулирование.

Схема якорного регулирования в силовой части полностью совпадает с приведенной на рис.3.18 схемой разгона ДПТ с использованием регулируемого напряжения якоря.

Механические характеристики ДПТ описываются выражением

$$\omega = \frac{U_Я}{c_Ф} - \frac{R_Я}{c_Ф^2} M = \omega_0 - \frac{R_Я}{c_Ф^2} M \qquad (3.32)$$

При якорном регулировании изменяется частота вращения холостого хода ω_0, которая прямо пропорциональна напряжению $U_Я$, а наклон МХ остается неизменным (рис.3.19,а). Для якорного регулирования частоты вращения ДПТ применяют либо изображенную на рис.3.18,б схему тиристорного регулирования напряжения, либо схему Г-Д (рис.3.19,б), в которой в качестве регулируемого источника напряжения выступает ГПТ.

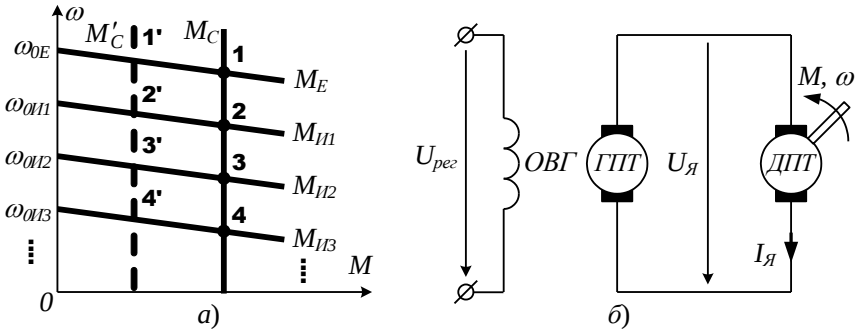


Рисунок 3.19 - Механические характеристики якорного регулирования частоты вращения ДПТ (*а*) и схема Г-Д (*б*)

Достоинства якорного регулирования:

- большой диапазон регулирования частот – до *100*;
- непрерывность регулирования, так как переход между МХ осуществляется плавным изменением напряжения $U_Я$;
- высокая жесткость МХ при любой частоте, совпадающая с жесткостью естественной МХ, что обеспечивает практическую независимость частоты вращения ДПТ от его нагрузки, например, частоты в ращения в точках *1* и *1'* практически одни и те же.

Недостатком якорного регулирования является необходимость применения регулируемого источника питания (тиристорного выпрямителя или ГПТ).

Полевое регулирование.

Схема полевого регулирования приведена на рис.3.20,а.

Механические характеристики ДПТ описываются выражением (3.32).

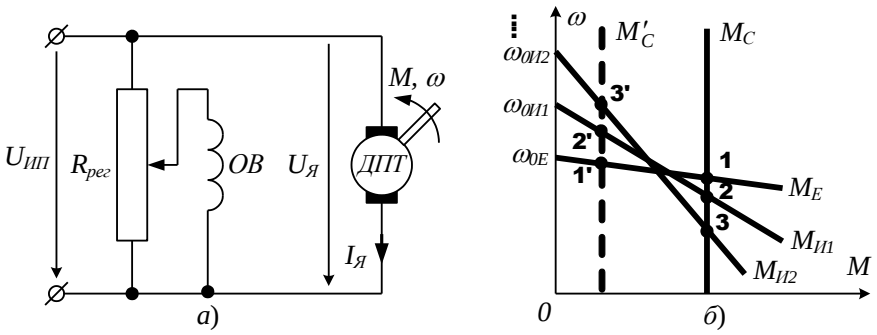


Рисунок 3.20 - Схема полевого регулирования частоты вращения (*а*) и механические характеристики (*б*)

При полевом регулировании реально возможно только понижение напряжения U_B на ОВ, что ведет к уменьшению $c_Ф$. Поэтому частота вращения холостого хода ω_0, которая обратно пропорциональна коэффициенту потока $c_Ф$, возрастает, а наклон МХ увеличивается, причем более интенсивно, так как в знаменателе второй дроби коэффициент $c_Ф$ во второй степени. Механические характеристики ДПТ, нагрузки и получаемые частоты вращения показаны на рис.3.20,б. Для малозагруженных ДПТ (пунктирная МХ нагрузки M'_C) или для ДПТ большой мощности частота вращения регулируется вверх от номинальной, а для маломощных или сильно загруженных ДПТ (сплошная МХ M_C) частота вращения понижается.

Достоинства полевого регулирования:

- возможность увеличения частоты вращения сверх номинальной;
- непрерывность регулирования, так как переход между МХ осуществляется плавным изменением напряжения U_B;
- высокий к.п.д., так как в якорной цепи есть только сопротивление только самой обмотки и никаких дополнительных сопротивлений.

Недостатки реостатного регулирования:

- малый диапазон регулирования частоты вращения вверх, ограниченный примерно полуторакратным значением;
- мягкость искусственных МХ, приводящая к тому, что при изменении момента сопротивления нагрузки M_C изменяются положения точек пересечения МХ и, следовательно, частота вращения ДПТ.

Вопросы и задания

1. Какие существуют способы частоты вращения ДПТ и каковы критерии качества процесса регулирования?

2. Поясните способ реостатного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

3. Поясните способ якорного регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

4. Поясните способ полевого регулирования частоты вращения ДПТ. В чем его достоинства и недостатки?

3.14 Генератор независимого возбуждения и его рабочие характеристики

Вводная часть.

Свойства генераторов постоянного тока обусловлены в основном способом питания обмотки возбуждения. В зависимости от этого различают следующие типы генерато-

ров:

1) с независимым возбуждением - обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока;

2) с параллельным возбуждением - обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно с нагрузкой;

3) с последовательным возбуждением - обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой;

4) со смешанным возбуждением - имеются две обмотки возбуждения: одна подключена параллельно нагрузке, а другая - последовательно с нею.

Генераторы рассматриваемых типов имеют одинаковое устройство и отличаются лишь выполнением обмотки возбуждения. Обмотки независимого и параллельного возбуждения, имеющие большое число витков, изготовляют из провода малого сечения; обмотку последовательного возбуждения, имеющую небольшое число витков, - из провода большого сечения. Генераторы малой мощности иногда выполняют с постоянными магнитами. Свойства таких генераторов близки к свойствам генераторов с независимым возбуждением.

Основными характеристиками, определяющими свойства генераторов постоянного тока, являются характеристики: холостого хода, внешняя, регулировочная и нагрузочная.

Основная часть.

В генераторе с независимым возбуждением ток возбуждения I_B создается сторонним источником напряжения U_B и не зависит от тока якоря $I_Я$. Ток якоря $I_Я$ равен току нагрузки I_H. Величина тока I_B определяется только положением регулировочного реостата R_{PB}, включенного в цепь обмотки возбуждения (рис.3.24). Обычно ток возбуждения невелик и составляет *1...3%* от номинального тока якоря.

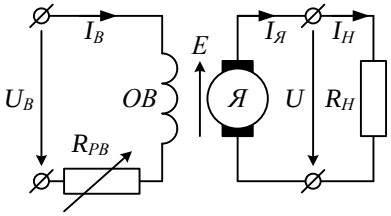


Рисунок 3.24 - Схема ГПТ с независимым возбуждением

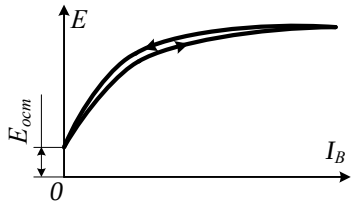


Рисунок 3.25 - Характеристика холостого хода генератора

Характеристикой холостого хода (рис.3.25) называют зависимость э.д.с. E от тока возбуждения I_B для ненагруженного ГПТ ($I_Я=0$) при постоянной частоте вращения $\omega=const$. При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение U на зажимах обмотки якоря равно ЭДС $E=c_Ф\omega$ и зависит только от величины магнитного потока $Ф_B$, т.е. от тока возбуждения I_B. Поэтому характеристика холостого хода $E=f(I_B)$ подобна магнитной характеристике $Ф_B=f(I_B)$. Расхождение ветвей $E=f(I_B)$ объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины. Обычно гистерезисом пренебрегают и используют среднюю линию между ветвями гистерезисной кривой. При $I_B=0$ в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма индуктируется остаточная э.д.с. $E_{ост}$, которая составляет *2...4%* от $E_{ном}$.

Внешней характеристикой (рис.3.26,а) называют зависимость $U=f(I_Я)$ напряжения U нагруженного генератора от тока нагрузки I_H, равного току якоря $I_Я$ при постоянной частоте вращения $\omega=const$ и постоянном токе возбуждения $I_B=const$. В режиме нагрузки напряжение генератора равно

$$U = E(\Phi_\Sigma) - R_Я I_Я = E(I_В, I_Я) - R_Я I_Я, \qquad (3.34)$$

где $E(\Phi_\Sigma)=E(I_В,I_Я)$ – э.д.с. ГПТ, зависящая от суммарного магнитного потока (рис.3.6), состоящего из основного потока $\Phi_{осн}$ ОВ и потока $\Phi_{РЯ}$ реакции якоря, причем каждый из названных потоков зависит, соответственно, от тока возбуждения $I_В$ и якоря $I_Я$.

С увеличением нагрузки напряжение U уменьшается по двум причинам:

1) из-за увеличения падения напряжения $\Delta U_1=R_Я I_Я$ на сопротивлении $R_Я$ обмотки якоря;

2) из-за уменьшения ЭДС E в результате размагничивающего действия реакции якоря, что показано как понижение напряжения U на ΔU_2.

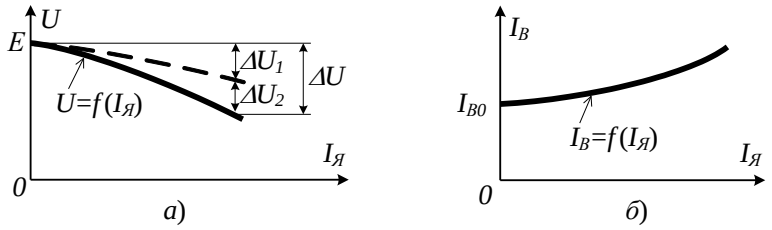


Рисунок 3.26 - Внешняя (*а*) и регулировочная (*б*) характеристики ГПТ

Изменение напряжения при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки для генераторов с независимым возбуждением составляет *5...15%*.

Регулировочной характеристикой (рис.3.26,б) называют зависимость между токами $I_Я$ и $I_В$, показывающая то, каким образом следует регулировать ток возбуждения $I_В$, чтобы поддерживать постоянным напряжение U генератора при изменении тока нагрузки $I_Я$. Очевидно, что в случае падающей внешней характеристики (рис.3.26,а) по мере роста нагрузки нужно увеличивать э.д.с. E, что, в свою очередь, в соответствии с пропорциональной зависимостью между э.д.с. и током возбуждения (рис.3.25), нужно увеличивать ток возбуждения $I_В$.

Вопросы и задания

1. Как классифицируется ГПТ в зависимости от способа возбуждения?

2. Пояснить внешний вид характеристики холостого хода.

3. Пояснить внешний вид внешней характеристики.

4. Пояснить внешний вид регулировочной характеристики.

3.15 Генератор параллельного возбуждения и его рабочие характеристики

В генераторе с параллельным возбуждением ток возбуждения $I_В$ создается э.д.с. E, индуктируемой в якоре генератора (рис.3.27,а). Обычно ток возбуждения $I_В$ невелик и составляет *1...3%* от номинального тока якоря. Поэтому, ток нагрузки $I_Н$ можно считать равным току якоря $I_Я$. В цепь обмотки возбуждения может быть включен регулировочный реостат возбуждения $R_{РВ}$, с помощью которого устанавливают величину э.д.с. E_0 холостого ГПТ.

Э.д.с. E_0 на выходе ГПТ образуется в процессе его самовозбуждения (рис.3.27,б) при отключенной электрической нагрузке – на холостом ходу. На рисунке показаны график *1* холостого хода ГПТ, который будет таким же, как и ГПТ с независимым возбуждением, и график *2*, связывающий между собой напряжение U и ток $I_В$ ОВ зависимостью

$$I_B = \frac{U}{R_{OB} + R_{PB}} = \frac{E_0}{R_{OB} + R_{PB}} \qquad (3.35)$$

В режиме холостого хода, при котором происходит самовозбуждение, напряжение U равно э.д.с. E_0 холостого хода ГПТ.

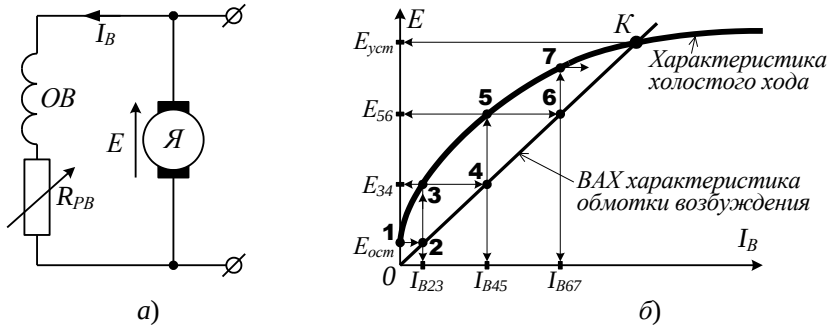


Рисунок 3.27 - Схема ГПТ с параллельным возбуждением (*а*) и процесс самовозбуждения (*б*)

Процесс самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением состоит из следующих стадий:

1). Точка *1* – начало процесса. На клеммах ГПТ индуктируется остаточная э.д.с. $E_{ост}$. Остаточная э.д.с., приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток I_{B23}, величиной

$$I_{B23} = \frac{E_{ост}}{R_{OB} + R_{PB}}.$$

3). Током I_{B23} в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с $\Phi_{ост}$, создаст э.д.с. E_{34}, определяемую точкой *2*.

4). Э.д.с. E_{34}, приложенная к обмотке возбуждения, создает в ней ток I_{B45}

$$I_{B45} = \frac{E_{34}}{R_{OB} + R_{PB}}$$

5). Током I_{B45} в обмотке возбуждения создается магнитное поле, которое будучи направленным согласно с $\Phi_{ост}$, создаст э.д.с. E_{34}, определяемую точкой *5*.

Описанные процессы будут повторяться до тех пор, пока будет достигнута точка *К* пересечения графиков холостого хода ГПТ и вольтамперной характеристики ОВ (3.35). На клеммах ГПТ установится э.д.с. $E_{уст}$ (далее – просто *E*).

Очевидно, что положение точки *К* зависит от наклона характеристик графика цепи ОВ. Чем больше сопротивление регулировочного реостата возбуждения R_{PB}, тем круче будет подъем графика цепи ОВ, тем ниже будет располагаться точка пересечения *К* и тем меньше будет значение э.д.с. *E*.

Учитывая изложенное, можно сформулировать три условия самовозбуждения ГПТ с параллельным возбуждением:

1) должна быть остаточная намагниченность $\Phi_{ост}$ стали магнитопровода;

2) должно быть согласное с $\Phi_{ост}$ включение ОВ по создаваемому ею магнитному потоку;

3) должно быть не слишком большим собственное сопротивление R_{OB} обмотки возбуждения, чтобы при самовозбуждении без сопротивления R_{PB} э.д.с. *E* было бы не меньше номинального $E_{ном}$.

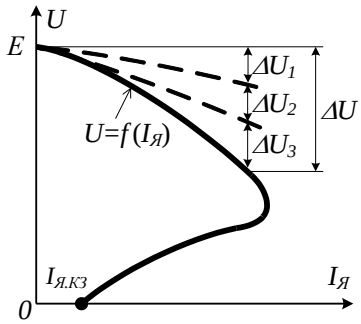


Рисунок 3.28 - Внешняя характеристика ГПТ

Внешняя характеристика ГПТ имеет вид, представленный на рис.3.28. На ней помимо составляющих ΔU_1 и ΔU_2 падения напряжения ΔU ГПТ, имеется третья составляющая ΔU_3, обусловленная тем, что из-за снижения напряжения *U* понижается

напряжение на обмотке возбуждения, снижается ток I_B возбуждения и снижается э.д.с. E.

Если замкнуть накоротко клеммы ГПТ с параллельным возбуждением, то исчезнет напряжение на ОВ, исчезнет ток возбуждения и магнитный поток возбуждения и останутся только остаточный поток $\Phi_{ост}$ и остаточная э.д.с. $E_{ост}$. Ввиду малости $E_{ост}$, которая составляет *2...4%* от $E_{ном}$, ток короткого замыкания $I_{Я.КЗ}$ будет не выше номинального тока ГПТ. Значит для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.

Вопросы и задания

1. Поясните процесс самовозбудения ГПТ с параллельным возбуждением.

2. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с параллельным возбуждением.

3. Почему для ГПТ с параллельным возбуждением не опасен режим короткого замыкания.

3.16 Генератор смешанного возбуждения и его рабочие характеристики

В генераторе со смешанным (*компаундным*) возбуждением поток создается двумя обмотками – шунтовой (ОВШ) и сериесной (ОВС) (рис.3.29,а). Применяется только параллельно-последовательное возбуждение с $\Phi_{ОВ}=\Phi_{Ш}\pm\Phi_{С}$ с преобладанием магнитного потока $\Phi_{Ш}$ шунтовой ОВ над магнитным потоком $\Phi_{С}$ сериесной ОВ.

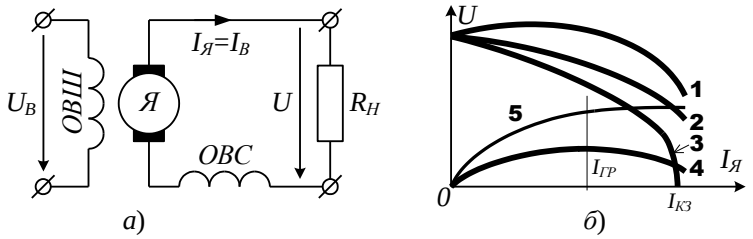


Рисунок 3.29 - Схема ГПТ со смешанным возбуждением (*а*) и внешние характеристики (*б*)

На рис.3.29,б приведена внешняя характеристика *2*, созданная только шунтовой обмоткой возбуждения. Эта характеристика взята с рис.3.26,а.

Для обоснования формы внешней характеристики *4*, созданной только сериесной обмоткой возбуждения, используем характеристику холостого хода *5*, которая имеет такой же вид, как у ГПТ с независимым возбуждением (рис.3.25). Ток нагрузки является током якоря $I_Я$ и одновременно током возбуждения I_B. При увеличении тока якоря $I_Я$ увеличивается э.д.с. E, так как с ростом тока увеличивается магнитные поток ОВС, но и одновременно растет падение напряжения ΔU на сопротивлении провода ОВС. На участке изменения тока якоря $I_Я$ от нулевого значения до некоторого граничного значения $I_{ГР}$, рост э.д.с. E превышает рост падения напряжения ΔU и, поэтому, график *4* возрастающий. После тока $I_{ГР}$ на характеристике *5* холостого хода начинается участок насыщения, в результате чего э.д.с. E практически перестаёт расти, а рост ΔU продолжается. Поэтому на графике *4* после тока $I_{ГР}$ имеется ниспадающий участок.

При согласном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки складываются ($\Phi_{ОВ}=\Phi_{Ш}+\Phi_{С}$) и, соответственно, внешние характеристики *2* и *4* складываются, образуя характеристику *1*. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что выходное напряжение U практически неизменно во всем диапазоне изменения тока нагрузки. Такие ГПТ применяются в автономных источниках электроэнергии, состоящими из одного-единственного генератора.

При встречном включении ОВШ и ОВС их магнитные потоки вычитаются ($\Phi_{ОВ}=\Phi_{Ш}-\Phi_{С}$) и, соответственно, также вычитаются внешние характеристики *2* и *4*, образуя характеристику *3*. Внешняя характеристика имеет ту особенность, что при коротком замыканий ГПТ ($U=0$) ток органичен некоторым допустимым значением $I_{КЗ}$. Такие ГПТ применяются в качестве сварочных, для которых режим короткого замыкания является нормальным, рабочим.

Вопросы и задания

1. Поясните вид внешней характеристики ГПТ с последовательным возбуждением.

2. В каких установках применяют компаундные ГПТ с разными схемами включения шунтовой и сериесной обмоток возбуждения?

3.17 Условия параллельной работы ГПТ. Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности

В сетях электроснабжения постоянного тока устанавливается не менее двух ГПТ, что дает следующие преимущества (в сравнении с использованием для электропитания только одного ГПТ):

1). Повышается надежность электроснабжения за счет резервирования при использовании более одного ГПТ.

2). Обеспечивается экономичная работа параллельно работающих ГПТ, в которой загрузка ГПТ может поддерживаться на уровне, обеспечивающем максимальный к.п.д. Так, если нагрузка двух параллельно работающих ГПТ составляет *0,35...0,4*, то при выводе из работы одного ГПТ, оставшийся в работе ГПТ загрузится до *0,7...0,8*, при которой к.п.д. генератора максимально.

3). Исключается перегрузка ГПТ. Так, если работающие ГПТ нагружены токами, превышающими номинальные, то можно ввести дополнительно в работу еще один ГПТ, который возьмет на себя часть тока нагрузки, разгрузив от токов другие ГПТ.

Различают параллельную работу ГПТ:

- на сеть бесконечной мощности;
- соизмеримой между собой мощности.

Для параллельной работы используют преимущественно ГПТ с независимым возбуждением.

Для ГПТ, вводимых в параллель, должны быть выполнены ряд условий. Для ГПТ, работающих в параллель, должны быть выполнены условия нагружения.

<u>Параллельная работа ГПТ на сеть бесконечной мощности.</u>

Схема параллельной работы ГПТ с сетью бесконечной мощности приведена на рис.3.30,а.

При введении ГПТ для работы параллельно с сетью с напряжением U_C должны быть выполнены следующие условия:

1. ГПТ должен быть разгруженным.

2. Полярность напряжения подключаемого генератора должна совпадать с полярность напряжения на шинах сети.

3. Э.д.с. *E* ГПТ должна быть равна напряжению U_C сети.

При соблюдении указанных условий ГПТ включается с помощью *SA* безударно, означающее следующее: ток якоря $I_Я$ ГПТ в момент включения нулевой. Внешняя характеристика *3* подключенного ГПТ совпадает при токе $I_Я=0$ с характеристикой *1* сете-

вого напряжения постоянного уровня (рис.3.30,б).

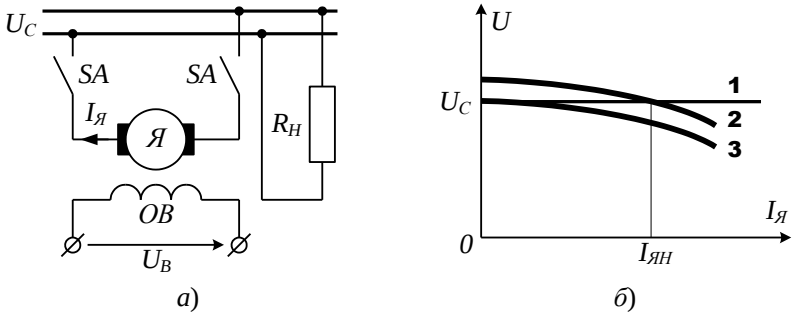


Рисунок 3.30 - Схема параллельной работы ГПТ на сеть бесконечной мощности (*а*) и внешние характеристики (*б*)

Далее нужно нагрузить введенный в работу ГПТ, соблюдая следующие условия нагружения:

1. Ток якоря $I_Я$ ГПТ не должен превышать максимально допустимого.

2. Нагрузочный ток $I_{ЯН}$ ГПТ должен быть таким, чтобы ток каждого генератора из группы всех параллельно работающих, был бы прямо пропорционален номинальной мощности генератора.

Для нагружения ГПТ нужно увеличить его напряжение возбуждения. Внешняя характеристика *3* такого ГПТ сместится параллельно вверх в положение *2* (рис.3.30,б). Точкой пересечения графиков *1* и *2* определится ток нагрузки $I_{ЯН}$ ГПТ.

<u>Параллельная работа ГПТ соизмеримой мощности.</u>

Схема параллельной работы ГПТ соизмеримой мощности приведена на рис.3.31,а. Пусть сначала на нагрузку работал только ГПТ1. Назовем его ведущим генератором и он изначально обеспечивал в сети уровень заданный напряжения $U_{зад}$, равный, например номинальному напряжению на нагрузке. Ток ведущего ГПТ1 составлял $I_{Я1Н}$ (рис.3.31,б), который определяется точкой пересечения графиков $U_{зад}$ и *1*. Далее на сеть подключается ГПТ2, который назовем ведомым. Условия включения ГПТ2 такие же, как и при включении его на сеть бесконечной мощности. Два условия нагружения ГПТ2, применяемые в сети бесконечной мощности, должны быть дополнены третьим – напряжение сети должно остаться неизменным, равным $U_{зад}$.

Пусть ГПТ2 введен в работу с внешней характеристикой *2*. Ток нагрузки $I_{Я2Н}$ ведомого генератора будет нулевым.

Для нагружения ГПТ2 нужно увеличить его ток возбуждения. Внешняя характеристика сместится параллельно в положение *2'*. ГПТ2 возьмет на себя ток $I'_{Я2Н}$, ток $I'_{Я1Н}$ ведущего ГПТ2 уменьшится, так как сумма токов обоих генераторов должна остаться постоянной и равной току I_H, потребляемому нагрузкой:

$$I_H = I'_{Я1Н} + I'_{Я2Н} = const \;\Rightarrow\; I'_{Я2Н} = I_H - I'_{Я1Н} \qquad (3.36)$$

До нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 имело вид

$$U_{зад} = E_1 - R_{Я1} I_{Я1Н} \qquad (3.37)$$

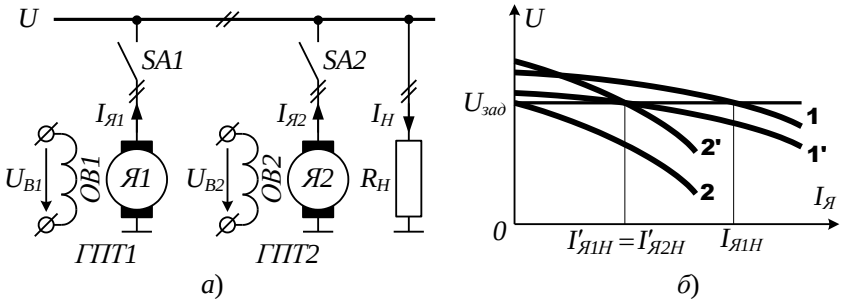


Рисунок 3.31 - Схема параллельной работы соизмеримых по мощности ГПТ (*а*) и внешние характеристики (*б*)

После нагружения ГПТ2 уравнение ГПТ1 примет вид

$$U'_{зад} = E_1 - R_{Я1} I'_{Я1H} \qquad (3.38)$$

Так как ток ГПТ понизился с $I_{Я1H}$ до $I'_{Я1H}$, то из сопоставления формул (3.37) и (3.38) при E_1=*const* следует, что напряжение сети U повысится с $U_{зад}$ до $U'_{зад}$.

Для понижения напряжения сети нужно уменьшить ток возбуждения ведущего ГПТ1. Это снизит его э.д.с. E_1 до такого значения E'_1, что напряжение сети останется равным $U_{зад}$:

$$U_{зад} = E'_1 - R_{Я1} I'_{Я1H}$$

Это приведет к параллельному смещению внешней характеристики ГП1 в положение *1'*.

Одновременными регулировками напряжений возбуждения обоих генераторов добиваются того, чтобы токи обоих генераторов, например, одинаковой мощности, были бы одинаковыми

$$I'_{Я1H} = I'_{Я2H}$$

Вопросы и задания

1. Назовите условия введения ГПТ для работы параллельно с сетью бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.

2. Назовите условия нагружения ГПТ, работающего на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности.

3. Как регулируется возбуждение параллельно работающих ГПТ, работающих на сеть бесконечной мощности и с генератором соизмеримой мощности?

3.19 Энергетическая диаграмма и коэффициент полезного действия МПТ

В электрических машинах при преобразовании энергии одного вида в другой часть энергии теряется в отдельных ее узлах, превращаясь в тепло.

В машинах постоянного тока различают следующие виды потерь:

1. Механические потери p_M: а) на трение в подшипниках; б) на трение щеток о коллектор; в) на трение якоря о воздух; г) вентиляционные. Обычно эти потери определя-

ются по эмпирическим формулам.

2. Потери в стали якоря (*магнитные*) p_C*:* а) потери на гистерезис, обусловленные перемагничиванием сердечника якоря и зубцов при вращении; б) потери на вихревые токи, обусловленные пересечением магнитным потоком отдельных точек массива якоря. Вихревые токи замыкаются в плоскостях продольного разреза якоря. Для уменьшения потерь на вихревые токи якорь собирают из штампованных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Потери в стали, учитывающие потери на гистерезис и вихревые токи, определяются по формуле:

$$p_c = k_0 p_{уд} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} B^{1,6} G,$$

где k_0 - опытный коэффициент, учитывающий влияние обработки и сборки листовой стали якоря;

$p_{уд}$ - удельные потери в стали, зависящие от сорта и толщины листов электротехнической стали;

f - частота перемагничивания сердечника якоря;

B - магнитная индукция в стали сердечника;

G - масса сердечника якоря.

Эта формула является универсальной. По ней определяются потери в стали и для машин переменного тока.

3. Электрические потери $p_Э$*:* а) в обмотке якоря; б) в обмотке возбуждения; в) в обмотке добавочных полюсов; г) в компенсационной обмотке; д) в контактном слое щеток. Потери а), б), в), г) определяются по формуле $p=I^2R$, где I и R — соответственно ток, проходящий по обмотке, и ее сопротивление.

Потери в контакте щеток $p_{Щ}=\Delta U_{Щ}I$, где $\Delta U_щ=0,2...3,5В$ — переходное падение напряжения на пару щеток, определяемое по сортаменту щеток. Согласно ГОСТ среднее значение $\Delta U_{Щ}=2$ *В*.

4. Добавочные потери $p_Д$*:* а) механические потери, обусловленные вибрацией вала, щеток и пр.; б) потери в стали, включающие потери в стали якоря в результате неравномерного распределения индукции в зубцах при нагрузке; потери в полюсных наконечниках, обусловленные пульсацией основного потока вследствие зубчатости якоря и др.; в) электрические потери, включающие потери в меди якоря вследствие вытеснения тока в пазу; потери в контакте щеток из-за неравномерного распределения плотности тока; потери в уравнительных соединениях якорной обмотки и др.

Так как добавочные потери трудно поддаются учету, ГОСТ для нормальных машин постоянного тока предусматривает $p_Д=0,01\cdot P_{ном}$, а для компенсированных машин постоянного тока $p_д=0,005\cdot P_{ном}$, где $P_{hом}=U_{ном}I_{ном}$ – номинальная электрическая мощность машины.

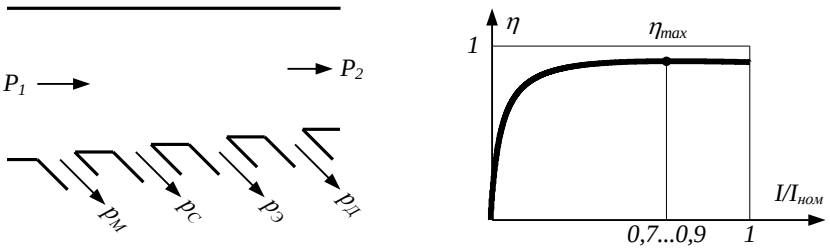
Полные потери машины постоянного тока

$$\Sigma p = p_M + p_C + p_Э + p_Д \qquad (3.43)$$

При подведении к машине мощности P_1 полезная мощность

$$P_2 = P_1 - \Sigma p \qquad (3.44)$$

Энергетическая диаграмма, построенная по выражениям (3.43) и (3.44), приведена на рис.3.33,а.



а) *б*)

Рисунок 3.33 - Энергетическая диаграмма машины постоянного тока (*а*) и зависимость к.п.д. от загрузки по току (*б*)

Коэффициентом полезного действия машины называется отношение полезной мощности к подведенной:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}$$

Машины постоянного тока имеют следующие значения к.п.д.:

Машины	η
- малые (*1...10 кВт*)	*0,75...0,85*
- средние (*10...100 кВт*)	*0,85...0,92*
- большие (*>100 кВт*)	*0,92...0,97*

К.п.д. машины зависит от нагрузки. Характеристика к.п.д. $\eta = f(I)$ при $U=const$ ($U_{НОМ}$) и $\omega=const$ ($\omega_{НОМ}$) представлена на рис.3.33,б.

Для определения условий максимума к.п.д. выразим его в виде уравнения $\eta = f(I)$ и первую производную приравняем нулю.

Для генератора постоянного тока полезная мощность $P_2=UI$.

Полные потери состоят из:

- потерь p_0, не зависящих от тока якоря, (механических, потерь в стали и цепи параллельного возбуждения);

- потерь, зависящих от тока якоря в первой степени, a_1I (потерь в контакте щеток);

- потерь, зависящих от квадрата тока якоря, a_2I^2 (потерь в обмотке якоря и во всех последовательных обмотках, добавочных потерь).

Итак, полные потери машины

$$\Sigma p = p_0 + a_1 I + a_2 I^2,$$

а к.п.д. генератора

$$\eta = 1 - \frac{p_0 + a_1 I + a_2 I^2}{UI + p_0 + a_1 I + a_2 I^2}.$$

Из уравнения $d\eta/dI=0$ после решения получаем $p_0= a_2 1^2$.

Максимальный к.п.д. будет при таком токе якоря, когда потери, зависящие от квадрата тока, равны потерям, не зависящим от тока. Обычно при расчете машины соотношение потерь устанавливают таким, чтобы максимальный к.п.д. достигался при загрузке в пределах $I=(0,7...0,9)I_{ном}$ (рис.3.33,б).

Вопросы и задания

1. Какие виды потерь существуют в машинах постоянного тока?

2. Составьте энергетическую диаграмму и формулу к.п.д.

3. При какой загрузке по току к.п.д. машины постоянного тока максимальный?

3.20 Универсальный коллекторный двигатель

В устройствах автоматики и различных электробытовых приборах широко применяют универсальные коллекторные двигатели мощностью от нескольких ватт до нескольких сотен ватт, которые могут работать от источников как постоянного тока, так и однофазного тока. Двигатель устроен принципиально так же, как и двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением, но с двумя существенными особенностями:

1) магнитная система выполнена полностью шихтованной, поскольку при работе на переменном токе и статор и ротор пронизываются переменным магнитным потоком;

2) катушки обмотки возбуждения имеют две секции и промежуточные выводы (рис.3.34) с тем, чтобы:

- действующее значение тока в обмотке не зависело от вида источника питания, для чего на постоянном токе используется полностью вся катушка, а на переменном питание подводится к отводам;

- номинальная частота вращения двигателя была одинаковой при работе на постоянном и на переменном токе.

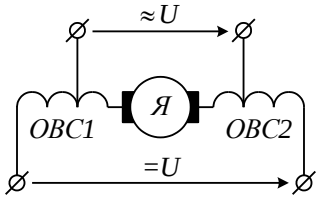


Рисунок 3.34 - Схема включения универсального коллекторного двигателя

В универсальных коллекторных двигателях обмотку возбуждения выполняют сериесной, разделяют на две части и включают с обеих сторон якоря. Такое включение (симметрирование обмотки) позволяет уменьшить радиопомехи, создаваемые двигателем.

При работе на постоянном токе универсальный коллекторный двигатель подобен двигателю постоянного тока с последовательным возбуждением. Работа же двигателя на переменном токе имеет ряд специфических особенностей.

Рассчитаем электромагнитный момент двигателя при питании его от переменного тока. В рассматриваемом режиме ток якоря и магнитный поток изменяются по синусоидальному закону:

$$i_Я = \sqrt{2} I_Я \sin\omega t, \qquad \Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \gamma), \tag{3.45}$$

где γ - угол, возникающий из-за потерь мощности в стали.

Мгновенное значение электромагнитного момента

$$\begin{aligned} m &= k_\Phi i_Я \Phi = \sqrt{2} k_\Phi I_Я \sin\omega t \cdot \Phi_m \sin(\omega t - \gamma) = \\ &= 0{,}5\sqrt{2} k_\Phi I_Я \Phi_m [\cos\gamma - \cos(2\omega t + \gamma)] \end{aligned} \tag{3.46}$$

Графики изменения тока $i_Я$ магнитного потока Φ и электромагнитного момента m показаны на рис.3.35.

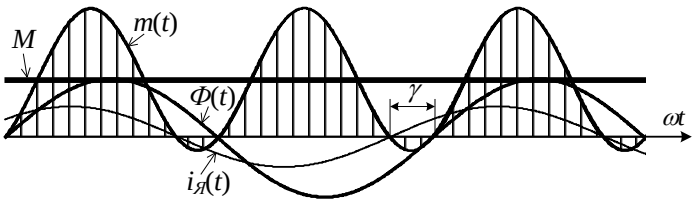


Рисунок 3.35 - Графики мгновенных значений тока $i_Я(t)$, магнитного потока $\Phi(t)$, момента $m(t)$ и среднего значения момента M

Электромагнитный момент двигателя является переменным, а в отдельные промежутки времени - даже тормозным. Однако якорь двигателя вращается с равномерной частотой, так как он имеет сравнительно большой момент инерции. Среднее значение момента

$$M = 0{,}5\sqrt{2} k_\Phi I_Я \Phi_m \cos\gamma = c_M \Phi_m I_Я, \tag{3.47}$$

где $c_M = 0{,}5\sqrt{2} k_\Phi \cos\gamma$ - коэффициент момента двигателя.

Уравнение цепи якоря двигателя на переменном токе

$$\dot{U} + \dot{E} = (R_Я + jx_Я)\dot{I}_Я \qquad (3.48)$$

Э.д.с. вращения, индуктируемая в якоре, равна

$$E = c_E \Phi_m \omega, \qquad (3.49)$$

где c_E - коэффициент э.д.с. двигателя.

Из (3.48) и (3.49) следует ЭМХ двигателя на переменном токе

$$\omega = \frac{E}{c_E \Phi_m} = \left| \frac{\dot{U} - (R_Я + jx_Я)\dot{I}_Я}{c_E \Phi_m} \right| \qquad (3.50)$$

После замены в (3.50) тока $I_Я$ на момент M согласно выражения (3.47) будет получена МХ двигателя на переменном токе. Построенные по рассчитанным таким образом ЭМХ и МХ коллекторного двигателя на переменном токе имеют такой же вид, как и у сериесного ДПТ на постоянном токе.

При переменном токе действующее значение тока якоря больше, чем при постоянном, из-за появления реактивной составляющей и увеличения активной составляющей вследствие возрастания потерь в стали. По этим же причинам коэффициент полезного действия двигателя при переменном токе меньше, чем при постоянном.

Коммутация при работе на переменном токе отличается коммутации на постоянном токе. Отличие состоит в том, что в коммутируемой секции дополнительно индуктируется еще *трансформаторная* э.д.с. $e_{тр}$, так как секция сцеплена с переменным магнитным потоком. Трансформаторная э.д.с. создает добавочный ток, замыкающийся через щетки. Это ухудшает коммутацию машины, вызывает опасное искрение и значительные радиопомехи. Особенно неблагоприятные условия возникают при пуске двигателя в том случае, когда трансформаторная э.д.с. достигает большой величины из-за увеличенных значений пускового тока и потока возбуждения. По этой причине коллекторные машины переменного тока средней и большой мощности не получили широкого применения. Срок службы щеток, коллектора и всей машины при работе на переменном токе сокращается по сравнению со сроком службы на постоянном токе.

Достоинством коллекторного двигателя переменного тока является возможность получения при питании от сети с частотой *50 Гц* частоты вращения двигателя свыше *3000 об/мин*, что нужно, например, в пылесосах, центрифугах.

Вопросы и задания

1. Поясните устройство и принцип действия универсального коллекторного двигателя.

2. Как рассчитать ЭМХ и МХ двигателя на переменном токе?

3. Какие недостатки и достоинства у коллекторного двигателя?

3.21 Тахогенератор постоянного тока

Тахогенераторами (ТГ) называются электрические машины, служащие датчиками частоты вращения. В качестве ТГ постоянного тока используются электрические машины постоянного тока малой мощности с возбуждение от постоянных магнитов или с электромагнитным возбуждением.

Выходной характеристикой ТГ постоянного тока называется зависимость напряжения U на якоре от частоты вращения ω и сопротивления нагрузки $R_Н$. Вращающийся ТГ вырабатывает э.д.с. E равную $c_Ф\omega$. Уравнения ТГ и его выходное напряжение имеют вид:

$$\begin{cases} c_Ф\omega = U + R_Я I \\ U = R_Н I \end{cases} \Rightarrow \quad U = \frac{c_Ф\omega}{1 + R_Я / R_Н} \qquad (3.51)$$

На рис.3.36,а сплошными линиями показаны выходные характеристики $U=f(\omega)$ для различных сопротивлений нагрузки при идеализированных условиях ($c_Ф=const$, $R_Я=const$). Эти характеристики являются линейными, а их угол наклона к оси абсцисс уменьшается при снижении сопротивления нагрузки. Следовательно, ТГ можно применять только при неизменной нагрузке. Крутизна выходной характеристики, определяющая чувствительность ТГ, достаточно высока и составляет в среднем *0,05 В / об/мин*.

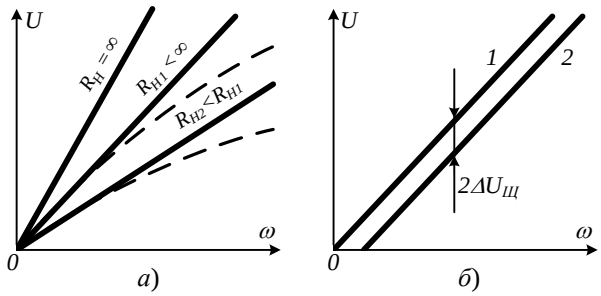


Рисунок 3.36 - Выходные характеристики тахогенератора (*а*) и влияние на характеристики реакции якоря (*а*) и падения напряжения на щетках (*б*)

Погрешности выходной характеристики. Практически выходная характеристика отклоняется от линейного закона в результате размагничивающего действия реакции якоря, наличия нелинейного сопротивления в переходном контакте между коллектором и щетками и изменения тока возбуждения из-за увеличения сопротивления обмотки возбуждения при ее нагреве.

Размагничивающее действие реакции якоря проявляется при возрастании частоты вращения ω, так как при этом повышается напряжение U, увеличивается ток I тахогенератора, и, следовательно, магнитного потока якоря. Поэтому при повышенных частотах вращения выходное напряжение U возрастает медленнее, чем увеличивается частота вращения (штриховые линии на рис. 3.36,а). Чтобы уменьшить влияние реакции якоря, сопротивление R_H нагрузки должно быть максимально большим и работать при небольших частотах вращения.

Нелинейный характер сопротивления щеточного контакта также создает определенную погрешность по сравнению с идеализированной характеристикой (рис.3.36,б). Учитывая, что падение напряжения под парой щеток $2\Delta U_Щ$ можно приблизительно считать постоянным, не зависящим от тока нагрузки, уравнение (3.51) можно записать в виде

$$U = \frac{c_Ф\omega}{1 + R_Я / R_Н} - \frac{2\Delta U_Щ}{1 + R_Я / R_Н}$$

Для уменьшения погрешности, создаваемой $2\Delta U_Щ$, в ТГ применяют только металлографитовые щетки.

Нагревание ТГ в условиях эксплуатации приводит к увеличению сопротивления обмотки возбуждения и, как следствие, к уменьшению тока возбуждения, магнитного потока, э.д.с. и выходного напряжения U. Чтобы с изменением температуры ТГ ток возбуждения не изменялся, в цепи питания обмотки возбуждения устанавливают термистор с отрицательным ТКС (температурным коэффициентом сопротивления). Кроме того, чтобы уменьшить влияние температуры на магнитный поток ТГ, его магнитопровод вводят в режим сильного насыщения. Тогда при значительном изменении тока в

обмотке возбуждения магнитный поток практически не изменяется.

В машине с сильно насыщенной магнитной системой уменьшается также размагничивающее влияние реакции якоря. Однако рост насыщения магнитной системы ТГ приводит к увеличению размеров и массы обмотки возбуждения. Кроме того, у насыщенного ТГ отсутствует прямая пропорциональность между выходным напряжением U и напряжением возбуждения U_B, что необходимо в некоторых системах автоматики.

Достоинства ТГ постоянного тока перед другими известными типами (главным образом – перед ТГ переменного тока):

1. Малые габариты и масса при большой выходной мощности.
2. Отсутствие фазовой погрешности, что обусловлено работой ТГ на активную нагрузку.
3. В ТГ с возбуждением от постоянных магнитов не нужен вспомогательный источник питания.

Недостатки ТГ постоянного тока:

1. Сложная конструкция и высокая стоимость.
2. Нестабильность выходной характеристики из-за наличия скользящего контакта.
3. Пульсации выходного напряжения и радиопомехи, вызванные коммутациями тока в щеточно-коллекторном узле.

Вопросы и задания

1. Поясните устройство и принцип действия ТГ постоянного тока.

2. Как существую погрешности выходной характеристики и каковы меры по уменьшению этих погрешностей?

3. Какие достоинства и недостатки у ТГ постоянного тока?