

Содержание

1 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	3
Основные понятия	3
1.1 Назначение, устройство и принцип действия	4
1.1.1 Назначение МПТ	4
1.1.2 Устройство машины постоянного тока	5
1.1.3 Классификация МПТ	7
1.1.4. Принцип действия машины постоянного тока	7
Тестовые задания	9
1.2 Обмотки якоря МПТ	9
1.2.1 Основные понятия	9
1.2.2 Типы обмоток якоря	11
1.2.3 Условия симметрии обмоток якоря	15
1.2.4 Электромагнитный момент и электродвижущая сила МПТ	15
Тестовые задания	17
Практическая работа 1	17
Практическая работа 2	17
1.3 Магнитная цепь и реакция якоря	17
1.3.1 Магнитная цепь МПТ	17
1.3.2 Реакция якоря МПТ	19
1.3.3 Способы устранения вредного влияния реакции якоря	20
1.4 Коммутация в машинах постоянного тока	21
1.4.1 Причины, вызывающие искрение на коллекторе	21
1.4.2 Коммутация. Виды коммутации	22
1.4.3 Способы улучшения коммутации	26
Тестовые задания	27
1.5 КПД и потери МПТ	27
1.5.1 Потери МПТ	27
1.5.2 Энергетическая диаграмма МПТ	28
1.5.3 Коэффициент полезного действия	29
1.6 Генераторы постоянного тока	29
1.6.1 Общие сведения	29
1.6.2 Основные характеристики генераторов постоянного тока	31
Тестовые задания	34

1.7 Двигатели постоянного тока	34
1.7.1 Общие сведения	34
1.7.2 Механическая характеристика	35
1.7.3 Рабочие характеристики	38
Тестовые задания	40
Практическая работа 3	40
Практическая работа 4	40
2 ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА	41
Основные понятия	41
2.1 Общие сведения	42
2.2 Статические характеристики и энергетические режимы работы ЭП с ДПТ	42
2.2.1 Электропривод с ДПТ независимого (параллельного возбуждения)	42
2.2.2 Электропривод с ДПТ последовательного возбуждения	46
Тестовые задания	46
2.3 Способы регулирования скорости в ЭП с ДПТ	46
2.3.1 Регулирование изменением сопротивления в цепи обмотки якоря	48
Практическая работа 6	51
2.3.2 Регулирование скорости изменением величины питающего напряжения	51
2.3.3 Регулирование скорости изменением величины магнитного потока	57
2.3.4 Регулирование скорости шунтированием обмотки якоря	61
Тестовые задания	64
Описание схем	64
2.4 Способы реализации основных видов торможения	64
2.4.1 Механическое торможение	64
2.4.2 Электрическое торможение	65
Практическая работа 5	73
Описание схем	73

1 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные понятия

Внешняя характеристика

Генератор с электромагнитным возбуждением

Генератор магнитоэлектрическим возбуждением

Генератор параллельного возбуждения

Генератор последовательного возбуждения

Генератор смешанного возбуждения

Генераторный режим

Двигательный режим

Добавочные потери

Дополнительные узлы МПТ

Зависимость $M_2 = f(P_2)$

Зависимость $M = f(P_2)$

Зависимость $I = f(P_2)$

Зависимость $M = f(I)$

Изменение частоты вращения

Изменение частоты вращения, вызванное изменением нагрузки

Коллектор

Конструктивный коэффициент машины

Концы обмотки

Компенсационная обмотка

Коммутационные причины

Коммутация, период коммутации

Коммутирующая секция

Коэффициент полезного действия двигателя

Коэффициент полезного действия генератора

Криволинейная коммутация

Кулок

Лобовая часть

Логические цепочки принципа действия МПТ

Магнитные потери

Механическая характеристика ДПТНВ

Механическая характеристика ДПТПВ

Механическая характеристика ДПТСВ

Механические причины

Механические потери

Мощность на входе генератора

Мощность на входе двигателя

Падение напряжения

Пазовая сторона

Переменные потери

Плотность тока

Полюсные катушки

Постоянная ЭДС

Постоянная электромагнитного момента

Поперечная реакция якоря

Постоянные потери

Потенциальные причины

Потери в обмотке якоря

Потери на возбуждения

Преимущества МПТ

Продольная реакция якоря

Простая петлевая обмотка

Простая волновая обмоткой

Прямолинейная коммутация

Работа МПТ при отсутствии тока возбуждения

Работа МПТ в режиме холостого хода

Распределенная обмотка

Реакция якоря МПТ

Регулировочная характеристика

Секция

Сердечник с якорной обмоткой

Симметричная обмотка якоря

Скоростная характеристика ДПТНВ

Скоростная характеристика ДПТПВ

Скорость холостого хода

Сложная волновая обмотка

Сложная петлевая обмотка

Сосредоточенная обмотка

Способы улучшения коммутации

Способы устранения реакции якоря

Степени искрения

Угловая скорость

Уравнения напряжения в генераторном режиме

Уравнения напряжения в двигательном режиме

Мощность на выходе генератора	Условия симметрии
Мощность на выходе двигателя	Характеристика холостого хода
МПТ с магнитоэлектрическим возбуждением	Шаги обмотки
МПТ с электромагнитным возбуждением	Щётки
Нагрузочная характеристика	Щёточно-коллекторный узел
Недостатки МПТ	Электродвижущая сила (ЭДС)
Обойма	Электромагнитный момент
Обмотка	Электромагнитная мощность
Обмоткой якоря МПТ	Электромагнитная мощность
Окружная скорость	Электрические потери
Основные величины генератора	Энергетическая диаграмма
Основные участки магнитной цепи	Этапы коммутации
Основная характеристика холостого хода.	Якорь

1.1 Назначение, устройство и принцип действия

1.1.1 Назначение МПТ

Двигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением был создан в России академиком Б.С. Якоби в 1834 году, который назвал его магнитной машиной. В 1838 году им был построен более мощный электродвигатель, который использовался для привода гребного винта речного катера.

Значительное развитие теория машин постоянного тока получила в трудах Д.А. Лачинова. В 1880 году он опубликовал труд «Электромеханическая работа», в которой рассмотрел вопросы создания вращающего момента, КПД, условия питания двигателя от генератора и дал классификацию машин постоянного тока по способу возбуждения.

Машины постоянного тока (*МПТ*) применяют в качестве двигателей и генераторов.

Электродвигатели имеют:

- хорошие регулировочные свойства;
- значительную перегрузочную способность;
- возможность получения жестких и мягких механических характеристик.

Двигатели постоянного тока (*ДПТ*) используются для привода различных механизмов, на транспорте, в грузоподъемных и землеройных устройствах, на морских и речных судах, в автоматизированных электроприводах. Двигатели малой мощности применяют во многих системах автоматики.

Генераторы постоянного тока (*ГПТ*) применяются для питания двигателей постоянного тока в стационарных и передвижных установках и как источники электрической энергии для заряда аккумуляторных батарей.

Преимущества:

1. Хорошие пусковые и регулировочные свойства;
2. Возможность получения частоты вращения более 3000 об/мин;
3. Возможность получения жестких и мягких механических характеристик.

Недостатки:

1. Относительно высокая стоимость;
2. Сложность в изготовлении и пониженная надежность;
3. Низкий КПД.

Все достоинства и недостатки МПТ связаны с её конструктивными особенностями.

1.1.2 Устройство машины постоянного тока

Машины постоянного тока, предназначенные для работы в различных электроустановках, могут иметь разные конструктивные особенности, но основные узлы у всех машин одинаковы.

Основные узлы МПТ приведены на рисунке 1.1.

Любая электрическая машина состоит из неподвижной и подвижной части.

Неподвижная часть МПТ называется индуктором, вращающаяся часть – якорем.

Индуктор состоит из:

- **8 станины**, которая служит для крепления полюсов и подшипниковых щитов и является частью магнитопровода. Станину изготавливают из стали, обладающей достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы **11** для крепления машины к фундаменту;

- **6 главных полюсов** (рис.1.2), которые предназначены для создания магнитного поля возбуждения.

Главный полюс состоит из:

- **2 сердечника**. Его делают шихтованным из листовой электротехнической стали. Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре;

- **3 полюсной катушки**, которую изготавливают из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения.

Полюса крепятся к станине болтами. Резьбу для болтов нарезают в шихтованном сердечнике.

Для регулирования величины магнитного поля машины на полюса укладывают обмотку, которая называется *обмоткой возбуждения*, и подключают её к источнику постоянного тока.

Якорь МПТ (рисунок 1.1) состоит из:

- **1 вала**, на который крепится сердечник якоря и коллектор;

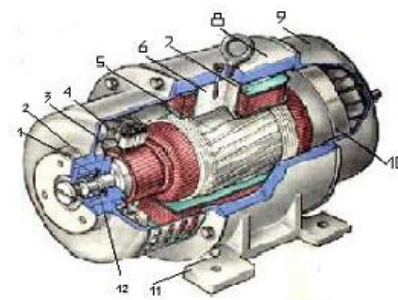


Рис.1.1. – Конструкция

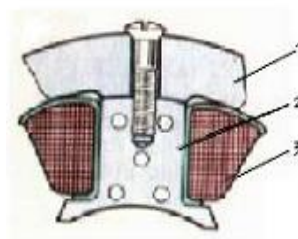


Рис. 1.2 – Главный полюс МПТ

- **5 сердечника с обмоткой**. Сердечник якоря (рис.1.3) имеет шихтованную конструкцию, набирается из штампованных пластин. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывается обмотка якоря.

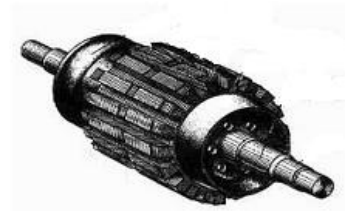


Рис.1. 3 – Сердечник якоря МПТ

Обмотка якоря изготавливается из провода круглого или прямоугольного сечения. Обычно

состоит из отдельных якорных катушек, которые изолированы друг от друга;

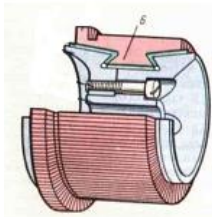


Рис.1.4 – Коллектор МПТ

- **3 коллектора**. Коллектор (рисунок 1.4) является одним из сложных узлов.

Основным элементом коллектора являются медные пластины трапецеидального сечения **6**. Между пластинами находится изоляционные прокладки. К коллекторным пластинам крепятся концы обмотки якоря.

Электрический контакт с коллектором осуществляется посредством щеток, располагаемых в **щеткодержателях 4** (рисунок 1.1).

Щеткодержатель (рисунок 1.5) состоит из:

- **4 обоймы**, в которую помещают щетку **3**;
- **1 курка** представляющего откидную деталь, передающую давление пружины **2** на щетку.

Щетка снабжается гибким тросиком **6**, который служит для включения ее в электрическую цепь машины.

Щеткодержатели одной полярности соединены между собой сборными шинами, подключенными к выводам машины.

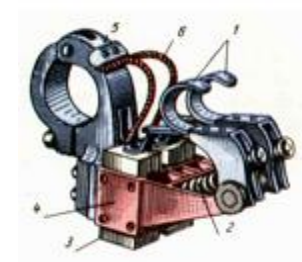


Рис.1.5 – Щеткодержатель МПТ

Количество щеткодержателей равно количеству главных полюсов машины.

Щетки являются неподвижной частью машины. Они крепятся к станине машины. Под щетками скользят коллекторные пластины и служат для подвода или отвода электрического тока.

Щеточно-коллекторный узел является главным узлом МПТ и служит для механического преобразования постоянного тока внешней цепи в переменный в ток обмотки якоря в двигательном режиме, и, наоборот, в генераторном режиме.

Дополнительные узлы:

- два подшипниковых щита: передний **2** (со стороны коллектора) и задний **9** (рисунок 1.1).

- смотровое окно, располагается на переднем подшипниковом щите и служит для визуального осмотра коллектор и щёток, не разбирая машины;

- вентилятор **10** служит для самовентиляции машины. Воздух попадает в машину со стороны коллектора, омывает, нагретые части и выбрасывается с противоположной стороны.

1.1.3 Классификация МПТ

Магнитное поле в МПТ обычно создается обмоткой возбуждения (**ОВ**), питаемой постоянным током. Свойства МПТ определяются способом включения **ОВ**.

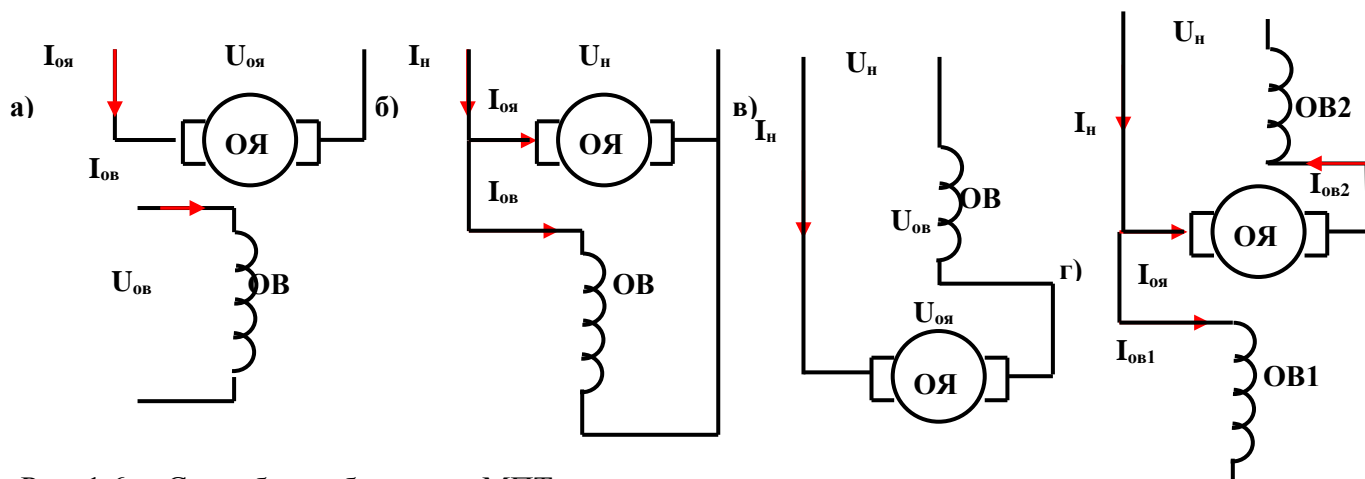


Рис. 1.6. – Способы возбуждения МПТ

МПТ классифицируются по способу включения обмотки возбуждения или способу возбуждения:

Машины с электромагнитным возбуждением, когда магнитное поле машины создается электрическим током:

- МПТ с независимым возбуждением (**МПТ НВ**), **ОВ** питается постоянным током от источника, электрически не связанного с обмоткой якоря (**ОЯ**) (рисунок 1.6,а);

- МПТ с параллельным возбуждением (**МПТ ПВ**), **ОЯ** и **ОВ** соединены параллельно и питаются от одного источника (рисунок 1.6,б);

- МПТ с последовательным возбуждением (**МПТ Посл.В**), **ОЯ** и **ОВ** соединены последовательно и питаются от одного источника (рисунок 1.6, в);

- МПТ со смешанным возбуждением (**МПТ СВ**), имеются две обмотки возбуждения последовательная и параллельная (рисунок 1.6,г);

Машины с магнитоэлектрическим возбуждением, когда магнитное поле машины создаётся магнитными полюсами.

1.1.4. Принцип действия машины постоянного тока

Принцип действия любой электрической машины основан на законе электромагнитной индукции. Между якорем и статором МПТ существует воздушный зазор. Поэтому ни электрической, ни механической связи между обмотками нет. Взаимодействие осуществляется под действие магнитных полей.

Любая электрическая машина обладает свойством обратимости, т.е. может работать в двух основных режимах: генераторном и двигательном.

Генераторный режим.

В этом режиме механическая энергия приводного механизма преобразуется в электрическую энергию на зажимах машины.

Вал машины с помощью приводного механизма под действием момента (M_I) приводят во вращения с частотой (n), одновременно обмотка возбуждения подключается к источнику постоянного тока.

Под действием тока ($I_{ов}$), протекающего по обмотке, в ней создаётся магнитное поле. Это поле характеризуется основным магнитным потоком ($\Phi_{ов}$).

Якорь машины начинает вращаться в магнитном поле и согласно, закона электромагнитной индукции в витках обмотки якоря наводится ЭДС ($E_{я}$). Направление ЭДС определяется по правилу «правой руки».

Если обмотку якоря при помощи щеток замкнуть на нагрузку, то по обмотке якоря потечет ток ($I_{оя}$) направление, которого будет совпадать с направлением ЭДС.

Под действием тока якоря в обмотке будет наводиться свое магнитное поле ($\Phi_{оя}$). В результате взаимодействия двух магнитных полей на проводники обмотки якоря начнет действовать электромагнитная сила ($F_{эм}$). Направление этой силы определяется по правилу «левой руки».

Совокупность всех сил, действующих на проводники, создаст на якоре электромагнитный момент ($M_{эм}$), который стремится повернуть якорь в сторону противоположную направлению вращения приводного механизма.

Логическая цепочка принципа действия в генераторном режиме приведена на рисунке 1.7,а.

Электромагнитный момент, возникающий в обмотке якоря в генераторном режиме, называется *тормозным*, так как направлен против вращения якоря.

ЭДС якоря в генераторном режиме называется *ЭДС- вращения*.

На зажимах генератора будет сниматься напряжение ($U_{я}$). Величина напряжения будет меньше величины ЭДС обмотки якоря на величину падения напряжения в обмотке якоря. Уравнения напряжения будет иметь вид:

$$U_{я} = E_{я} - I_{я}R_{я} \quad (1.1)$$

Двигательный режим.

В двигательном режиме электрическая энергия, поступающая на зажимы машины, преобразуется в механическую энергию на его валу.

На зажимы машины ($U_{я}$) и на зажимы обмотки возбуждения ($U_{в}$) одновременно подается напряжение от источника постоянного тока. По обмотке якоря ($I_{оя}$) и обмотки возбуждения ($I_{ов}$) потечет ток, который в каждой из обмоток создаст свое магнитное поле.

Взаимодействие двух магнитных полей, обмотки якоря ($\Phi_{оя}$) и обмотки возбуждения ($\Phi_{ов}$) создаст на якоре электромагнитную силу ($F_{эм}$).

Совокупность всех сил, действующих на витки обмотки якоря, создадут в электромагнитный момент ($M_{эм}$), под действием которого якорь придет во вращение. Направление электромагнитного момента, будет совпадать с направлением вращения.

Якорь машины вращается в магнитном поле, в обмотке якоря будет наводиться ЭДС ($E_{я}$), направление, которой будет противоположно направлению тока.

Логическая цепочка принципа действия в двигательном режиме представлена на рисунке 1.7,б.

В двигательном режиме электромагнитный момент называется *вращающим*, а ЭДС, возникающая в обмотке якоря, называется *противо-ЭДС*.

Величина ЭДС якоря будет меньше напряжения на зажимах машины на величину падения напряжения в обмотке якоря. Уравнения напряжения будет иметь вид:

$$U_{я} = E_{я} + I_{я} R_{я} \quad (1.2)$$

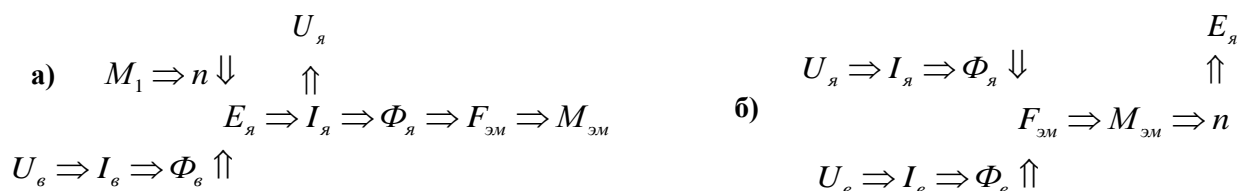


Рис. 1.7 – Логические цепочки принципа действия МПТ

Тестовые задания

1.2 Обмотки якоря МПТ

1.2.1 Основные понятия

Обмотка - это контур, по которому протекает ток, создающий магнитное поле машины.



Обмотка электрической машины - это одна из главных частей машины, от которой зависят основные электрические и массогабаритные характеристики.

При выполнении обмоток необходимо обеспечить:

- механическую прочность и достаточную нагревостойкость;
- удобство ремонта;
- минимальную массу;
- надежно работать при наилучших энергетических показателях.

Сосредоточенная обмотка – это обмотка все витки, которой имеют одинаковое потокоцепление с полем взаимной индукции.

Распределенная обмотка - это обмотка, у которой в каждый момент времени из-за различного положения витков в магнитном поле потокоцепление различно.

Обмоткой якоря МПТ - называют замкнутую систему проводников, определенным образом уложенных на сердечнике якоря и присоединенных к коллектору.

Элементом обмотки якоря является **секция**, которая состоит из одного или некоторого количества последовательно соединенных витков и присоединенная своими концами к коллекторным пластинам (рисунок 1.8).

Элемент секции, расположенный в пазу, называется **пазовой стороной (1)**.

Элемент секции, расположенный вне паза и служащий для соединения пазовых сторон называется **лобовой частью (2)**.

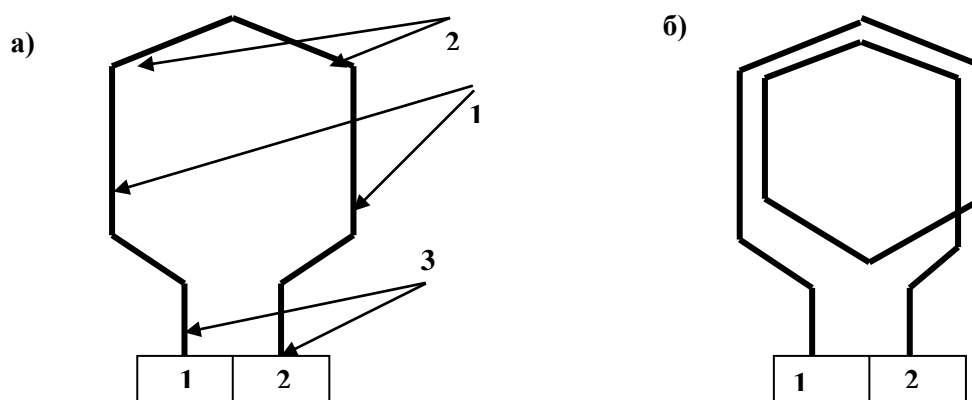


Рис. 1.8 – Одновитковая (а) и двухвитковая (б) секция

Элементы секции, служащие для присоединения обмотки к коллектору называются **концами обмотки (3)**.

Для удобного расположения выходящих из пазов лобовых частей обмотки якоря выполняются двухслойными.

При этом в каждом пазу секции располагаются в два слоя: одна сторона секции – в верхнем слое одного паза, а другая – в нижнем слое другого.

Расстояние между пазовыми частями секции должно быть равно полюсному делению:

$$\tau = \pi D_{\text{я}} / 2p, \quad (1.3)$$

где τ - полюсное деление, мм;

$2p$ – число полюсов;

$D_{\text{я}}$ – диаметр якоря, мм.

Параметры обмотки якоря:

S - число секций;

Z - число пазов;

$S_n = S/Z$ - число секций, приходящихся на один паз;

w_c - число витков в секции;

N - число пазовых сторон в обмотке;

$N_n = N/Z = 2w_c S_n$ - число пазовых сторон в одном пазу;

K – число коллекторных пластин.

Шаги обмотки:

y_1 – расстояние между началом и концом секции;

$$y_1 = Z_n / 2p \pm \varepsilon, \quad (1.4)$$

где ε – некоторая величина, вычитая или суммируя, которую получают целое число.

y - результирующий шаг, расстояние между двумя последовательно соединенными секциями;

y_2 – расстояние между концом первой и началом соседней секции;

y_k – расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец одной секции.

Секции обмотки якоря соединяются друг с другом в последовательную цепь, т.е. начало последующей секции присоединяется к концу предыдущей и к общей коллекторной пластине.

Следовательно, для обмотки якоря справедливо равенство:

$$Z_n = S = K. \quad (1.5)$$

В современных якорных обмотках соединенных последовательно друг с другом секции образуют замкнутую на себя цепь.

Эта цепь может состоять из 2-х или нескольких параллельных ветвей. Каждая цепь имеет последовательно соединенные витки и проводники.

Последовательно соединенные витки определяют напряжение машины, а параллельные – ток машины.

1.2.2 Типы обмоток якоря

Простая петлевая обмотка

Простой петлевой обмоткой (ПП) называется обмотка якоря каждая секция, которой присоединена к двум рядом лежащим коллекторным пластинам (рисунок 1.9).

При укладке секций на сердечнике якоря начало каждой последующей секции соединяется с концом предыдущий.

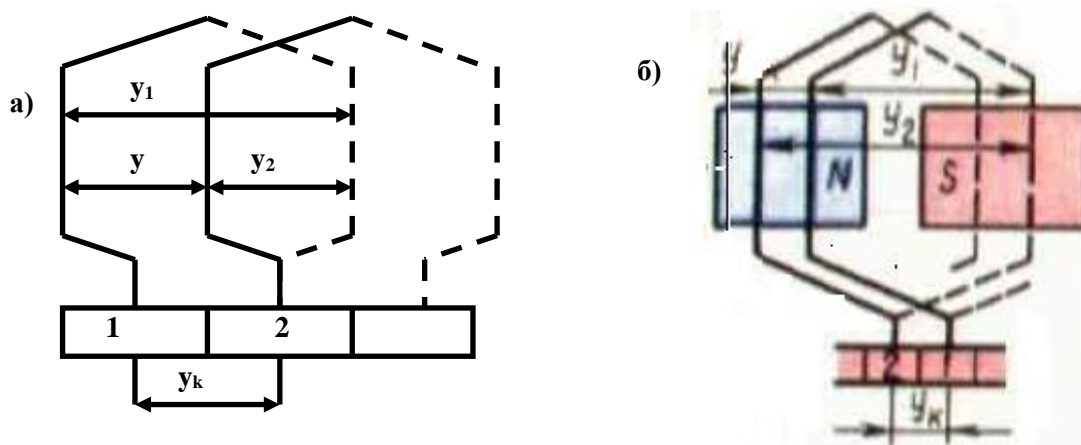


Рис.1.9 – Простая петлевая обмотка а) правоходовая б) левоходовая

За один обход по якорю укладывают все секции обмотки. В результате конец последней секции оказывается присоединенным к началу первой секции, обмотка якоря замыкается.

Если укладка секций ведется слева направо, то обмотка называется *правоходовой*.

Если укладка секций ведется справа налево, то обмотка называется *левоходовой*.

Для ПП обмотки характерны следующие параметры:

Второй частичный шаг по якорю

$$y_2 = y_1 \pm y, \quad (1.6)$$

«+» – правоходовая обмотка;

«-» – левоходовая обмотка.

Шаг обмотки по коллектору в простой петлевой обмотке определяется по формуле:

$$y_k = y = \pm 1, \quad (1.7)$$

В простой петлевой обмотке число параллельных ветвей равно числу главных полюсов машины:

$$2a = 2p \quad (1.8)$$

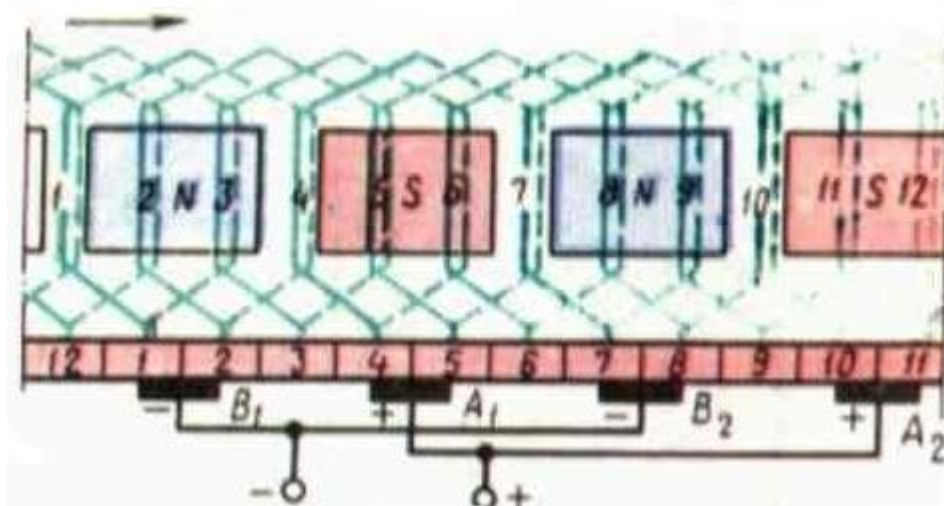


Рис.1.10 – Развернутая схема простой петлевой обмотки.

Простая волновая обмотка

Простой волновой обмоткой (ПВ) называют обмотку якоря, получаемую при последовательном соединении секций, находящихся под разными парами полюсов. Концы секций присоединенных к коллекторным пластинам, удаленные друг от друга на расстоянии шага по коллектору (рисунок 1.11).

За один обход по якорю укладывают столько секций, сколько пар полюсов, при этом конец последней секции присоединяется к пластине, расположенной рядом с исходной пластиной.

Левоходовой называется обмотка, если конец последней по обходу секций присоединяется к коллекторной пластине, находящейся слева от исходной.

Правоходовой называется обмотка, если конец последней секции располагается справа от исходной.

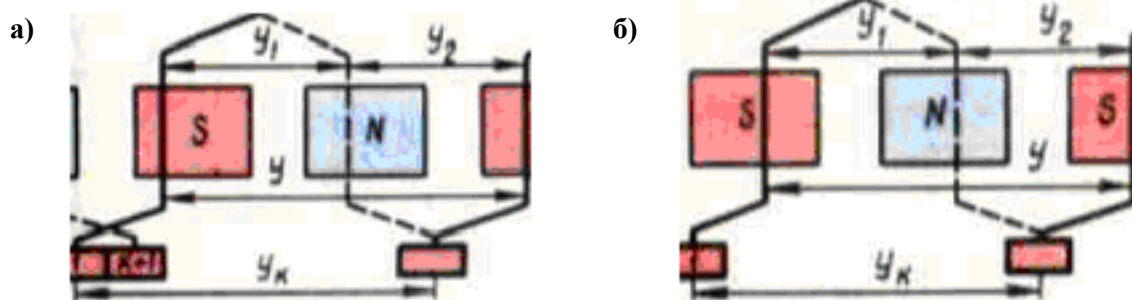


Рис.1.11 – Простая волновая обмотка а) правоходовая б) левоходовая

Для ПВ обмотки характерны следующие параметры:

Шаг обмотки по коллектору в простой волновой обмотке определяется по формуле:

$$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p}, \quad (1.9)$$

Второй частичный шаг в простой волновой обмотке определяется по формуле:

$$y_2 = y - y_1. \quad (1.10)$$

В простой волновой обмотке число параллельных ветвей всегда равно 2:

$$2a = 2. \quad (1.11)$$

Сложная петлевая обмотка

Сложная петлевая обмотка состоит из нескольких простых, уложенных на одном якоре и присоединенных к одному коллектору.

В низковольтных МПТ требуется получить петлевую обмотку с большим числом параллельных ветвей для этого применяют сложную петлевую обмотку.

Ширина щеток принимается такой, чтобы одна щетка одновременно перекрывала столько коллекторных пластин, сколько простых петлевых обмоток.

Число параллельных ветвей в сложной петлевой обмотке:

$$2a = 2pm, \quad (1.12)$$

где m – число простых петлевых обмоток.

Результирующий шаг и шаг по коллектору определяется по формуле:

$$y = y_k = \pm m, \quad (1.13)$$

Шаги y_1 и y_2 определяются аналогично простой петлевой обмотке.

Сложная волновая обмотка

Сложная волновая обмотка – это сочетание нескольких простых волновых обмоток, которые включаются на параллельную работу с помощью щеток.

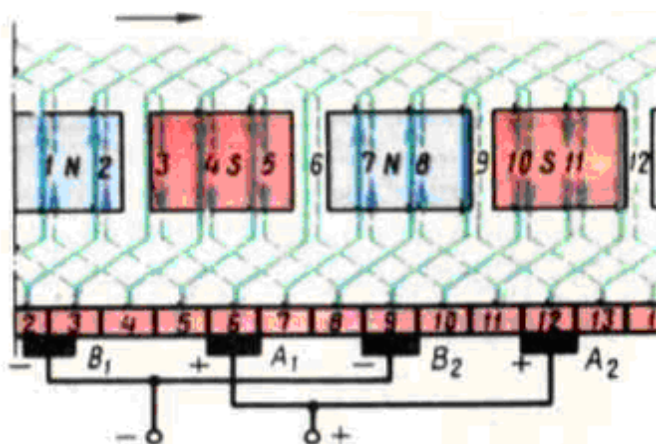


Рис.1.12 – Развернутая схема простой волновой обмотки

Число параллельных ветвей такой обмотки:

$$2a = 2m. \quad (1.14)$$

Шаг по коллектору и результирующий шаг для сложной волновой обмотки определяется по формуле:

$$y_K = y = \frac{K \pm m}{p}. \quad (1.15)$$

Шаги y_1 и y_2 определяется по формулам простой волновой обмотки.

1.2.3 Условия симметрии обмоток якоря

Обмотку якоря называют **симметричной**, если она удовлетворяет условиям симметрии и ее параллельные ветви обладают одинаковыми электрическими свойствами:

- имеют одинаковые сопротивления;
- имеют одинаковые ЭДС якоря;
- имеют одинаковые токи во всех параллельных ветвях.

Условия симметрии

1. Каждая пара параллельных ветвей должна состоять из одинакового числа секций.

$$S/a = \text{целое число}$$

2. Секции каждой пары параллельных ветвей должны занимать на якоре одинаковое число пазов.

$$Z/a = \text{целое число}$$

3. Каждая пара параллельных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение относительно системы главных полюсов.

$$2p/2a = \text{целое число}$$

1.2.4 Электромагнитный момент и электродвижущая сила МПТ

Электродвижущая сила

Электродвижущая сила (ЭДС) в обмотке якоря наводится основным магнитным потоком. Величина, которого зависит от формы распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

Действительное распределение магнитной индукции имеет вид криволинейной трапеции, но для удобства расчета его заменяют прямоугольником.

Высота прямоугольника равна максимальному значению магнитной индукции ($B_{\delta \max}$), а ширина – расчетной полюсной дуге (b_i):

$$b_i = \alpha_i \tau$$

где $\alpha_i = 0,6 \dots 0,8$ – коэффициент полюсного перекрытия;

τ – полюсное деление, мм.

Величина основного магнитного потока определится по формуле:

$$\Phi = B_{\delta} b_i l_i \cdot 10^{-6} = b_{\delta} \alpha_i \tau \cdot l_i \cdot 10^{-6},$$

где B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре;

l_i – длина якоря, мм.

Согласно, закона электромагнитной индукции ЭДС проводника определится по формуле:

$$E_{np} = B_{\delta} l_i V ,$$

где $V = \frac{\pi D_{\text{я}} n}{60} = \frac{2 p \pi}{60}$ – окружная скорость якоря, м/с;

n – частота вращения двигателя, об/мин.

ЭДС обмотки якоря, состоящая из N проводников, определится по формуле:

$$E_{\text{я}} = E_{np} \alpha_i N / 2a ,$$

где N – число пазовых сторон обмотки;

$2a$ – число параллельных ветвей.

ЭДС обмотки якоря зависит от величины магнитного потока, конструктивных параметров машины и от частоты вращения машины.

$$E_{\text{я}} = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_e \Phi n \quad (1.16)$$

где Φ – величина основного магнитного потока, Вб;

$C_e = \frac{pN}{60a}$ – **постоянная ЭДС**, зависящая от конструктивных параметров.

Значение ЭДС обмотки якоря зависит:

1. От ширины секции y_I :

если $y_I = \tau$, $E_{\text{я}} = E_{\text{я max}}$, т.к. магнитный поток сцепляется со всей секцией;

если $y_I < \tau$, $y_I > \tau$ $E_{\text{я}}$ уменьшается, т.к. магнитный поток сцепляется только с одной частью секции, а с другой частью секции сцепляется магнитный поток другого знака. Следовательно, результирующий магнитный поток будет меньше основного.

2. От положения щеток:

При нахождении щеток строго под полюсом $E_{\text{я}} = E_{\text{я max}}$, т.к. в этом случае в каждой параллельной ветви обмотки все секции имеют одинаковые направления ЭДС.

Если щетки сместить, то в параллельных ветвях окажутся секции с противоположным направлением ЭДС, и результирующая ЭДС будет уменьшаться.

Электромагнитный момент

Если пазовые стороны находятся в магнитном поле и по ним протекает ток, то согласно закона электромагнитной индукции в них будет наводиться электромагнитная сила. Величина, которой будет определяться по формуле:

$$F_{\text{эм}} = B_{\delta} l_i i_{\text{я}} ,$$

где $i_{\text{я}} = I_{\text{я}} / 2a$ – ток одной параллельной ветви, А.

Совокупность всех сил создает на якоре электромагнитный момент, величина которого определяется по формуле:

$$M_{\text{эм}} = F_{\text{эм}} N_i \frac{D_{\text{я}}}{2} ,$$

где $N_i = \alpha_i \cdot N$ – число проводников, на которые одновременно действует

электромагнитная сила;

$\frac{D_{\text{я}}}{2}$ - плечо силы, мм.

После математических преобразований формула электромагнитного момента примет вид:

$$M_{\text{эм}} = \frac{Nr}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}} = C_{\text{м}} \Phi I_{\text{я}} \quad (1.17)$$

где $C_{\text{м}} = \frac{Nr}{2\pi a}$ - **постоянная электромагнитного момента**,

Если в формуле ЭДС частоту вращения заменить угловой скоростью, то полученные в этом случае постоянные ЭДС и электромагнитного момента будут равны **конструктивному коэффициенту** машины:

$$\kappa = K_e = K_{\text{м}} = \frac{Nr}{2\pi a}, \quad (1.18)$$

Формулы ЭДС обмотки якоря и электромагнитного момента примут вид:

$$\begin{aligned} E_{\text{я}} &= \kappa \Phi \omega \\ M_{\text{эм}} &= \kappa \Phi I_{\text{я}} \end{aligned} \quad (1.19)$$

где $\omega = \frac{2\pi n}{60}$ - **угловая скорость**, рад/с.

Величина электромагнитного момента может быть определена через электромагнитную мощность:

$$M_{\text{эм}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega} \quad (1.20)$$

где $P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} I_{\text{я}}$ - **электромагнитная мощность** или мощность воздушного зазора, Вт.

Тестовые задания

Практическая работа 1

Практическая работа 2

1.3 Магнитная цепь и реакция якоря

1.3.1 Магнитная цепь МПТ

Магнитная цепь МПТ

(рисунок 1.13) состоит из станины (L_{c1}), сердечников главных полюсов с полюсными наконечниками (h_m), воздушного зазора (δ) и сердечника якоря (L_{c2}).

Магнитное поле МПТ создается обмоткой возбуждения и зависит от величины магнитодвижущая силы ($F_{\text{ов}}$), которая определяется по формуле:

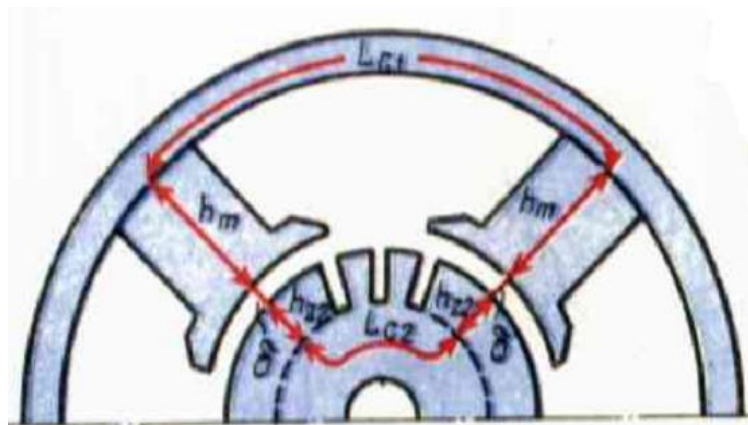


Рис. 1.13 – Магнитная цепь МПТ

$$F_{об} = 2F_{\delta} + 2F_z + 2F_m + 2F_c + F_y, \quad (1.21)$$

где F_{δ} – магнитодвижущая сила воздушного зазора, А;

F_z – магнитодвижущая сила зубцового слоя якоря, А;

F_m – магнитодвижущая сила главного полюса, А;

F_c – магнитодвижущая сила стенки якоря, А;

F_y – магнитодвижущая сила якоря, А;

Значение МДС для различных участков магнитной цепи неодинаково и зависит от магнитного сопротивления этого участка. Наибольшим магнитным сопротивлением обладает воздушный зазор. Величина МДС воздушного зазора (F_{δ}) определяется по формуле:

$$F_{\delta} = 0,8B_{\delta}\delta \cdot k_{\delta}10^3, \quad (1.22)$$

где δ – величина воздушного зазора, мм;

$k_{\delta} > 1$ – коэффициент воздушного зазора;

$B_{\delta} = 0,6 \dots 1,0$ – магнитная индукция воздушного зазора, Тл.

Другие участки цепи выполняют из ферромагнитных материалов. Для их изготовления применяются следующие материалы:

- сердечник якоря – тонколистовые электротехнические стали марок 2013, 2312, 2411 толщиной 5 мм;

- сердечник главного полюса – листовая холоднокатаная сталь марки 3411 толщиной 1мм, пластины не изолируются;

- станина – в машинах малой мощности из стальных цельнотянутых труб, а в машинах средней и большой мощности сварная из листовой конструкционной стали марки Ст3.

Магнитная индукция воздушного зазора пропорциональна величине основного магнитного потока.

Магнитный поток главных полюсов состоит из 2-х неравных частей: основного магнитного потока и магнитного потока рассеивания.

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_{\sigma} = \Phi(1 + \sigma_m), \quad (1.23)$$

где Φ_m – магнитный поток главных полюсов, Вб;

Φ – основной магнитный поток, Вб;

Φ_δ – магнитный поток рассеивания, Вб;

$\sigma_m = 0,1 \dots 0,25$ – коэффициент рассеивания.

1.3.2 Реакция якоря МПТ

При работе МПТ в режиме холостого хода (рисунок 1.14) ток в обмотке якоря отсутствует.

Магнитное поле машины определяется только МДС ОВ и симметрично относительно оси главных полюсов. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре имеет вид криволинейной трапеции.

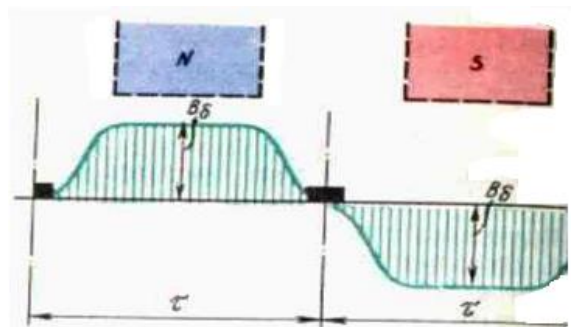


Рис. 1.14 – Работа МПТ в режиме холостого хода

Если машину нагрузить, то в обмотке якоря появится ток, который приведёт к созданию МДС обмотки якоря и собственного магнитного поля.

Если щетки установить на геометрической нейтрали и при отсутствии тока возбуждения ($I_e = 0$). Тогда магнитное поле, созданное этой МДС будет иметь вид показанный на рисунке 1.15.

Наибольшее значение МДС якоря – на линии щеток, а по оси полюсов эта МДС равна нулю.

В нагруженной машине одновременно действуют поле обмотки якоря и поле обмотки возбуждения. Образуют результирующее поле, характеристика которого показана на рисунке 1.16.

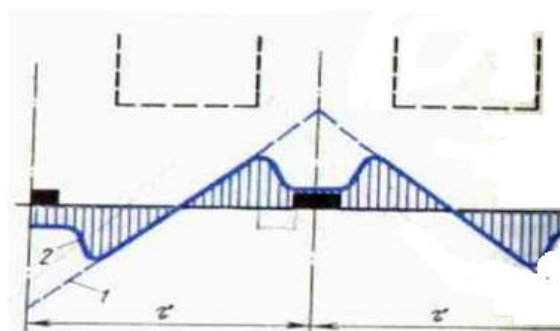


Рис. 1.15 – Работа МПТ при отсутствии возбуждения

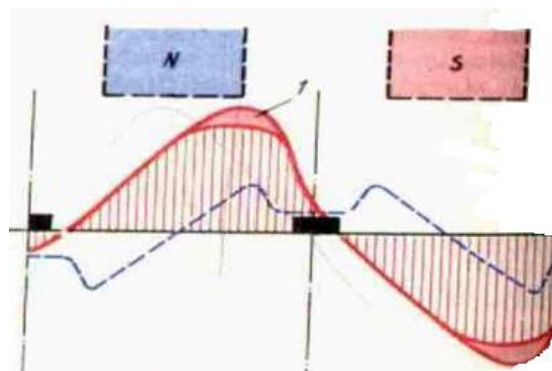


Рис 1.16 – Реакция якоря в МПТ

Полярность полюсов и направление тока якоря соответствуют:

- режиму генератора, когда якорь вращается по часовой стрелке;
- режиму двигателя, когда якорь вращается против часовой стрелки.

Развиваемый в машине электромагнитный момент можно рассматривать как результат взаимодействия полюсов поля якоря и полюсов поля возбуждения.

Реакцией якоря называется влияние МДС обмотки якоря на магнитное поле машины.

Реакция якоря искажает магнитное поле машины, делает его не симметричным относительно оси полюсов.

При установке щеток на геометрической нейтрали поле якоря направлено поперек оси полюсов и называется **полем поперечной реакции якоря**.

Поперечная реакция якоря вызывает ослабление поля под одним краем полюса и его усиления под другим.

Результирующий магнитный поток поворачивается относительно оси главных полюсов на некоторый угол. Ось результирующего поля поворачивается в генераторном режиме по направлению вращения, а в двигательном режиме – в обратную сторону.

Чем больше нагрузка машины, тем больше искажение результирующего поля.

Если щетки сдвинуты с геометрической нейтрали на 90° , то поле якоря действует вдоль оси полюсов и называется **полем продольной реакции якоря**.

Если магнитная система машины *не насыщена*, то реакция якоря будет искажать результирующий магнитный поток, не изменяя его значения.

Если магнитная система машины *насыщена*, что характерно для большинства машин, то подмагничивание одного края полюсного наконечника и зубцовой зоны происходит в меньшей степени, чем размагничивания другого.

Это ведет к уменьшению результирующего магнитного поля, и реакция якоря размагничивает машину.

1.3.3 Способы устранения вредного влияния реакции якоря

Искажение результирующего поля машины не благоприятно отражается на ее рабочих свойствах:

- сдвиг физической нейтрали относительно геометрической приводит тяжелым условиям работы щеточного контакта;
- влечет за собой перераспределение магнитной индукции в воздушном зазоре.

Поэтому при проектировании МПТ принимают меры к устранению или ослаблению влияния реакции якоря.

Компенсационная обмотка.

Эту обмотку укладывают в пазы полюсных наконечников и включают последовательно с обмоткой якоря, так чтобы МДС компенсационной обмотки имело противоположное направление с МДС обмотки якоря.

Включенная таким образом компенсационная обмотка обеспечивает автоматичность компенсации реакции якоря и закон распределения магнитной индукции в воздушном зазоре остается неизменным.

Компенсационную обмотку применяют в машинах средней и большой мощности ($P_{ном} > 150 \dots 500 \text{ кВт}$) при напряжении при $U > 400 \text{ В}$, работающих с резкими колебаниями нагрузки.

Увеличение воздушного зазора.

Вредное влияние реакции якоря ослабляют соответствующим выбором воздушного зазора. Следует учитывать, что при уменьшении воздушного зазора и увеличении нагрузки реакция якоря может не только ослабить магнитное поле, но и вызвать его перемagnetивание.

Увеличение воздушного зазора ведет к необходимости увеличения полюсных катушек, полюсов и габаритов машины.

Применяется в машинах малой и средней мощности, не имеющих компенсационной обмотки.

1.4 Коммутация в машинах постоянного тока

1.4.1 Причины, вызывающие искрение на коллекторе

При работе МПТ щетки и коллектор образуют скользящий контакт. Площадь контакта щетки выбирают по значению рабочего тока машины.

Если по какой то причине щетка прилегает к коллектору не всей поверхностью, то возникают местные токи, приводящие к искрению на коллекторе.

Причины, вызывающие искрение на коллекторе, делятся на два вида: механические и электромагнитные.

Механические причины – это причины, вызывающие нарушение электрического контакта между щеткой и коллектором.

К ним относятся: слабое давление щеток на коллектор, загрязнение коллектора, вибрация щеткодержателя.



Потенциальные причины – эти причины возникают при напряжении между смежными коллекторными пластинами, превышающего допустимое значение напряжения. Это искрение наиболее опасное, т.к. сопровождается появлением электрической дуги.

Коммутационные причины – создаются физическими процессами, происходящими в машине.

Искрение, вызванное электромагнитными причинами, приводят к повреждению площади коллектора к вибрации щеток, т.е. способствует возникновению искрения по механическим причинам. Неустойчивость щеточного контакта существенно влияет на электромагнитные процессы.

Искрения щеток на коллекторе является результатом совместного действия многих причин.

Искрение на коллекторе оценивается степенью искрения под сбегающим краем щетки.

Степени искрения согласно ГОСТу приведены в таблице 1

Если допустимая степень искрения в паспорте машины не указана, то при номинальной нагрузке она не должна превышать степень $1^{1/2}$.

1.4.2 Коммутация. Виды коммутации

При вращении якоря МПТ коллекторные пластины поочередно вступают в соприкосновение со щетками. При этом переход щетки с одной пластины на другую сопровождается переключением секции обмотки из одной параллельной ветви в другую.

Коммутация - это процесс переключения секции из одной параллельной ветви в другую и сопровождающие его явления.

Секция, в которой происходит коммутация, называется **коммутирующей**.

Таблица 1 – Степени искрения и их характеристики

Степени искрения	Характеристики степени искрения	Состояние коллектора и щеток
1	Отсутствия искрения (темная коммутация)	
$1^{1/4}$	Слабое искрение под небольшой частью щетки.	Отсутствие почернения коллектора и нагара на щетках.
$1^{1/2}$	Слабое искрение под большей частью щетки.	Появление нагара на щетках и следов почернения на коллекторе. Легко устраняется протиранием поверхности коллектора.
2	Искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и перегрузки.	Появление нагара на щетках и следов почернения на коллекторе. Не устраняется протиранием поверхности коллектора.
3	Значительное искрение под всем краем щетки с наличием крупных вылетающих искр. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования машины.	Значительное почернение на коллекторе, не устраняемое протиранием коллектора. Подгар и разрушение щеток.

Периодом коммутации (T_k) - называется продолжительность процесса коммутации.

$$T_k = [60/Kn] \cdot (b_{щ}/b_k), \quad (1.24)$$

где $b_{щ}$ – ширина щетки, мм;

K – число коллекторных пластин;

n – частота вращения якоря, об/мин;

b_k – расстояние между серединами соседних коллекторных пластин, мм.

В современных машинах постоянного тока период коммутации изменяется в пределах от 0,001с до 0,0001с.

Качество коммутации оценивается степенью искрения (**классом коммутации**) под сбегающим краем щетки, из-под которого выходят пластины коллектора при его вращении и плотностью тока в переходном контакте «щетка - пластина».

Плотность тока (j) – под щеткой прямо пропорциональна тангенсу угла между осью абсцисс и графиком коммутации.

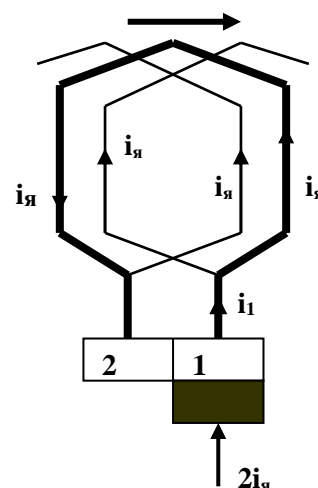
Процесс коммутации является очень сложными и делится на 3 основных этапа.

I этап:

В начальный момент времени контактная поверхность щетки касается только пластины 1.

Ток в коммутируемой секции, присоединенной к пластинам 1 и 2, равен i_a и направлен от пластины 1 к пластине 2. Ток щетки проходит через пластину 1.

Для этого момента времени справедливы аналитические выражения:



$$t = 0; i_1 = 2i_a; i_2 = 0$$

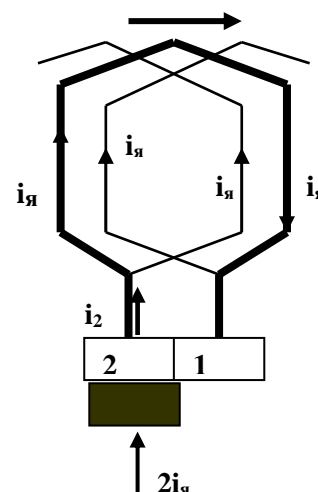
II этап:

Пластина 1 постепенно сбегае со щетки и на смену ей набегае пластина 2. Одна часть щетки проходит через пластину 1, а другая через пластину 2.

В середине процесса коммутации контактная поверхность щетки равномерно перекрывает обе коллекторные пластины.

Коммутирующая секция оказывается, замкнута щеткой, и ток в ней постепенно уменьшается.

Для этого момента времени справедливы аналитические выражения:



$$t = 0,5T_k; i_1 + i_2 = 2i_a$$

III этап:

В конце коммутации щетка полностью переходит на пластину 2 и теряет контакт с пластиной 1.

Ток в коммутирующей секции остаётся равным по значению и противоположным по направлению относительно начала коммутации.

Для этого момента времени справедливы аналитические выражения:

$$t = T_k; i_2 = 2i_y; i_1 = 0$$

1.4.2.1 Прямолинейная коммутация

Коммутация, при которой ток в коммутирующей секции изменяется по прямолинейному закону, называется **прямолинейной (идеальной) коммутацией**.

Этот вид коммутации имеет место в машине, если в процессе коммутации в коммутирующей секции ЭДС не наводится или сумма ЭДС в коммутирующей секции равна нулю.

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0, \quad (1.25)$$

где R_1 и R_2 – переходные сопротивления между щеткой и сбегающей и набегающей пластинами;

$$\begin{aligned} i_1 &= i_y + i \\ i_2 &= i_y - i \end{aligned} \quad \text{– токи, переходящие в обмотку якоря через пластины 1 и 2;}$$

i – ток в коммутирующей секции.

Закон изменения тока в коммутирующей секции в функции времени имеет вид:

$$i = i_y (1 - 2t/T_k), \quad (1.26)$$

График $i = f(t)$ представляет собой прямую линию, пересекающую ось абсцисс в точке $t = 0,5T_k$. График данной функции представлен на рисунке 1.17.

Свойства прямолинейной коммутации.

1. Плотность тока под щеткой величина постоянная $j_1 = j_2 = \text{Const}$.

2. Выход пластины из-под щетки без разрыва тока.

3. Коммутация не сопровождается искрением на коллекторе.

1.4.2.2 Криволинейная замедленная коммутация

Коммутация, при которой ток в коммутирующей секции изменяется по криволинейному закону, называется **криволинейной замедленной коммутацией**.

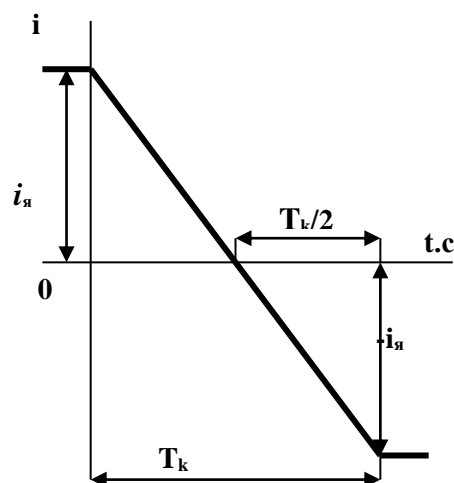


Рис. 1.17 – График тока прямолинейной коммутации

Этот вид коммутации имеет место в машине, если в процессе коммутации в коммутирующей секции сумма ЭДС не равна нулю.

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 = \sum e, \quad (1.27)$$

где $\sum e = e_p + e_{gp}$ - сумма ЭДС, действующих в коммутирующей секции;

$e_p = e_L + e_M$ - реактивная результирующая ЭДС;

$e_{gp} = B_k 2lw_c v$ - ЭДС вращения, возникающая под действием реакции якоря.

ЭДС вращения в отличие от реактивной ЭДС может иметь различное направление в зависимости от полярности внешнего магнитного поля в зоне коммутации.

Закон изменения тока в коммутирующей секции в функции времени:

$$i = i_{np} + i_o, \quad (1.28)$$

где i_{np} – ток прямолинейной коммутации;

i_o – дополнительный ток коммутации, возникающий в контуре коммутирующей секции под действием суммы ЭДС.

График изменения результирующего тока коммутации $i = i_{np} + i_o = f(t)$ получа-

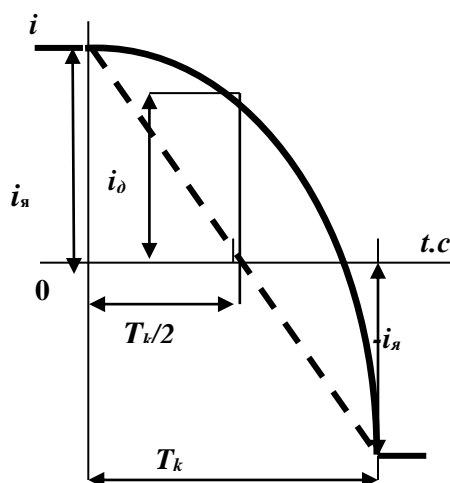


Рис. 1.18 – График тока криволинейной коммутации

ется путем сложения ординат графиков тока прямолинейной коммутации и добавочного тока коммутации и показан на рисунке 1.18.

Криволинейный вид этого графика объясняется криволинейностью графика дополнительного тока.

Поэтому в середине коммутации величина тока $i = i_o$, который имеет наибольшее значение.

По сравнению с прямолинейной коммутацией процесс изменения тока до нуля и по направлению наступает во вто-

рой половине периода и затягивается во времени.

При значительных нагрузках машины плотность тока под сбегаящим краем щетки достигает недопустимо большого значения и вызывает искрения на коллекторе.

Свойства криволинейной замедленной коммутации

1. Повышение плотности тока под сбегаящим краем щетки.
2. Происходит разрыв тока коммутации при выходе сбегаящей пластины из-под щетки.
3. Возникновения искрения на коллекторе под сбегаящими краями щеток.

1.4.3 Способы улучшения коммутации

Основная причина неудовлетворительной коммутации в МПТ – это наличие добавочного тока коммутации.

$$i_o = \sum e / \sum R_{\text{щ}} \quad (1.29)$$

где $\sum e$ – суммарная ЭДС коммутирующей секции;

$\sum R_{\text{щ}}$ – суммарное сопротивление секции.

Величина этого тока зависит от суммы электрических сопротивлений. Наибольшее значение имеет сопротивление щетки и переходного контакта.

Для того, чтобы уменьшить добавочный ток необходимо:

- увеличить величину сопротивления щеток;
- уменьшить величину суммарной ЭДС в коммутирующей секции.

Выбор щеток.

Для обеспечения удовлетворительной коммутации целесообразно применять щетки с большим переходным падением напряжения в переходном контакте.

Однако допустимая плотность тока в этих щетках невелика. Поэтому применение их в машинах с большим рабочим током ведет к необходимости увеличения щеточного контакта, а, следовательно, требует увеличения площади коллектора за счет его длины.

Щетки с большим сопротивлением применяют в машинах с высоким напряжением и с небольшим рабочим током.

Щетки для электрических машин разделяют на четыре группы, различающихся составом, способом изготовления и характеристиками. Выбор типа щеток зависит от условий эксплуатации машины.

Добавочные полюса.

Назначение добавочных полюсов – это создание в зоне коммутации магнитного поля такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутирующей секции ЭДС вращения компенсировала реактивную ЭДС.

Добавочные полюса располагают между главными полюсами. Щетки располагают на геометрической нейтрали.

Число добавочных полюсов равно количеству главных полюсов или вдвое меньше. Число витков обмотки добавочных полюсов выбирают таким, чтобы МДС добавочных полюсов компенсировала МДС обмотки якоря.

Для обеспечения компенсации реактивной ЭДС при различных нагрузках машины обмотку добавочных полюсов включают последовательно с обмоткой якоря.

Добавочные полюса обеспечивают удовлетворительную коммутацию в машине в пределах номинальной нагрузки.

Смещение щеток с геометрической нейтрали.

Данный способ применяют в машинах мощностью до 1кВт, которые выполняются без добавочных полюсов.

Смещение щеток с геометрической нейтрали позволяет создать коммутлирующее поле, которое будет наводить в коммутлирующей секции ЭДС вращения, равную реактивной ЭДС и противоположную ей по направлению.

Реактивная ЭДС будет компенсирована и коммутация станет прямолинейной. Для получения необходимого эффекта щетки необходимо смещать в направлении вращения якоря в генераторном режиме или против вращения якоря в двигательном режиме.

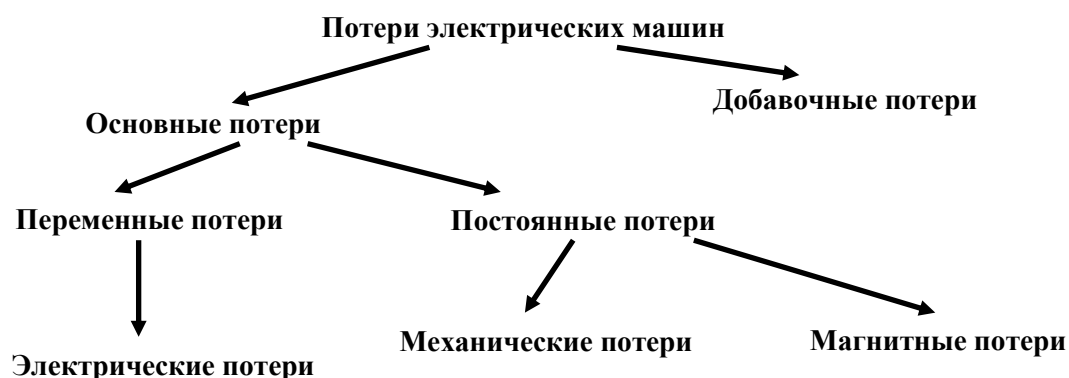
Данный способ имеет существенные недостатки:

- коммутлирующее поле изменяется не пропорционально нагрузке, что исключает полную компенсацию реактивной ЭДС;
- усиливается размагничивающееся действие реакции якоря;
- недопустимо для машин, работающих в реверсивном режиме.

Тестовые задания

1.5 КПД и потери МПТ

1.5.1 Потери МПТ



Добавочные потери ($\Delta P_{доб}$) – это все трудно учитываемые потери.

В МПТ к ним относятся потери на вихревые токи, потери в уравнивательных соединениях и в полюсных наконечниках.

Добавочные потери в ГПТ составляют 1% от номинальной мощности, а в ДПТ – 1% от подводимой мощности:

$$\begin{aligned}\Delta P_{доб} &= 0,01 P_{ном} \\ \Delta P_{доб} &= 0,01 P_1\end{aligned}\tag{1.30}$$

Электрические потери зависят от величины нагрузки, поэтому являются **переменными** и обусловлены нагревом обмоток и щеточного контакта.

В МПТ они делятся на два вида: потери на возбуждения и потери в обмотке якоря.

Потери на возбуждения ($\Delta P_{эв}$) определяются потерями в обмотке возбуждения и в реостате, включённом в цепь возбуждения.

Потери в обмотке якоря ($\Delta P_{эя}$) определяются потерями в якорной цепи.

$$\begin{aligned}\Delta P_{эя} &= I_{я}^2 R_{я} \\ \Delta P_{эв} &= I_{г}^2 R_{г} = U_{г} I_{г}\end{aligned}\quad (1.31)$$

Магнитные потери ($\Delta P_{м}$) происходят только в сердечнике якоря, т.к. он подвергается перемагничиванию.

Величина магнитных потерь зависит от частоты перемагничивания, значения магнитной индукции воздушного зазора и магнитных свойств материала из которого изготовлен сердечник якоря.

Механические потери ($\Delta P_{мех}$) – это потери от трения щеток о коллектор; трения в подшипниках; вентиляцию.

Магнитные и механические потери при постоянной частоте вращения являются **постоянными потерями**, и их сумма составляет потери холостого хода.

$$\Delta P_{xx} = \Delta P_{м} + \Delta P_{мех}, \quad (1.32)$$

1.5.2 Энергетическая диаграмма МПТ

Энергетической диаграмма – это диаграмма, показывающая, как преобразуется и на что расходуется мощность, поступающая на вход электрической машины.

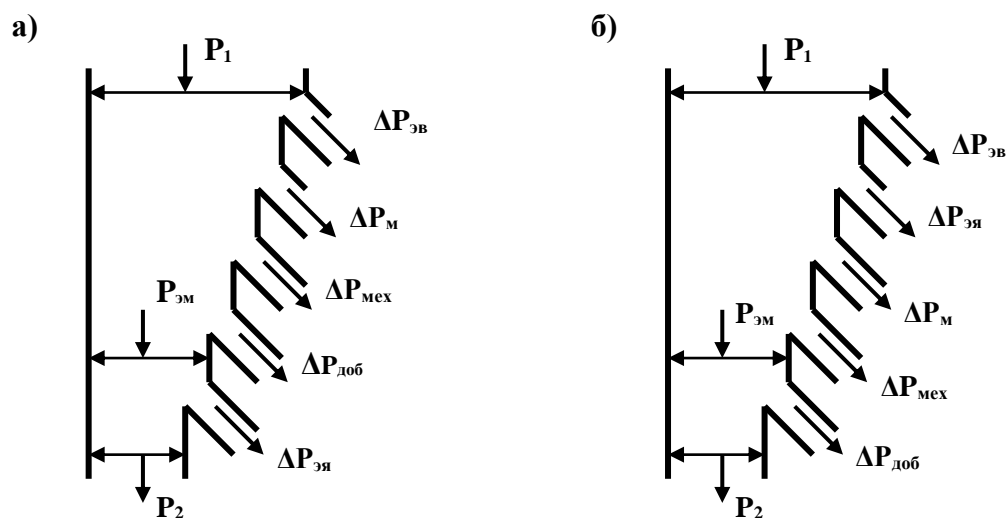


Рис. 1.19 – Энергетические диаграммы МПТ:

а) ГПТ; б) ДПТ

Мощность на входе генератора ($P_{1г}$) – это подводимая от приводного двигателя *механическая* мощность, которая определяется по формуле:

$$P_1 = M_1 \omega \quad (1.33)$$

Мощность на входе двигателя ($P_{1д}$) – это подводимая от сети *электрическая* мощность, которая определяется по формуле:

$$P_1 = UI \quad (1.34)$$

Электромагнитная мощность ($P_{эм}$) – мощность воздушного зазора, в которую преобразуется мощность на входе МПТ за вычетом потерь.

В генераторе – это потери холостого хода и добавочные потери, а в двигателе – это электрические потери.

$$\begin{aligned} P_{эм}^g &= P_1 - (P_{xx} + \Delta P_{доб}) = E_{я} I_{я} \\ P_{эм}^д &= P_1 - (\Delta P_{эя} + \Delta P_{эв}) = E_{я} I_{я} \end{aligned} \quad (1.35)$$

Мощность на выходе генератора ($P_{2г}$) – это полезная мощность, которая поступает на вход потребителя или *электрическая* мощность:

$$P_2 = P_{эм} - \Delta P_{эя} = P_1 - \sum \Delta P = U_{ном} I_{ном} \quad (1.36)$$

Мощность на выходе двигателя ($P_{2д}$) – это полезная мощность на валу двигателя или *механическая* мощность:

$$P_2 = P_{эм} - \Delta P_{xx} = P_1 - \sum \Delta P = M_2 \omega, \quad (1.37)$$

где $\sum \Delta P$ – это сумма всех потерь в электрической машине;

Полезная мощность одновременно является номинальной мощностью. В паспортных данных электрической машины указывается её номинальная мощность.

1.5.3 Коэффициент полезного действия

Коэффициент полезного действия (КПД) – это отношение мощности на выходе электрической машины к мощности на ее входе.

Для генераторов постоянного тока КПД определяются по формуле:

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_{ном} I_{ном}}{U_{ном} I_{ном} + \sum \Delta P} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{U_{ном} I_{ном} + \sum \Delta P}, \quad (1.38)$$

Для двигателей постоянного тока КПД определяются по формуле:

$$\eta_{дв} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_{ном} I_{ном} - \sum \Delta P}{U_{ном} I_{ном}} = 1 - \frac{\sum \Delta P}{U_{ном} I_{ном}}, \quad (1.39)$$

КПД электрических машин зависит от номинальной мощности машины. Чем выше номинальная мощность, тем выше ее КПД.

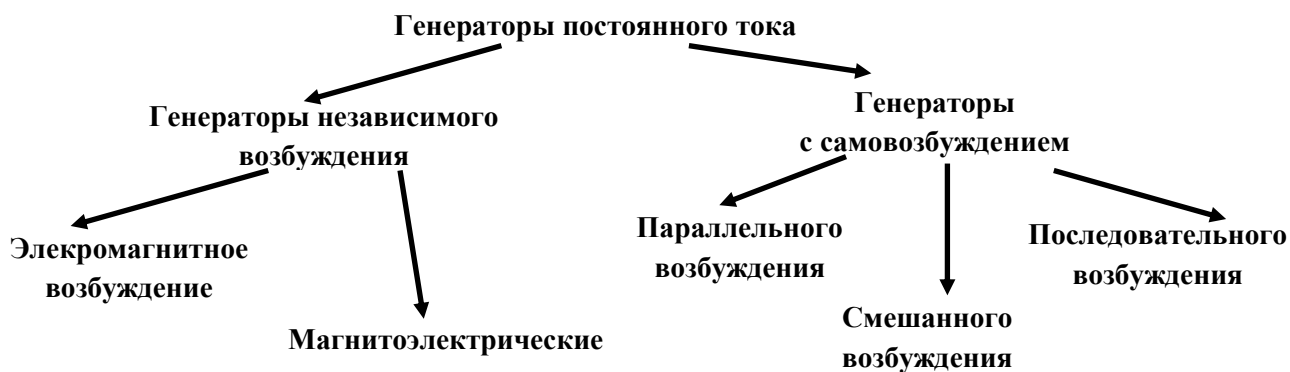
Так для МПТ мощностью от 1 до 100кВт КПД составляет 0,75...0,9; для машин мощностью свыше 100кВт КПД составляет 0,9...0,97.

1.6 Генераторы постоянного тока

1.6.1 Общие сведения

Генераторы постоянного тока (ГПТ) широко используются в различных промышленных, транспортных и других установках для питания ЭП с широким регулированием скорости; в электролизной промышленности, на судах, тепловозах. В этих случаях ГПТ приводятся во вращение электродвигателями переменного тока, паровыми турбинами или двигателями внутреннего сгорания.

ГПТ классифицируются по способу возбуждения.



В *генераторах с электромагнитным возбуждением* обмотка возбуждения питается постоянным током от постороннего источника.

В *магнитоэлектрических генераторах* полюса выполняются в виде постоянных магнитов.

В *генераторах с самовозбуждением* обмотки возбуждения питаются электроэнергией, вырабатываемой в самом генераторе. На это расходуется от 0,3 до 5% номинальной мощности машины.

В *генераторах параллельного возбуждения* ток возбуждения составляет от 1 до 5% от номинального тока или тока нагрузки. Обмотка возбуждения выполняется с большим числом витков малого сечения.

Ток нагрузки определяется по формуле:

$$I_n = I_y + I_v \quad (1.40)$$

В *генераторе последовательного возбуждения* падения напряжения в обмотке возбуждения составляет от 0,2 до 1,0% от номинального напряжения. Обмотка возбуждения выполняется с малым числом витков большого сечения.

Все токи равны между собой:

$$I_n = I_y = I_v \quad (1.41)$$

Генераторы смешанного возбуждения имеют две обмотки. Эти обмотки располагаются на общих главных полюсах. Обмотки возбуждения включаются между собой согласно или встречно.

Если обмотки создают МДС одинакового направления, то их включение называется *согласным*.

Если обмотки создают МДС противоположного направления, то их включение называется *встречным*.

Обычно применяется согласное включение обмоток возбуждения, так чтобы основная часть магнитного поля возбуждения создавалась параллельной обмоткой возбуждения.

По своим свойствам генераторы параллельного и независимого возбуждения одинаковы.

В промышленности обычно применяются генераторы независимого возбуждения, параллельного и смещенного возбуждения.

1.6.2 Основные характеристики генераторов постоянного тока

Свойства генераторов анализируются с помощью характеристик, которые устанавливают связь между основными величинами, определяющими работу генераторов.

Основными величинами являются: напряжение на зажимах $U_{ном}$; ток возбуждения I_v ; ток обмотки якоря I_a или ток нагрузки $I_{ном}$; частота вращения $n_{ном}$.

Обычно ГПТ работает при $n=Const$, поэтому основные характеристики рассматривают при этом условии.

Существует четыре основных характеристик генераторов.

1.6.2.1 Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода $U_{xx} = f(I_v)$ - это зависимость напряжения на выходе генератора в режиме холостого хода от тока возбуждения при условии, что ток нагрузки равен нулю.

Характеристика холостого хода и позволяет судить о магнитных свойствах машины.

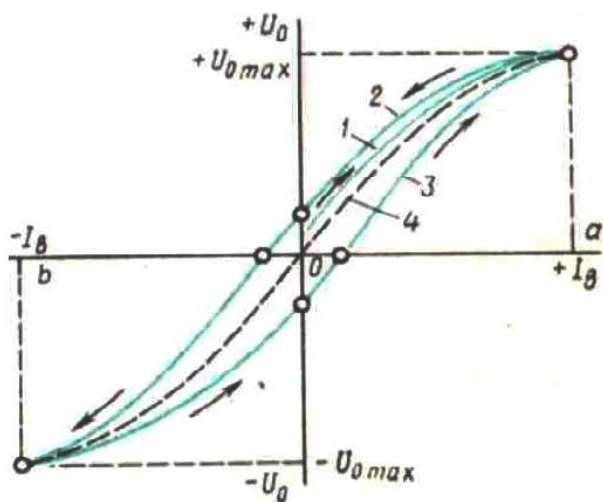


Рис 1.20 - Характеристика холостого хода

Данную характеристику для всех типов генераторов снимают при независимом возбуждении, когда ток возбуждения можно изменить в пределах от 0 до $I_{v ном}$.

Для снятия данной характеристики устанавливают номинальную частоту вращения и постепенно увеличивают ток возбуждения от нулевого значения до $+I_v$ при котором $U_{xx} = 1,15U_{ном}$ и строят кривую 1.

Затем уменьшают ток возбуждения до нуля и, изменив его направление, постепенно увеличивают до $-I_v$.

Полученная **кривая 2** называется нисходящей ветвью характеристики.

Далее опыт проводят в другом направлении и получают **кривую 3**, называемую восходящей ветвью характеристики.

Нисходящая и восходящая ветви образуют петлю намагничивания.

Средняя линия между этими кривыми является **основной характеристикой холостого хода**.

Особенности характеристики холостого хода:

- Наличие остаточной ЭДС;
- Относительно широкая петля гистерезиса;

- Повторят в другом масштабе магнитную характеристику машины.

1.6.2.2 Внешняя характеристика

Внешняя характеристика

$U = f(I)$ - зависимость напряжения на выходе генератора от тока нагрузки при условии, что ток возбуждения остается величиной постоянной.

Внешняя характеристика характеризуется величиной падения напряжения.

Падение напряжения (ΔU) – определяет наклон внешней характеристики к оси абсцисс, оценивается номинальным напряжением генератора при сбросе нагрузки.

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{xx} - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (1.42)$$

На рисунке 1.21 приведена внешняя характеристика ГПТ НВ.

При $I = 0$; $U = U_{xx}$.

С ростом нагрузки напряжение уменьшается по линейному закону.

При нагрузках близких к номинальным, напряжение изменяется по нелинейному закону.

Чем меньше ΔU , тем выше жесткость внешней характеристики.

Для ГПТ НВ $\Delta U_{ном} = 5...10\%$ Для ГПТ ПВ $\Delta U_{ном} = 10...30\%$.

На рисунке 1.22 показаны внешние характеристики ГПТ при различных схемах включения обмотки возбуждения.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения при перегрузках отличается от характеристики ГПТ НВ.

Это объясняется тем, что в ГПТ ПВ уменьшение напряжения вызывается еще и падением напряжения в обмотке возбуждения.

При $I_{я\ max} \gg I_{я\ ном}$ возникает круговой огонь.

В генераторах смешанного возбуждения вид характеристики зависит от схемы включения обмоток.

При согласном включении ха-

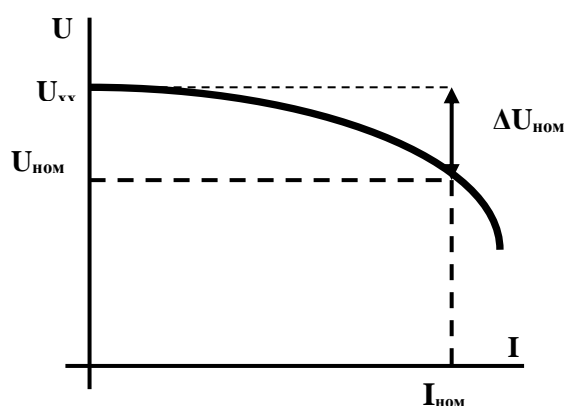
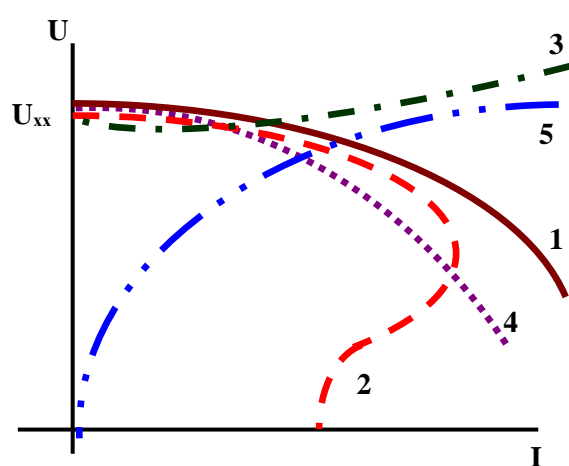


Рис 1.21 - Определение изменения номинального напряжения



1 – ГПТ НВ; 2 - ГПТ ПВ; 3 – ГПТ СВ согл ;
4 – ГПТ СВ встр; 5 – ГПТ Посл.В

Рис 1.22 - Внешние характеристики ГПТ различного возбуждения

рактеристика более жесткой. Напряжение при увеличении нагрузки остается неизменным.

При встречном включении с ростом нагрузки напряжение на генераторе резко уменьшается.

В ГПТ последовательного возбуждения с ростом нагрузки напряжение также увеличивается. При небольших токах напряжение растет линейно, а при значительных токах будет уменьшаться из-за влияния реакции якоря.

Так как напряжения ГПТ последовательного возбуждения сильно изменяется с изменением нагрузки, то он не пригоден для питания большинства потребителей.

1.6.2.3 Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика $I_g = f(I_a)$ – зависимость тока возбуждения от тока нагрузки при условии, что напряжение на выходе генератора остается величиной постоянной.

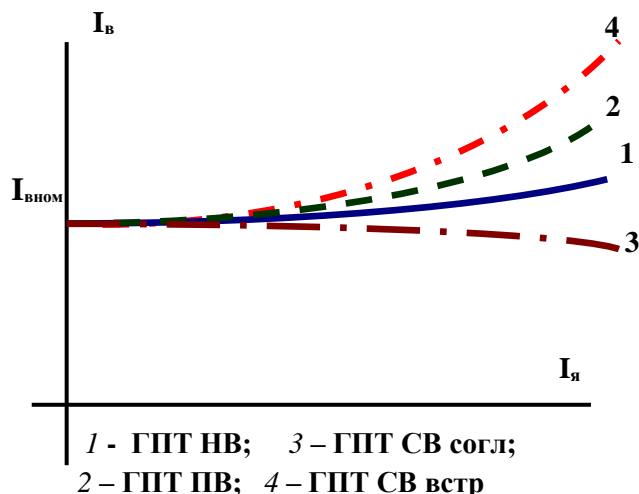


Рис. 1.23 - Регулировочные характеристики ГПТ различного возбуждения

Регулировочная характеристика показывает, как надо изменить ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на выходе генератора оставалось величиной постоянной.

На рисунке 1.23 показаны регулировочные характеристики ГПТ различного возбуждения.

Для генераторов с последовательным возбуждением регулировочная характеристика не снимается.

1.6.2.4 Нагрузочная характеристика

Нагрузочная характеристика $U = f(I_g)$ – это зависимость напряжения на выходе от тока возбуждения при условии, что ток нагрузки остается величиной постоянной.

Нагрузочная характеристика является вспомогательной характеристикой.

Нагрузочная характеристика по виду схожа с характеристикой холостого хода и проходит несколько ниже из-за падения напряжения в цепи якоря.

Данную характеристику для всех типов генераторов снимают при независимом

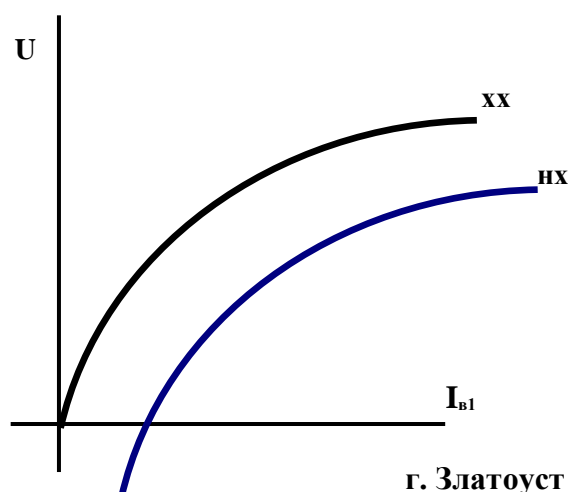


Рис. 1.24 - Нагрузочная характеристика

возбуждении, когда ток возбуждения можно изменить в пределах от 0 до $I_{в\text{ ном.}}$

При снятии данных для построения нагрузочной характеристики при изменении тока возбуждения ток в якоре поддерживается неизменным путем изменения сопротивления в цепи якоря.

Тестовые задания

1.7 Двигатели постоянного тока

1.7.1 Общие сведения

Двигатели постоянного тока (ДПТ) преобразуют электрическую энергию в механическую энергию.

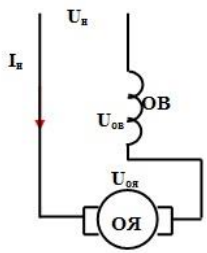
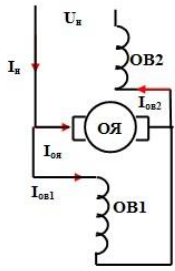
ДПТ находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках, где требуется широкое и плавное регулирование скорости вращения (прокатные станы, мощные металлорежущие станки). Это возможно из-за наличия в ДПТ механического преобразователя частоты, которым является щеточно-коллекторный узел.



Схемы включения и основные особенности ДПТ приведены в таблице 2

Таблица 2 – Свойства основных типов двигателей постоянного тока

Тип двигателя	Схема включения	Основные свойства
Независимого возбуждения (ДПТ НВ)		$U_{ном} = U_{оя}; \quad U_{оя} \neq U_{ов}$ $I_{ном} = I_{оя}; \quad I_{оя} \neq I_{ов}$
Параллельного возбуждения (ДПТ ПВ)		$U_{ном} = U_{оя} = U_{ов}$ $I_{ном} = I_{оя} + I_{ов}$

Последовательного возбуждения (ДПТ Посл.В)		$U_{ном} = U_{оя} + U_{ов}$ $I_{оя} = I_{ном} = I_{ов}$
Смешанного возбуждения (ДПТ СВ)		$U_{ном} = U_{оя} + U_{ов2}$ $I_{ном} = I_{оя} + I_{ов1}$ $U_{оя} = U_{ов1}$ $I_{ном} = I_{ов2}$

По своим рабочим и регулировочным свойствам ДПТ независимого и параллельного возбуждения одинаковы, поэтому в дальнейшем их будем рассматривать как один класс.

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его рабочими характеристиками, а регулировочные – механической характеристикой.

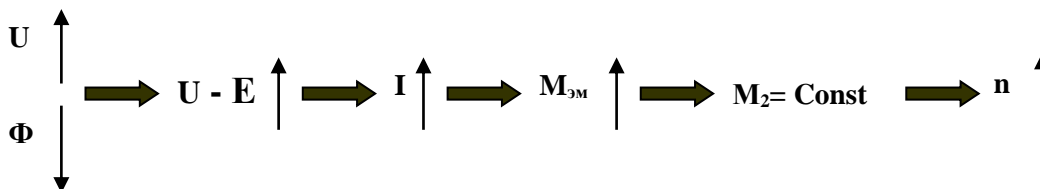
1.7.2 Механическая характеристика

Механической характеристикой $w = f(M)$ называется зависимость частоты вращения вала двигателя от величины момента на его валу.

Для получения аналитического выражения зависимости частоты вращения от момента преобразуем уравнение скорости и подставим в него уравнение тока из выражения электромагнитного момента (см. п. 1.2.4, формулы 1.19):

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{M_{эм} R_{я}}{(k\Phi)^2} \quad (1.43)$$

Из полученной зависимости следует, что частота вращения ДПТ прямо пропорциональна величине питающего напряжения и обратно пропорциональна изменению величины магнитного потока.



Физический смысл этого утверждения следующий:

Увеличение напряжения или уменьшение магнитного потока вызывает увеличение разности между напряжением сети и ЭДС обмотки якоря, это ведет к росту тока якоря. Следовательно, повышается вращающий момент двигателя.

Если нагрузочный момент постоянный, то частота вращения двигателя будет увеличиваться.

Характерные точки механической характеристики и их основные параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Координаты основных точек механической характеристики

Характерная точка	Координаты	
	Момент, $M(H_M)$	Угловой скорости, $\omega(rad/c)$
Холостого хода	$M = 0$	$\omega = \omega_0$
Номинального режима	$M = M_{ном}$	$\omega = \omega_{ном}$
Пуска (короткого замыкания)	$M = M_n$	$\omega = 0$

1.7.2.1 Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

Для данного типа двигателя полученная зависимость остается без изменения и может быть записана в виде:

$$\omega = \omega_0 - \Delta\omega,$$

где $\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$ - *скорость идеального холостого хода*;

$\Delta\omega = \frac{MR_{\Sigma}}{(k\Phi)^2}$ - *изменение угловой скорости*, вызванное изменением нагрузки.

ки.

Изменение частоты вращения, вызванное изменением нагрузки, определяет наклон характеристики или ее жесткость.

Чем меньше эта величина, тем наклон характеристики относительно оси абсцисс меньше.

Для ДПТ независимого возбуждения вид механической характеристики – это прямая линия, проходящая через точку холостого хода (рисунок 1.25, а).

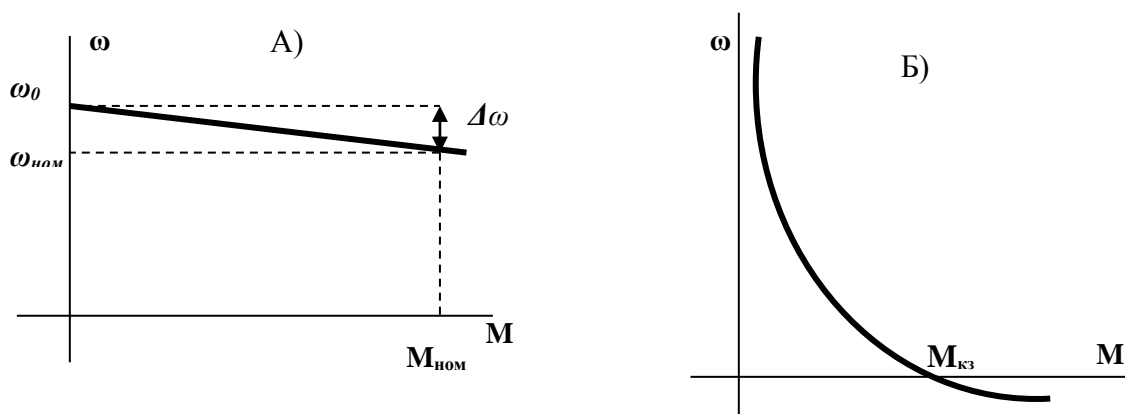


Рис.1.25– Механическая характеристика

А) ДПТ независимого возбуждения Б) ДПТ последовательного возбуждения

1.7.2.2 Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Особенностью ДПТ последовательного возбуждения является, то, что ток якоря равен току нагрузки и равен току обмотки возбуждения.

Следовательно, магнитный поток обмотки возбуждения при небольшом нагрузочном моменте будет пропорционален току нагрузки, а величина электромагнитный момент пропорциональна квадрату тока.

$$\Phi = \kappa_{\phi} I_{\text{я}} \quad (1.44)$$

$$M_{\text{эм}} = \kappa \kappa_{\phi} I_{\text{я}}^2 \quad (1.45)$$

где κ_{ϕ} – коэффициент пропорциональности между током и магнитным потоком.

Уравнение *механической характеристики для двигателя последовательного возбуждения* будет иметь вид:

$$\omega = \frac{U}{\sqrt{\kappa \kappa_{\phi} M}} - \frac{R}{\kappa \kappa_{\phi}} \quad (1.46)$$

Для построения характеристик необходимо проанализировать полученные выражения.

В данной зависимости угловая скорость обратно пропорциональна изменению величины момента.

Графиком механической характеристики (рисунок 1.25, б) является гипербола. Асимптоты характеристики:

при $M \rightarrow 0$, то $\omega \rightarrow \infty$. Ось скорости является вертикальной асимптотой;

при $M \rightarrow \infty$, то $\omega \rightarrow -\frac{R}{\kappa a}$. Прямая линия, с ординатой $\omega = -\frac{R}{\kappa a}$, является горизонтальной асимптотой.

Особенностью ДПТ последовательного возбуждения является то, что он устойчиво работает при любых механических нагрузках и не может работать при нагрузках близких к нулю.

Данный тип двигателя применяется в случаях тяжелых условий пуска и изменении нагрузок в широких пределах.

Это электрический привод для электрической тяги в электротранспорте и в подъемно-транспортных механизмах.

1.7.2.3 Двигатель постоянного тока смешанного возбуждения

Наличие в ДПТ смешанного возбуждения двух обмоток определяет уравнение и вид *механической характеристики*. Данная зависимость выражается формулой:

$$\omega = \frac{U}{k(\Phi_1 \pm \Phi_2)} - \frac{M_{\text{эм}} R_{\text{я}}}{(k(\Phi_1 \pm \Phi_2))^2} \quad (1.47)$$

где Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения;

Знак «+» соответствует согласному включению обмоток. Общий магнитный поток увеличивается, что приводит к уменьшению частоты вращения относительно независимого возбуждения.

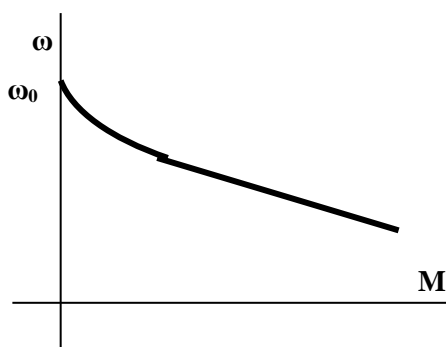


Рис.1.26 – Механическая характеристика ДПТ смешанного возбуждения

Знак «-» соответствует встречному включению обмоток. Общий магнитный поток уменьшается, что приводит к увеличению частоты вращения относительно независимого возбуждения. При этом работа двигателя становится неустойчивой.

Механическая характеристика ДПТ смешанного возбуждения находится в промежутке между характеристикой независимого возбуждения и последовательного.

1.7.3 Рабочие характеристики

Вид рабочих характеристик двигателей, как и механических характеристик зависит от способа включения обмотки возбуждения.

1.7.3.1 Двигатель постоянного тока независимого возбуждения

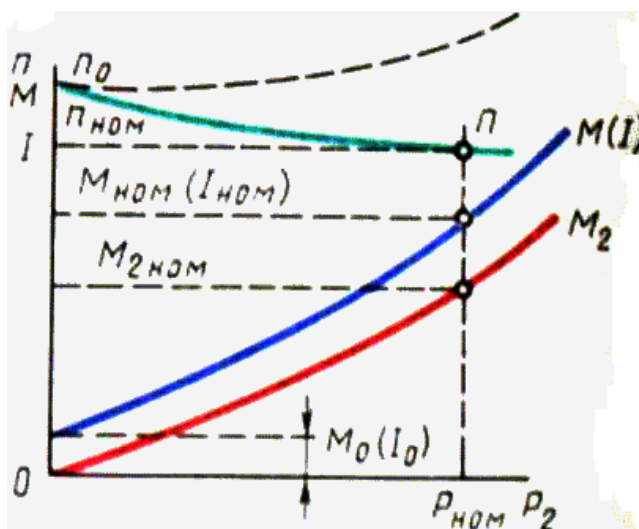


Рис. 1.27 – Рабочие характеристики ДПТНВ

Рабочими характеристиками ДПТНВ называется зависимость частоты вращения (n), тока (I), полезного момента (M_2), вращающего момента ($M_{эм}$) от мощности на валу двигателя (P_2) при условии $U = Const, I_g = Const$.

Скоростной характеристикой называется зависимость частоты вращения от полезной мощности на валу двигателя $n = f(P_2)$.

Эта зависимость определяется выражением:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi}, \quad (1.48)$$

При неизменном напряжении на частоту вращения влияют два фактора:

- падение напряжение в цепи якоря;
- величина магнитного потока.

При увеличении нагрузки уменьшается числитель и вследствие реакции якоря уменьшается и знаменатель. Первый фактор на изменение частоты вращения влияет сильнее, чем второй. Поэтому частота вращения двигателя с ростом нагрузки уменьшается, а график приобретает падающий вид с небольшой выпуклостью.

Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах, называют **номинальным изменением частоты вращения (Δn)**:

$$\Delta n_{\text{ном}} = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_{\text{ном}}} \cdot 100\%, \quad (1.49)$$

где n_0 – частота вращения двигателя в режиме холостого хода, об/мин.

Зависимость полезного момента от нагрузки $M_2 = f(P_2)$ установлена формулой:

$$M_2 = 9,55 \frac{P_2}{n_2}$$

Т.к. с увеличением нагрузки частота вращения снижается поэтому данная зависимость криволинейна.

Величина вращающего момента двигателя определяется зависимостью:

$$M = M_0 + M_2,$$

где M_0 – величина момента холостого хода, Нм.

Т.к. рабочие характеристики строятся при условии, что $I_e = \text{Const}$, то момент холостого хода будет величиной постоянной $M_0 = \text{Const}$. График **зависимости $M = f(P_2)$** проходит параллельно кривой $M_2 = f(P_2)$.

Зависимость тока от полезной мощности $I = f(P_2)$ определяется зависимостью:

$$M = C_m \Phi I$$

Если принять, что величина магнитного потока не изменяется, то график зависимости $I = f(P_2)$ будет совпадать с графиком $M_2 = f(P_2)$.

1.7.3.2 Двигатель постоянного тока последовательного возбуждения

Рабочими характеристиками ДППВ называется зависимость частоты вращения (n) и вращающего момента (M) от тока (I).

Скоростная характеристика $n = f(I)$ определяется выражением:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \kappa_\Phi I_a}, \quad (1.50)$$

Данное выражение показывает, что частота вращения значительно меняется при изменении нагрузки:

- при уменьшении резко возрастет;

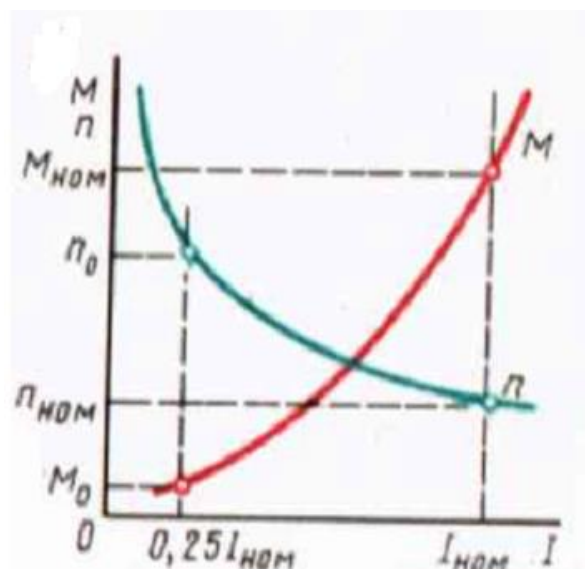


Рис. 1.28 – Рабочие характеристики двигателя последовательного возбуждения

- при нагрузке меньше 25% от номинальной, скорость достигает опасных значений.

В отличие от двигателя независимого возбуждения данная характеристика является мягкой.

Зависимость вращающего момента от тока $M = f(I)$. В двигателях последовательного возбуждения величина магнитного потока зависит от величины тока нагрузки, поэтому зависимость электромагнитного момента от тока определяется выражением:

$$M = C_m \kappa_\phi I_a^2$$

При больших нагрузках наступает насыщение магнитной системы двигателя и величина магнитного потока не меняется и характеристика приобретает прямолинейный характер.

Тестовые задания

Практическая работа 3

Практическая работа 4

2 ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА**Основные понятия**

Активный статический момент	Реостатный способ
Вентильный электропривод	Реверсирование
Генераторный режим работы	Реверсивный управляемый преобразователь
Генераторный режим работы параллельно с сетью	Режим короткого замыкания
Генераторный режим при последовательном соединении с сетью	Режим холостого хода
Граничные режимы работы	Рекуперативное торможение
Двигательный режим работы	Система «генератор - двигатель
Диапазон регулирования скорости	Система «тиристорный преобразователь - двигатель»
Динамического торможения при независимом возбуждении	Стабильность скорости
Динамическое торможение с самовозбуждением	Торможение противовключением
Допустимая нагрузка двигателя	Характер регулирования
Механическое торможение	Экономичность регулирования
Направление регулирования	Электрическое торможение
Нереверсивный преобразователь	Электромеханическая характеристика
Реактивный статический момент	Энергетические режимы работы

2.1 Общие сведения

Электротехническая промышленность выпускает ДПТ основной общепромышленной серии 2П с диапазоном мощности от 0,13 до 200 кВт. Эти двигатели имеют встроенный датчик скорости и ориентированы на питание от тиристорных преобразователей. Усовершенствованная серия 4П с напряжением питания 110 и 220В; скоростью вращения от 750 до 3000 об/мин; номинальным моментом от 2 до 15000 Нм.

Для ЭП металлорежущих станков выпускаются двигатели серии ПБСТ и ПГТ и высоко моментные двигатели ПБВ, ДК1 и ДК2.

Для крановых механизмов серии Д с независимым и последовательным возбуждением.

В электроприводе электрического транспорта и ряда грузоподъемных механизмов нашли широкое применение двигатели постоянного тока последовательного возбуждения (ЭП с ДПТ ПослВ).

Электрический привод с ДПТ НВ (ЭП с ДПТ НВ) является основным видом регулируемого электропривода. Созданные на базе системы «управляемый выпрямитель – двигатель» замкнутые электропривода обеспечивают регулирование координат движения исполнительного органа во всех режимах работы с высокими показателями качества.

2.2 Статические характеристики и энергетические режимы работы ЭП с ДПТ

2.2.1 Электропривод с ДПТ независимого (параллельного возбуждения)

Основные свойства электропривода определяются свойствами применяемого в нем двигателя.

По своим регулировочным свойствам ДПТ с НВ и ДПТ с ПВ одинаковы, т.к. обмотка якоря и обмотка возбуждения располагаются параллельно относительно друг друга.

Схемы включения и основные свойства этих двигателей приведены в таблице 3. (см. пункт 1.7.1)

Основными координатами ЭП являются: скорость, ток, момент и положение.

При анализе работы электропривода используется механическая и электромеханическая характеристика.

При оценке регулировочных возможностей электропривода используется механическая характеристика ($\omega = f(M)$).

Уравнение и график механической характеристики рассмотрены в пункте 1.7.2.1.

При оценке пусковых свойств электропривода – электромеханическая характеристика.

Электромеханической характеристикой $\omega = f(I)$ называется зависимость скорости двигателя от величины тока, протекающего по обмотке якоря.

При выводе данной зависимости используется уравнения напряжения (формула 1.2) и уравнение ЭДС (формула 1.19) и принимаются следующие допущения:

- реакция якоря не учитывается;
- момент на валу двигателя равен электромагнитному моменту.

Уравнение электромеханической характеристики определяется зависимостью:

$$\omega = \frac{U - IR}{k\Phi} \quad (2.1)$$

В электроприводе с ДПТ график механической и электромеханической характеристики совпадает, при условии, что $k\Phi = Const$.

Графиком является наклонная прямая линия пересекающая ось скорости. Наклон характеристики зависит от величины нагрузки.

Таблица 4 – Координаты основных точек механической и электромеханической характеристики ЭП с ДПТ НВ

Характерная точка	Координаты характеристики			
	Механическая		Электромеханическая	
	Момент, M	Угловая скорость, ω	Ток, I	Угловая скорость, ω
Холостого хода	$M = 0$	$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$	$I = 0$	$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}$
Номинального режима	$M = M_{ном}$	$\omega = \omega_{ном}$	$I = I_{ном}$	$\omega = \omega_{ном}$
Пуска (короткого замыкания)	$M_n = \frac{U \cdot k\Phi}{R_{оя}}$	$\omega = 0$	$I_n = \frac{U}{R_{оя}}$	$\omega = 0$
Изменение угловой скорости		$\Delta\omega = \frac{MR}{(k\Phi)^2}$		$\Delta\omega = \frac{IR}{k\Phi}$

Энергетические режимы работы ЭП с ДПТ НВ

Машина постоянного тока может работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. Переход из одного режима в другой возможен без изменения схемы включения.

При работе двигателя в генераторном режиме на валу электрической машины создается тормозной момент, обеспечивающий интенсивное принудительное торможение движения ЭП.

Энергетические режимы работы определяются из взаимных направлений двух переменных:

- электрических: ЭДС и тока;
- механических: момента и угловой скорости.

Двигательный режим работы возникает при одинаковых направлениях угловой скорости и момента и разных направлениях тока и ЭДС.

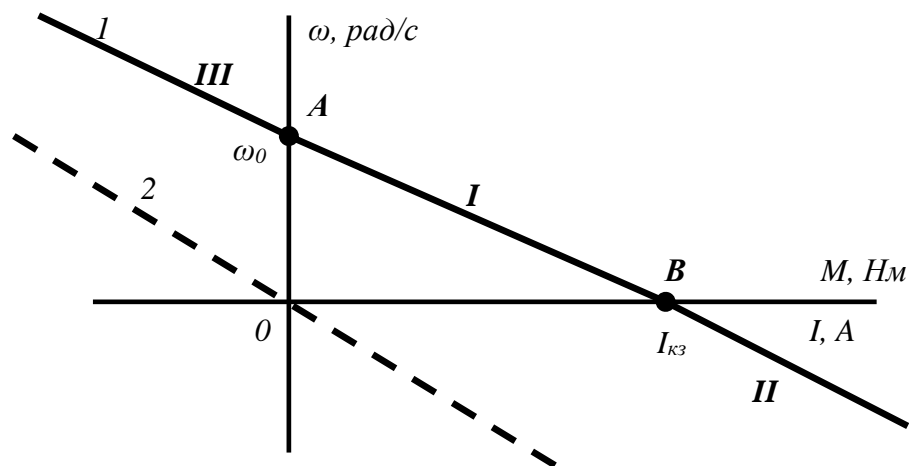
Генераторный режим работы – при противоположных направлениях угловой скорости и момента и одинаковых направлениях ЭДС и тока.

Граничные режимы работы – это режимы при которых одна электрическая и одна механическая переменные равны нулю.

К таким режимам относятся режим холостого хода и короткого замыкания (пуска).

Вид механической (электромеханической) характеристики для различных режимов работы приведён на рисунке 2.1.

Характеристика основных энергетических режимов представлена в таблице 5.



$$1 - M = f(\omega) \text{ при } U = U_{ном} \quad 2 - M = f(\omega) \text{ при } U = 0$$

Рис. 2.1 – Механическая (электромеханическая) характеристика

Таблица 5 – Характеристики основных энергетических режимов ЭП с ДПТ НВ

Энергетический режим	Схема	Параметры	Участок характеристики (рисунок 2.1)
<p>Режим холостого хода</p> <p>Двигатель получает энергию из электрической сети и работает без нагрузки</p>		$I = 0,$ $E = U = k\omega_0\Phi,$ $M = 0,$ $\omega = \omega_0$	точка A
<p>Двигательный режим</p> <p>Электрическая энергия поступает из сети. Механическая энергия передаётся исполнительному органу</p>		$E < U,$ $I = \frac{U - E}{R_{оя}} \quad E \uparrow, I \downarrow$ $M = \kappa\Phi I \quad M \uparrow \omega \uparrow$ $0 < \omega < \omega_0$	участок I
<p>Режим короткого замыкания</p> <p>Якорь неподвижен при подданном напряжении Электрическая энергия рассеивается в виде тепла в якорной цепи</p>		$\omega = 0,$ $E = 0,$ $I = I_{кз} = \frac{U}{R}$ $M = \kappa\Phi I_{кз}$	точка B
<p>Генераторный режим при последовательном соединении с сетью (Торможение противовключением)</p> <p>Электрическая энергия, поступающая из сети и вырабатываемая самим двигателем за счёт механической энергии рабочей машины, рассеивается в виде тепла в резисторах цепи якоря.</p>		$\omega < 0$ $M > M_{кз}$ $M \uparrow \omega \downarrow$ $I = \frac{U + E}{R}$ $E \downarrow I \downarrow$	участок II
<p>Генераторный режим работы параллельно с сетью (Рекуперативное торможение)</p> <p>Двигатель получает механическую энергию от рабочей машины и отдает ее в виде электрической энергии в сеть.</p>		$\omega > \omega_0 \quad M < 0$ $M \downarrow \omega \uparrow$ $E > U$ $E \uparrow I \uparrow$	участок III
<p>Режим автономного генератора (Режим динамического торможения)</p> <p>Электрическая энергия, вырабатываемая за счет поступающей с вала механической энергии рабочей машины, и рассеивается в виде тепла в резисторах якорной цепи.</p>		<p>Возникает при включении двигателя на автономную нагрузку.</p> $U = 0,$ $I = \frac{-E}{R}$	Характеристика 2

2.2.2 Электропривод с ДПТ последовательного возбуждения

Схемы включения и основные свойства двигателя приведены в таблице 3. (см. пункт 1.7.1)

Особенностью ЭП с ДПТ ПослВ является то, что при небольших токах и моментах скорость двигателя принимает большие значения.

ЭП с ДПТ ПослВ нельзя разгружать до значения $M = 0$, т.к. в этом случае двигатель пойдет «вразнос», т.е. скорость начнет расти неограниченно.

С увеличением тока нагрузки скорость двигателя значительно уменьшается – характеристики мягкие.

Жесткость механической характеристики ДПТ ПослВ переменна и возрастает с увеличением нагрузки.

Это обстоятельство широко используется при применении двигателей на транспортных электроприводах, когда при движении транспортного средства с увеличенной нагрузкой момент двигателя значительно возрастает. Ток и мощность при этом увеличивается в меньшей степени.

Энергетические режимы работы ЭП с ДПТ ПослВ

Для ЭП с ДПТ ПослВ включённого по основной схеме не существует энергетических режимов: *режима холостого хода* и *режим генератора, работающего параллельно с сетью* (режима рекуперативного торможения), т.к. механические характеристики не проходят во втором квадранте.

Это объясняется следующим:

при $I \rightarrow 0$, $M \rightarrow 0$, то $\Phi \rightarrow 0$ и $E \rightarrow U$, т.е. при любой скорости $E < U$ и отдачи энергии в сеть происходить не может.

Остальные режимы работы ЭП с ДПТ ПослВ аналогичны режимам работы ЭП с ДПТ НВ:

- *двигательный режим* при $0 < \omega < \infty$;
- *режим короткого замыкания* при $\omega = 0$;
- *генератора, включенного последовательно с сетью* (режим торможения противовключения) при $\omega < 0$;
- *режим динамического торможения* (генераторный режим независимо от сети постоянного тока).

Тестовые задания

2.3 Способы регулирования скорости в ЭП с ДПТ

Регулировочные свойства ЭП с любым типом двигателя определяются из уравнения механической характеристики.

Для количественной оценки способа регулирования скорости используются шесть основных показателей.

Показатели количественной оценки способов регулирования скорости.

1. **Диапазон регулирования скорости**, отношение максимальной угловой скорости к минимальной возможной при данном способе регулирования.

$$D = \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} \quad (2.2)$$

Диапазон регулирования при заданном моменте нагрузки определяется отношением номинальной скорости двигателя к скорости на его искусственной характеристике:

$$D = w_{\text{ном}} / w_{\text{и}} \quad (2.3)$$

2. **Стабильность скорости**, характеризуется изменением скорости при возможных колебаниях нагрузки на валу двигателя.

Определяется изменением жесткости искусственных механических характеристик.

3. **Характер регулирования** – это перепад скорости при переходе с одной искусственной характеристики на другую.

Характер регулирования делится на три вида: скачкообразное, ступенчатое и плавное.

Чем больше в заданном диапазоне регулирования скорости может быть получено искусственных характеристик, тем плавнее происходит регулирование скорости.

4. **Направление регулирования**, показывает, как происходит регулирование относительно номинальной скорости.

5. **Допустимая нагрузка двигателя** – это нагрузка, при которой, работая на искусственной характеристике, ток двигателя, не превышает номинального.

Двигатель проектируется на номинальную нагрузку, при которой он не нагревается выше заданной температуры.

Поэтому для сохранения нормативного нагрева при работе на искусственных характеристиках, нагрузка должна быть такой, при которой ток, протекающий по обмотке якоря не превышал номинального.

6. **Экономичность регулирования.**

Для оценки экономичности способа регулирования используются различные технико-экономические показатели:

- капитальные затраты;
- эксплуатационные расходы;
- срок окупаемости;
- надёжность, удобство и простота в эксплуатации.

Из уравнения механической характеристики ДПТ следует, что скорость можно регулировать тремя основными способами:

- изменением сопротивления в цепи обмотки якоря;
- изменением величины питающего напряжения;
- изменением величины магнитного потока.

Анализ данных способов регулирования будет строиться на основе количественных показателей.

Одновременно необходимо обратить внимание на то, как изменяются основные величины, входящие в уравнение механической характеристики.

2.3.1 Регулирование изменением сопротивления в цепи обмотки якоря

Данный способ регулирования координат называют *реостатным*.

Он является простым по своей реализации и широко используется для регулирования скорости, тока и момента.

Данный способ реализуется путём последовательного включения в цепь обмотки якоря регулировочного реостата и широко используется для ограничения тока обмотки якоря при пуске двигателя.

Подключение к напряжению питающей сети:

- обмотки якоря, обмотки параллельного (рисунок 2.2, а, в) и последовательного (рисунок 2.3) возбуждения осуществляется линейными контакторами $KM1$ и $KM2$;
- обмотки независимого возбуждения контактор $KM6$ (рисунок 2.2, б);
- обмотка независимого возбуждения может подключаться к питающему напряжению с помощью выключателя Q (рисунок 2.2, а).

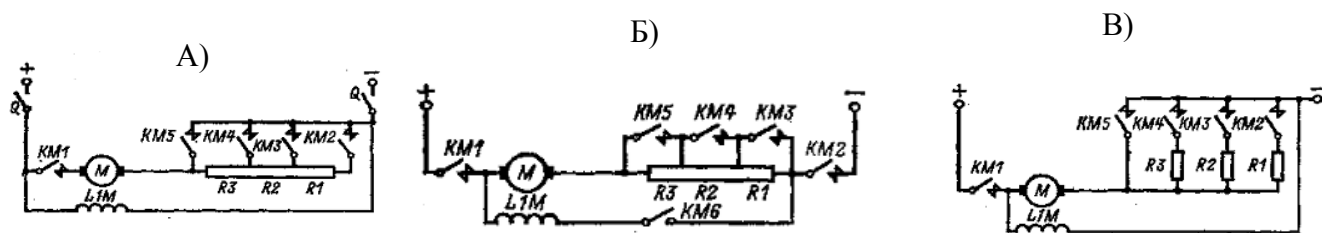


Рис.2.2 – Схемы включения пускового реостата в ДПТ НВ (ПВ)

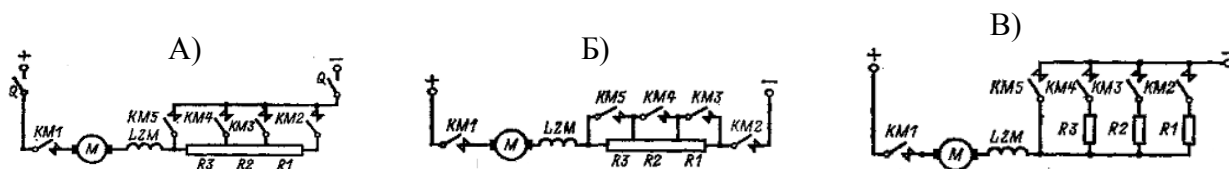


Рис. 2.3 – Схемы включения пусковых реостатов в ДПТ ПослВ

Выведение ступеней пускового резистора осуществляется замыканием контактов контакторов ускорения $KM3$, $KM4$ и $KM5$ при трёх ступенях пускового резистора ($R1$, $R2$ и $R3$).

Схема (рисунок 2.2, б и 2.3, б) используется для ДПТ мощностью до 150кВт при напряжении до 220В. В схеме используются все контакторы одинаковой величины, так как при выведенном пусковом резисторе все их контакты пропускают ток якоря.

Схема (рисунок 2.2, а и 2.3, а) используется для ДПТ мощностью до 300кВт, напряжением до 220В, работающих в продолжительном режиме, когда контакты контакторов $KM2$, $KM3$ и $KM4$, пропускающие только пусковые токи, выбираются с меньшей коммутационной способности.

Схема (рисунок 2.2, в и 2.3, в) используется для ДПТ большой мощности. Она позволяет применить контакторы $KM2$, $KM3$ и $KM4$ меньшей величины независимо от режима работы ДПТ.

Недостатком данных схем является возможность возникновения аварийного режима при приваривании контакта контактора $KM5$. Для предотвращения этого в схеме управления используется блокировка, запрещающая пуск, если хотя бы один контактор ускорения после отключения остался закрытым.

Максимальное сопротивление пускового реостата подбирается так, чтобы пусковой ток был равен для двигателей:

- большой и средней мощности $I_n = (1,4 \div 1,8)I_{ном}$;
- малой мощности $I_n = (2 \div 2,5)I_{ном}$.

Процесс реостатного пуска осуществляется следующим образом:

- в начальный период пуска сопротивления R_n пускового реостата соответствует максимальному значению. Двигатель развивает максимальный пусковой момент M_{nmax} ;
- по мере разгона момент двигателя уменьшается, так как с увеличением частоты вращения возрастает ЭДС и уменьшается ток якоря;
- при достижении некоторого значения M_{nmin} часть сопротивления пускового реостата выводится, вследствие чего момент снова возрастает до M_{nmax} .

Уменьшая постепенно сопротивление пускового реостата, осуществляют разгон двигателя по отдельным отрезкам реостатных характеристик.

Для определения показателей регулирования необходимо провести анализ уравнения механической характеристики двигателя.

Таблица 6 – Координаты основных точек механической характеристики при изменении сопротивления в цепи обмотки якоря

Характерные точки	Значение
Скорость холостого хода	$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \rightarrow R_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow \omega_0 = \text{Const}$
Момент пуска (короткого замыкания)	$M_n = \frac{U \cdot k\Phi}{R_{\text{я}}} \rightarrow R_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow M_n \downarrow$

Изменение угловой скорости

$$\Delta\omega = \frac{MR_{\text{я}}}{(k\Phi)^2} \rightarrow R_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow \Delta\omega \uparrow$$

Для определения расположения искусственных механических характеристик относительно естественной воспользуемся формулой 2.1, найдём отношение скорости на естественной к скорости на искусственной характеристике, при условии, что ток (момент) и магнитный поток имеют фиксированное значение.

$$\omega_e = \frac{U - IR_{\text{я}}}{k\Phi} \quad \omega_u = \frac{U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{д}})}{k\Phi} \rightarrow \omega_u = \omega_e \frac{U - I(R_{\text{е}} + R_{\text{у}})}{U - IR_{\text{е}}} \quad (2.4)$$

$$(R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \uparrow \Rightarrow I \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}) \uparrow \Rightarrow (U - I \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}})) \downarrow \Rightarrow \omega_u \downarrow \quad (2.5)$$

Полученное выражение позволяет определить расположение искусственных характеристик относительно естественной характеристики. Искусственные характеристики располагаются ниже естественной.

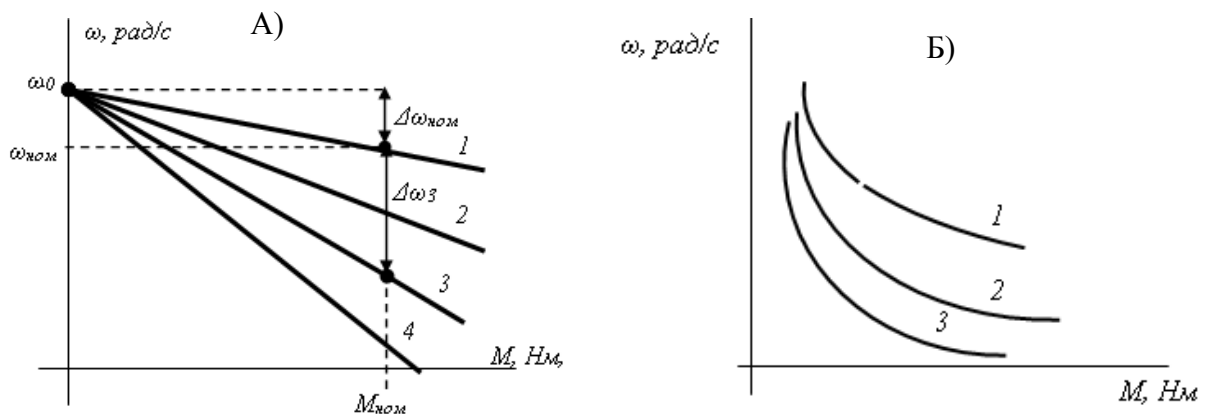
Искусственные характеристики, при введении в цепь обмотки якоря добавочного резистора, будут располагаться ниже естественной характеристики.

Чем больше величина добавочного сопротивления, тем больше будет снижаться скорость двигателя.

Для двигателей с последовательным возбуждением все искусственные характеристики имеют своей вертикальной асимптотой ось скорости, т.к. при $I \rightarrow 0$ ($M \rightarrow 0$) $\rightarrow I_{\text{с}} \rightarrow 0$ $\Phi \rightarrow 0 \rightarrow \omega \rightarrow \infty$.

Вид механических характеристик представлен на рисунке 2.4.

Количество ступеней пускового реостата зависит от жёсткости естественной характеристики и требований, предъявляемых к плавности пуска (допустимой разности $M_{n\text{max}} - M_{n\text{min}}$).



$$1 - R_{\text{доб}} = 0; \quad 2 - 0 < R_{\text{доб}2} < R_{\text{доб}3} \quad 3 - R_{\text{доб}2} < R_{\text{доб}3} < R_{\text{доб}4} \quad 4 - R_{\text{доб}3} < R_{\text{доб}4}$$

Рис. 2.4 – Механические характеристики при изменении сопротивления в цепи обмотки якоря
А) в ЭП с ДПТ НВ (ПВ); Б) в ЭП с ДПТ ПослВ

Показатели регулирования.

1. Диапазон регулирования скорости небольшой, так как снижается жёсткость характеристики по мере увеличения добавочного сопротивления.
2. Стабильность скорости снижается по мере увеличения диапазона регулирования, так как снижается жёсткость регулировочной характеристики.
3. Данный способ обеспечивает ступенчатое регулирование скорости.
4. Направления регулирования скорости – вниз от номинальной скорости.
5. Допустимая нагрузка на искусственной характеристике определяется предельно допустимым моментом, который может развивать двигатель, не перегреваясь выше нормы.

При условии, что $k\Phi = Const$, то $M_{дон} = kI_{ном} \Phi_{ном} = M_{ном}$

Двигатель может работать на любой регулировочной характеристике с моментом нагрузки, равным номинальному.

6. Экономичность регулирования скорости оценивается капитальными затратами на реализацию данного способа и стоимостью потерь мощности при регулировании.

Капитальные затраты на приобретения добавочных резисторов небольшие.

Потери мощности в цепи якоря определяются по формуле:

$$\Delta P_{я} = UI - M\omega = k\omega_0 I\Phi - k\omega I\Phi = kI\omega_0 \Phi \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = P_1 \delta \quad (2.6)$$

где $\delta = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ - относительный перепад скорости.

$$\omega \downarrow \Rightarrow \delta \uparrow \Rightarrow \Delta P_{я} \uparrow \quad \Delta P_{я} \uparrow \Rightarrow \sum \Delta P \uparrow \Rightarrow \eta \downarrow \quad (2.7)$$

Потери мощности и непроизводительный расход электрической энергии оказываются существенными.

Данный способ используется при небольших диапазонах регулирования или кратковременной работе двигателя на пониженных скоростях.

Практическая работа 6

2.3.2 Регулирование скорости изменением величины питающего напряжения

Этот способ является основным при создании регулируемого электропривода с двигателем постоянного тока и широко используется для регулирования любых координат электропривода.

Реализуется данный способ путём питания двигателя от преобразователя, выходное напряжение которого регулируется по значению. В качестве преобразователя используется управляемый выпрямитель (УВ), который характеризуется:

- ЭДС преобразователя E_n ;

- коэффициентом усиления преобразователя $k_n = \frac{E_n}{U_y}$;

- внутренним сопротивлением преобразователя R_n .

Напряжение на выходе преобразователя вследствие наличия внутреннего сопротивления определяется по формуле:

$$U = E_n - IR_n \quad (2.8)$$

Уравнения электромеханической и механической характеристики при включении в цепь питания обмотки якоря управляемого выпрямителя будут иметь вид:

$$\omega = \frac{E_n}{k\Phi} - \frac{M(R_{\text{я}} + R_n)}{(k\Phi)^2} \quad \omega = \frac{E_n - I(R_{\text{я}} + R_n)}{k\Phi} \quad (2.9)$$

Подводимое напряжение на якоре двигателя изменяют в пределах от нуля до номинального значения.

Таблица 7 – Координаты основных точек механической характеристики при изменении величины питающего напряжения

Характерные точки	Значение
Скорость холостого хода	$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \rightarrow U \downarrow \Rightarrow \omega_0 \downarrow$
Момент пуска (короткого замыкания)	$M_n = \frac{U \cdot k\Phi}{R_{\text{я}}} \rightarrow U \downarrow \Rightarrow M_n \downarrow$
Изменение угловой скорости	$\Delta\omega = \frac{MR_{\text{я}}}{(k\Phi)^2} \rightarrow \begin{matrix} U \downarrow \Rightarrow \Delta\omega - Const \\ R_{\text{я}} \uparrow \Rightarrow \Delta\omega \end{matrix} \Delta\omega_{\text{н.м.}}$

$$\begin{aligned} & E_n \rangle U_{\text{н.м.}} \\ & (R_{\text{я}} + R_n) \uparrow \Rightarrow I \cdot (R_{\text{я}} + R_n) \uparrow \Rightarrow (E_n - I \cdot (R_{\text{я}} + R_n)) \downarrow \Rightarrow \omega_{\text{н.м.}} \downarrow \end{aligned} \quad (2.10)$$

Согласно формулы 2.10 искусственные характеристики, при изменении величины питающего напряжения, будут располагаться ниже естественной характеристики.

Для двигателей с последовательным возбуждением все искусственные характеристики имеют своей вертикальной асимптотой ось скорости, т.к. при $I \rightarrow 0$ ($M \rightarrow 0$) $\rightarrow I_{\text{с}} \rightarrow 0$ $\Phi \rightarrow 0 \rightarrow \omega \rightarrow \infty$.

Данный способ регулирования скорости, в зависимости от используемого управляемого выпрямителя, позволяет реализовать все энергетические режимы работы двигателя.

Показатели регулирования.

1. Диапазон регулирования скорости значительный до 10 и более, т.к. жёсткость регулировочных характеристик остаётся постоянной.
2. Стабильность скорости остаётся величиной постоянной независимо от величины питающего напряжения.
3. Данный способ обеспечивает плавное регулирование скорости.
4. Направление регулирования – вниз от естественной характеристики.

5. При данном способе регулирования величина магнитного потока не изменяется, поэтому двигатель может работать на любой регулировочной характеристики с моментом нагрузки, равным номинальному моменту.

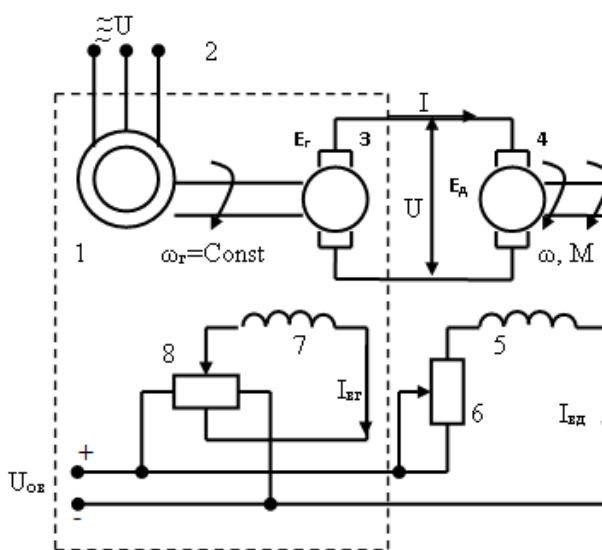
6. Экономичность при данном способе регулирования зависит от типа преобразователя, который используется для изменения величины питающего напряжения.

2.3.2.1 Основные типы управляемых выпрямителей

Управляемый выпрямитель выполняется двух видов:

- электромашинный преобразователь типа системы «генератор - двигатель»;
- статический преобразователь типа системы «тиристорный преобразователь - двигатель».

Система «генератор - двигатель» (рисунок 2.5).



- 1 – Приводной двигатель; 2 – Электромашинный выпрямитель; 3 – Якорь ГПТ;
 4 – Якорь ДПТ; 5 – Цепь обмотки возбуждения двигателя; 8 – Потенциометр;
 6 – Регулировочный резистор; 7 – Цепь обмотки возбуждения генератора

Рис.2.5 – Система «генератор – двигатель»

Электромашинный выпрямитель трёхфазного переменного тока в постоянный представляет собой асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и якорь генератора постоянного тока, который непосредственно присоединяется к якорю двигателя постоянного тока.

Якорь генератора вращается с постоянной скоростью.

Изменение с помощью потенциометра тока возбуждения генератора приводит к изменению ЭДС генератора и соответственно изменяется величина напряжения на входе якоря двигателя.

Система «генератор – двигатель» обеспечивает двузонное регулирование скорости при использовании ДПТ НВ (ПВ):

- первая зона получение скорости ниже номинальной при регулировании величины питающего напряжения;

- вторая зона получения скорости выше номинальной при регулировании величины магнитный поток за счёт включения в цепь обмотки возбуждения регулирующего резистора.

Механические характеристики в системе «генератор – двигатель» представле-

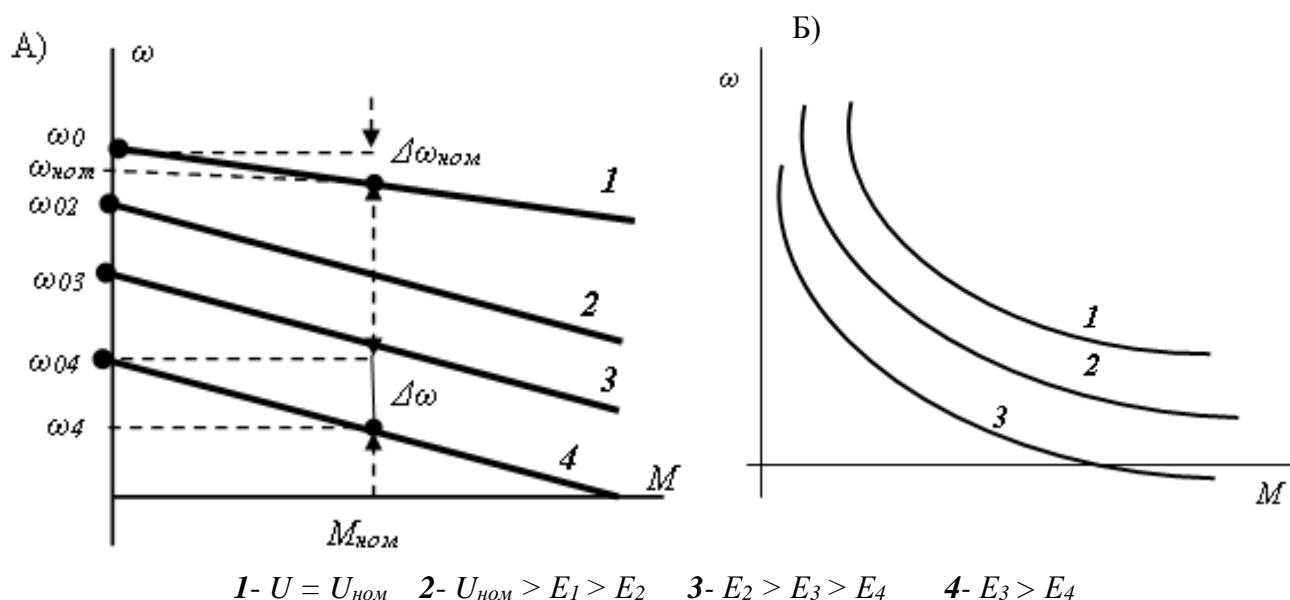


Рис. 2.6 – Механические характеристики при изменении величины питающего напряжения

а) ЭП с ДПТ НВ (ПВ); б) ЭП с ДПТ ПослВ

ны на рисунке 2.6.

Достоинства системы.

1. Большой диапазон и плавность регулирования скорости.
2. Высокая жёсткость и линейность характеристик.
3. Возможность получения всех энергетических режимов работы, в том числе рекуперативного торможения.

Недостатки системы.

1. Осуществляется трёхкратное преобразование энергии, которое сопровождается потерями энергии.
2. Низкий КПД системы.
3. Инерционность процесса регулирования скорости.
4. Шум при работе системы.

Система «тиристорный преобразователь - двигатель»

Основным типом преобразователей, применяемых в настоящее время в регулируемом электроприводе постоянного тока, являются полупроводниковые статические преобразователи.

Вентильный электропривод – это электропривод, в котором преобразовательным устройством является управляемый статический преобразователь.

Величина напряжения на якоре двигателя регулируется за счет изменения угла открывания тиристоров.

Тиристорные преобразователи делятся на два вида: нереверсивные и реверсивные.

Схемы включения тиристорных преобразователей приведены на рисунке 2.7.

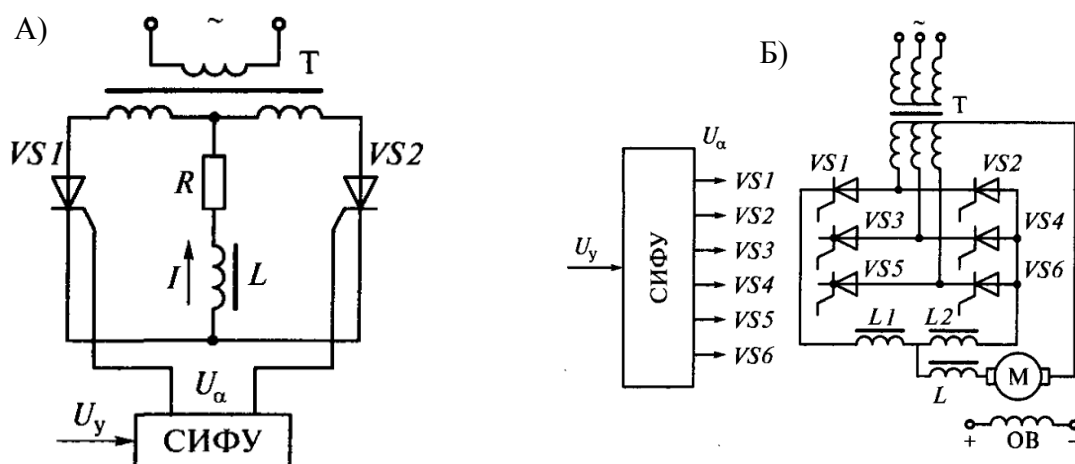


Рис. 2.7 – Система «тиристорный преобразователь - двигатель»

а) нереверсивный преобразователь; б) реверсивный преобразователь

Нереверсивный преобразователь (рисунок 2.7, а) состоит из:

- согласующий трансформатор (T), имеющий две вторичные обмотки;
- два тиристора ($VS1, VS2$);
- сглаживающий реактор с индуктивностью L , который служит для уменьшения вредного влияния пульсации тока в цепь якоря;
- систему импульсно-фазового управления $СИФУ$.

Обмотка возбуждения двигателя питается от отдельного источника.

Регулирование величины напряжения на двигателе осуществляется за счёт изменения ЭДС преобразователя, которая определяется по формуле

$$E_{cp} = E_{cp0} \cos \alpha \quad (2.11)$$

где E_{cp0} – ЭДС преобразователя при $\alpha = 0$;

α – угол открывания тиристора, который задаётся с помощью системы импульсно-фазового управления

Если угол $\alpha = 0$, то преобразователь осуществляет двухполупериодная выпрямление и на якорь двигателя подаётся полное напряжение питания.

Если угол $\alpha \neq 0$, то ЭДС преобразователя снижается и уменьшается величина подводимого к двигателю напряжения.

Уравнение механической и электромеханической характеристики ДПТ НВ будет определяться по формулам:

$$\omega = \frac{E_{cp0} \cos \alpha}{k\Phi} - \frac{M(R_{\Sigma} + R_n)}{(k\Phi)^2} \quad \omega = \frac{E_{cp0} \cos \alpha - I(R_{\Sigma} + R_n)}{k\Phi} \quad (2.12)$$

где $R_{\Sigma} = \frac{x_T m}{2\pi} + R_T + R_L$ - эквивалентное сопротивление преобразователя;

x_T и R_T - индуктивное и активное сопротивление трансформатора;

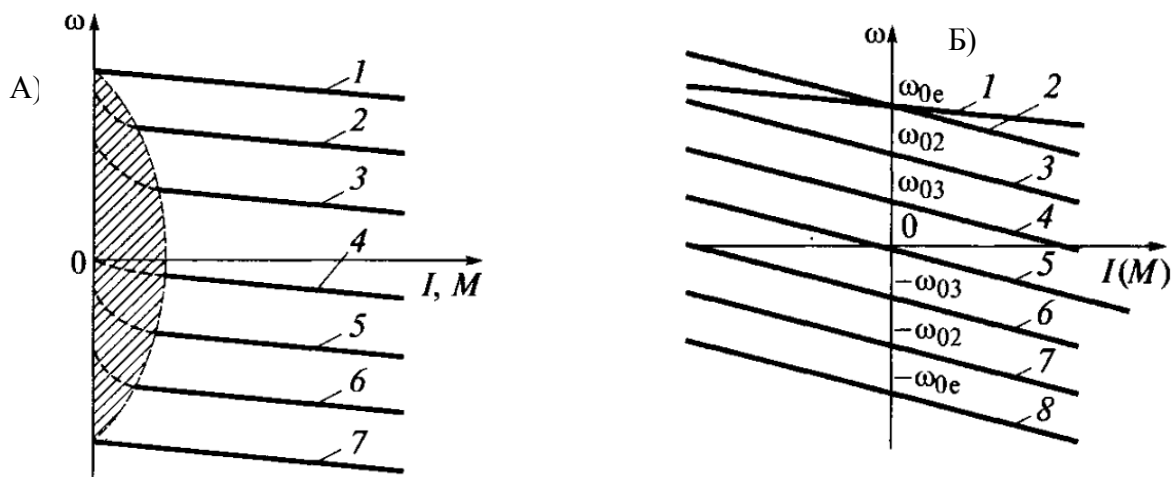
R_L - активное сопротивление сглаживающего реактора.

Особенностью механических характеристик (рисунок 2.8, а) двигателя при использовании нереверсивного преобразователя является:

- наличие области, где характеристики нелинейные. В этой области двигатель работает в режиме прерывистого тока и снижается жёсткость характеристик;
- характеристики располагаются в 1 и 4 квадранте из-за односторонней проводимости преобразователя.

Меньшим углам управления соответствует большая ЭДС и более высокая скорость двигателя.

При $\alpha = 90^\circ$ ЭДС преобразователя равно нулю двигатель работает в режиме динамического торможения.



1 - $\alpha = 0^\circ$; 2 - $\alpha = 30^\circ$; 3 - $\alpha = 60^\circ$; 4 - $\alpha = 90^\circ$; 5 - $\alpha = 120^\circ$; 6 - $\alpha = 150^\circ$; 7 - $\alpha = 180^\circ$

Рис.2.8 – Механические характеристики в системе ТП – Д

А) нереверсивный преобразователь; Б) реверсивный преобразователь

Реверсивный управляемый преобразователь строится по трёхфазной мостовой схеме (рисунок 2.7, б) состоит из двух нереверсивных выпрямителей.

Тиристоры VS1, VS3, VS5 обеспечивают вращение двигателя в одном направлении, а тиристоры VS2, VS4, VS6 – в другом.

Использование данной схемы позволяет:

- уменьшить пульсации тока в цепи якоря;
- получить линейные искусственные характеристики;
- реализовать режим реверса двигателя и рекуперативное торможение.

Механические характеристики двигателя при использовании реверсивного преобразователя представлены на рисунке 2.8, б.

Достоинства системы.

1. Плавность и значительный диапазон регулирования скорости.
2. Высокая жёсткость искусственных характеристик.
3. Высокий КПД электропривода, определяемый высоким КПД трансформатора (0,93...0,98) и тиристорного преобразователя (0,9...0,92).
4. Бесшумность в работе.

Недостатки системы.

1. Преобразователь имеет одностороннюю проводимость.
2. Для получения характеристик во всех четырёх квадрантах необходимо использования реверсивный двухкомплектный преобразователь.
3. Напряжение на якоре и ток имеют пульсирующий характер, что ухудшает условия работы двигателя.
4. Для сглаживания пульсаций тока применяются реакторы.
5. Работа тиристорного преобразователя характеризуется режимом прерывистого тока, при котором резко падает жёсткость характеристик.
6. С ростом диапазона регулирования снижается коэффициент мощности системы.
7. Тиристорные преобразователи обладают невысокой помехозащищённостью и малой перегрузочной способностью.

Система «тиристорный преобразователь - двигатель» является высокоэффективным регулируемым ЭП постоянного тока.

2.3.3 Регулирование скорости изменением величины магнитного потока

2.3.3.1 Регулирование скорости изменением величины магнитного потока в ЭП с ДПТ НВ

Этот способ используется преимущественно для регулирования скорости и находит широкое применение из-за простоты его реализации и экономичности, т.к. осуществляется в относительно маломощной цепи возбуждения двигателя и не сопровождается потерями мощности.

Т.к. магнитная система машины является насыщенной, то увеличение магнитного потока не даёт существенных изменений скорости.

Поэтому на практике для регулирования скорости величину магнитного потока уменьшают относительно номинального значения за счёт снижения тока возбуждения.

Для реализации данного способа в цепь обмотки возбуждения включается:

- регулировочный реостат (рисунок 2.9, а);

- управляемый выпрямитель (рисунок 2.9, б), который используется для регулирования тока возбуждения в двигателях большой мощности, работающих в замкнутых электроприводах.

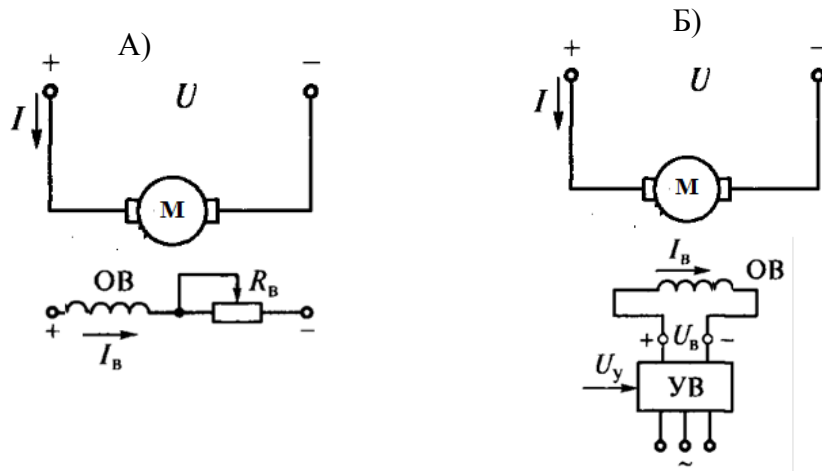


Рис. 2.9 – Схемы для реализации способа регулирования величины магнитного потока в ЭП с ДПТ НВ

А) с помощью регулировочного резистора; Б) с помощью управляемого выпрямителя

Таблица 8 – Координаты основных точек механической и электромеханической характеристики при изменении величины магнитного потока

Характерные точки	Значение
Скорость холостого хода	$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi} \rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow \omega_0 \uparrow$
Момент пуска (короткого замыкания)	$M_n = \frac{U \cdot k\Phi}{R_{\text{я}}} \rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow M_n \downarrow$
Ток короткого замыкания	$I_{\text{кз}} = \frac{U}{R_{\text{я}}} \rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow I_{\text{кз}} - \text{Const}$
Изменение угловой скорости	$\Delta\omega = \frac{MR_{\text{я}}}{(k\Phi)^2} \rightarrow \Phi \downarrow \Rightarrow \Delta\omega \uparrow$

При данном способе регулирования графики механических и электромеханических характеристик не совпадают.

Т.к. величина тока короткого замыкания не изменяется, то электромеханические характеристики при изменении величины магнитного потока будут пересекаться в этой точке.

Механические характеристики пересекаются в точке, соответствующей значению момента короткого замыкания в номинальном режиме.

$$\omega_e = \frac{U - IR_{\text{я}}}{k\Phi} \quad \omega_u = \frac{U - IR_{\text{я}}}{k\Phi_1} \rightarrow \omega_u = \omega_e \frac{k\Phi}{k\Phi_1} \quad (2.13)$$

$$\kappa\Phi > \kappa\Phi_1 \Rightarrow \frac{\kappa\Phi}{\kappa\Phi_1} \uparrow \Rightarrow \omega_u \uparrow \quad (2.14)$$

Согласно формулы 2.13 и 2.14 искусственные характеристики, при изменении величины магнитного потока, будут располагаться выше естественной характеристики.

Графики регулировочных характеристик для ЭП с ДПТ НВ(ПВ) приведены на рисунке 2.10.

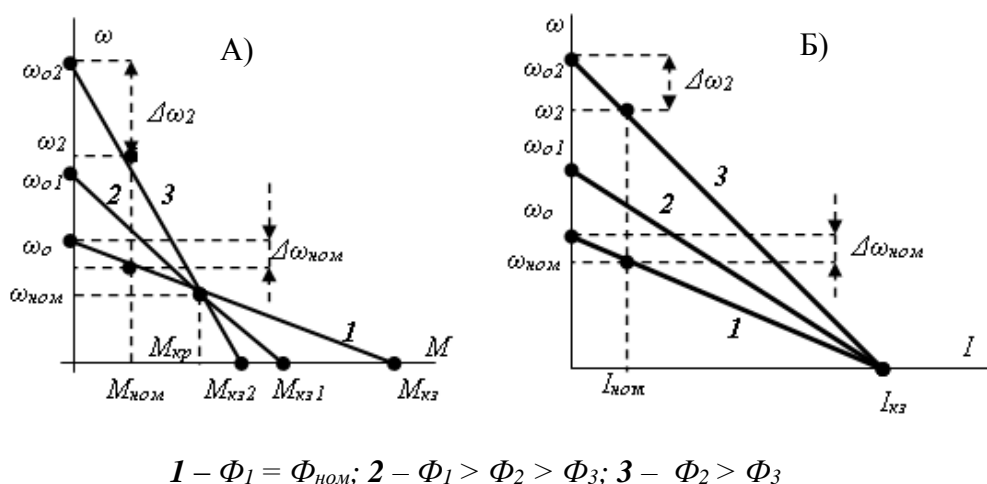


Рис. 2.10 – Регулировочные характеристики при изменении величины магнитного потока в ЭП с ДПТ НВ
А) Механические характеристики; Б) Электромеханические характеристики

2.3.3.2 Регулирование скорости изменением величины магнитного потока в ЭП с ДПТ ПослВ

Р

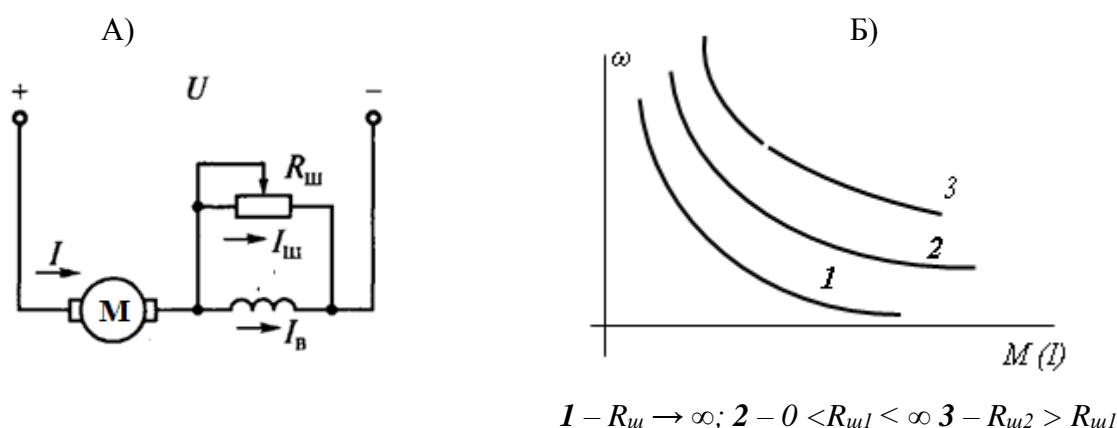


Рис. 2.11 – Регулирование скорости при изменении величины магнитного потока в ЭП с ДПТ ПослВ
А) Схема включения двигателя Б) Регулировочные характеристики

Регулирование скорости изменением магнитного потока в ДПТ ПослВ осуществляется с помощью переменного резистора, включённого параллельно обмотке возбуждения (рисунок 2.11, а).

Регулирование величины магнитного потока для этого типа двигателей не является полностью независимым, т.к. величина магнитного потока пропорциональна току якоря, который определяется нагрузкой электропривода (см. формулу 1.44).

График регулировочной характеристики зависит от значения сопротивления шунта (рисунок 2.11, б)

При $R_{ш} \rightarrow \infty$ (разрыв шунтирующей цепи), двигатель включён по основной схеме, чему соответствует естественная характеристика.

При $0 < R_{ш} < \infty$ часть тока якоря поступает в шунтирующую сеть, ток возбуждения и магнитный поток уменьшаются.

Это вызывает увеличение скорости двигателя и характеристики, будут располагаться выше естественной характеристики.

Если $I \rightarrow 0$ ($M \rightarrow 0$), то $I_s \rightarrow 0$, $\Phi \rightarrow 0$, а $\omega \rightarrow \infty$, то все искусственные характеристики имеют своей вертикальной асимптотой ось скорости.

Показатели регулирования.

1. Диапазон регулирования скорости небольшой и равен 3...4, т.к. снижается жёсткость регулировочных характеристик.

2. Стабильность скорости достаточно высокая, хотя и снижается по мере уменьшения магнитного потока.

3. Характер регулирования зависит от типа преобразователя: при использовании регулировочного реостата – ступенчатое; регулирование, при использовании управляемого выпрямителя – плавное.

4. Направление регулирования – вверх от естественной характеристики.

5. Допустимая нагрузка определяется из соотношения:

$$I = I_{н.ом} \quad M_{доп} = k I_{н.ом} \Phi_u \quad \Phi_u < \Phi_{н.ом} \Rightarrow M_{доп} < M_{н.ом} \quad (2.15)$$

По условия нагрева, работая на искусственной характеристике, двигатель не может быть нагружен номинальным моментом.

Для определения величины допустимой нагрузке воспользуемся уравнениями ЭДС и напряжения двигателя.

$$\begin{aligned} E_e &= k \Phi_{н.ом} \omega_{н.ом} = U_{н.ом} - I_{н.ом} R_{я} \rightarrow E_u = k \Phi_u \omega_u = U_{н.ом} - I_{н.ом} R_{я} \rightarrow E_e = E_u \\ M_{доп} &= k I_{н.ом} \frac{\Phi_{н.ом} \omega_{н.ом}}{\omega_u} = M_{н.ом} \frac{\omega_{н.ом}}{\omega_u} \\ M_{доп} \omega_u &= M_{н.ом} \omega_{н.ом} \end{aligned} \quad (2.16)$$

При данном способе регулирования скорости двигатель, работая на искусственной характеристике, может быть нагружен на номинальную мощность.

Это обеспечивает полное использования двигателя при работе на искусственной характеристике.

6. Способ экономичный, т.к. регулирования скорости не сопровождается потерями мощности.

2.3.4 Регулирование скорости шунтированием обмотки якоря

Данный способ регулирования скорости является комбинированным, т.к. сочетает в себе регулирования изменения величины подводимого к якорю напряжения и тока возбуждения с реостатным способом.

По своим показателям данный способ регулирования скорости занимает промежуточное положение между способами изменения величины питающего напряжения и изменения сопротивления в цепи обмотки якоря и используется:

- в ЭП с ДПТ НВ подъёмно-транспортных машин и механизмов с целью получения пониженных скоростей движения исполнительного органа;
- в ЭП с ДПТ ПослВ для получения скорости идеального холостого хода и пониженных скоростей.
- для двигателей небольшой мощности или при кратковременной работе электропривода на пониженных скоростях.

Для реализации данного способа регулирования:

- в ЭП с ДПТ НВ параллельно и последовательно обмотки якоря включается регулировочный реостат;
- в ЭП с ДПТ ПослВ шунтированием его обмоток при обязательном наличии в цепи обмотки возбуждения, последовательно включённого добавочного регулировочного резистора.

Шунтирующий якорь резистор и последовательно включённый резистор вместе с обмоткой возбуждения образуют делитель напряжения. За счёт этого к якорю подводится пониженное напряжение.

Схемы включения двигателей при данном способе регулирования приведены на рисунке 2.12.

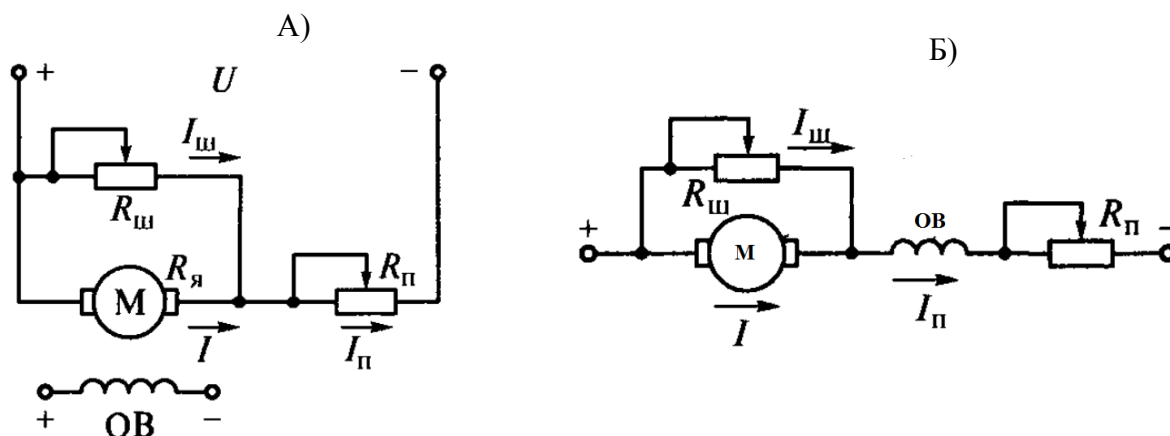


Рис.2.12 – Схемы включения ЭП с ДПТ при шунтировании обмотки якоря

А) ЭП с ДПТ НВ; Б) ЭП с ДПТ ПослВ

Уравнение механической характеристики для ЭП с ДПТ НВ выводятся на основе уравнения напряжения двигателя (формула 1.2) и соотношений, вытекающих из анализа схемы:

$$\begin{aligned} U &= E + IR_{\text{я}} + I_n R_n \\ U &= I_{\text{ш}} R_{\text{ш}} + I_n R_n \\ I_n &= I + I_{\text{ш}} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Используя полученные соотношения, уравнение механической и электромеханической характеристики примет вид:

$$\omega = a\omega_0 - M \frac{R_{\text{ш}} + aR_n}{(\kappa\Phi)^2} \quad (2.18)$$

$$\omega = a\omega_0 - I \frac{R_{\text{ш}} + aR_n}{\kappa\Phi} \quad (2.19)$$

где $a = \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_n}$

Таблица 9 – Координаты основных точек механической и электромеханической характеристики при шунтировании обмотки якоря в ЭП с ДПТ НВ

Характерные точки	Значение	
	$R_{\text{ш}} = \text{Const}, R_n \uparrow$	$R_n = \text{Const}, R_{\text{ш}} \uparrow$
Скорость холостого хода	$(R_{\text{ш}} + R_n) \uparrow \Rightarrow a \downarrow \Rightarrow \omega_0 \downarrow$	$\left(\frac{R_{\text{ш}} \uparrow}{(R_{\text{ш}} + R_n) \uparrow} \right) \downarrow \Rightarrow a \downarrow \Rightarrow \omega_0 \downarrow$
Изменение угловой скорости	$(R_{\text{ш}} + R_n) \uparrow \Rightarrow a \downarrow$ $(R_{\text{ш}} + aR_n) \uparrow \Rightarrow \Delta\omega \uparrow$	$(R_{\text{ш}} + aR_n) \uparrow \Rightarrow \Delta\omega \uparrow$
Точка пересечения характеристик	$I = -\frac{U}{R_{\text{ш}}}$	$I = \frac{U}{R_n}$

Угловая скорость двигателя регулируется вниз от основной скорости в достаточно широких пределах, которые зависят от соотношений величины параллельно и последовательно включённых резисторов.

Регулировочные характеристики располагаются в 1 и 2 квадранте.

Графики регулировочных характеристик ЭП с ДПТ НВ приведены на рисунке 2.13.

Особенностью данного способа регулирования для ЭП с ДПТ ПослВ является то, что регулировочные характеристики имеют точку идеального холостого хода.

При заданном токе якоря можно получать различные токи возбуждения, если изменять величину шунтирующего резистора.

Графики регулировочных характеристик (рисунок 2.14) имеют следующие характерные точки и асимптоты:

при $I = 0$ $I_n \neq 0$, т.к. $R_{\text{ш}} \neq 0$, $\Phi \neq 0$ и $\omega = \omega_0$;

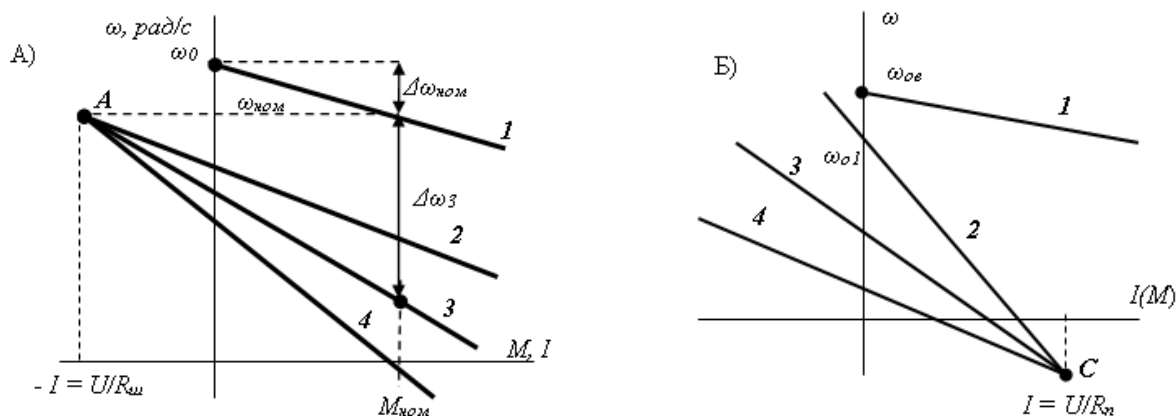
при $I \rightarrow U/R_{\text{ш}}$ $I_n \rightarrow 0$ $\Phi \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$.

при $\omega = \omega_0$ $I = 0$ $M = 0$;

при $I \rightarrow -U/R_{\omega}$ $\Phi \rightarrow 0$ $M \rightarrow 0$, ось скорости является вертикальной асимптотой;

при $\omega \rightarrow \infty$ $M = 0$.

В промежуточном интервале скорости характеристика имеет максимум.



А) 1 – $R_n = 0$; 2 – $0 < R_{n1} < R_{n2}$ 3 – $R_{n1} < R_{n2} < R_{n3}$ 4 – $R_{n3} < R_{n4}$

Б) 1 – естественная 2 – $R_{\omega 3} < R_{\omega 2}$ 3 – $0 < R_{\omega 3} < R_{\omega 2}$ 4 – $R_{\omega} = 0$

Рис.2.13 – Регулировочные характеристики при шунтировании обмотки якоря в ЭП с ДПТНВ

А) при $R_{\omega} = \text{Const}$; $R_n = \infty$; Б) при $R_n = \text{Const}$; $R_{\omega} = \infty$

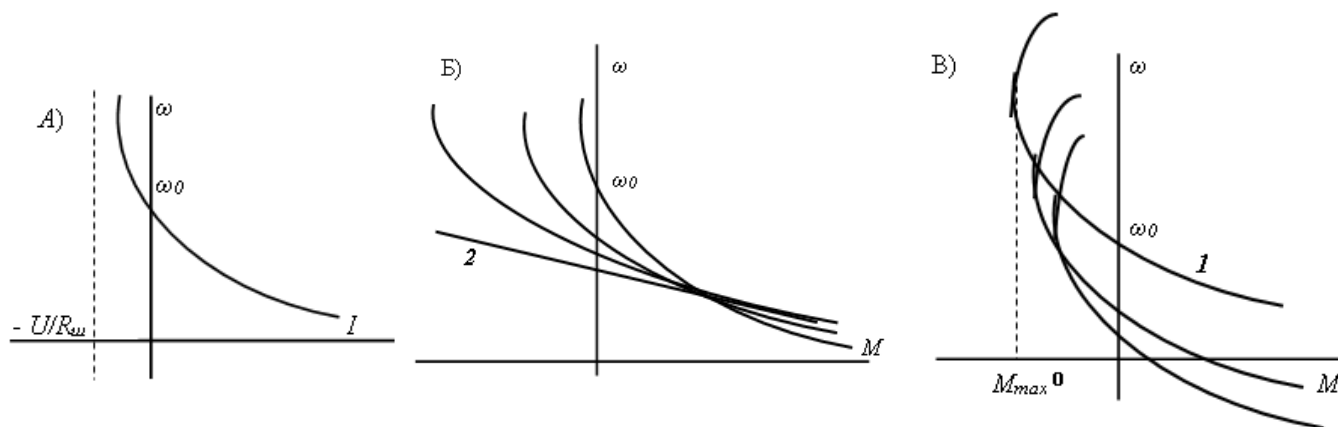


Рис. 2.14 – Регулировочные характеристики при шунтировании обмотки якоря в ЭП с ДПТ ПослВ:

А) электромеханическая; Б) механические при $R_n = \text{Const}$; $R_{\omega} = \text{var}$ (2 – при $R_{\omega} = 0$);
В) механические при $R_{\omega} = \text{Const}$; $R_n = \text{var}$ (1 – при $R_n = 0$).

Показатели регулирования:

1. Диапазон регулирования скорости 5...6.

2. Жесткость искусственных характеристик относительно высокая в области малых скоростей.
3. Характер регулирования определяется способом изменения сопротивлений.
4. Направление вниз от основной скорости.
5. При данном способе регулирования скорости двигатель может работать на любой регулировочной характеристики с моментом нагрузки, равным номинальному моменту.
6. Экономичность невысока из-за значительных потерь мощности в цепи якоря.

Тестовые задания

Описание схем

2.4 Способы реализации основных видов торможения

Торможение необходимо для того, чтобы уменьшить время выбега двигателей, которое при отсутствии торможения может быть недопустимо велико, а также для фиксации приводимых механизмов в определённом положении.

2.4.1 Механическое торможение

Механическое торможение в ЭП с ДПТ производится путём наложения тормозных колодок на тормозной шкив и применяется:

- когда не ограничены время и тормозной путь;
- для фиксирования механизма в определённом месте (подъёмник).

При остановке двигателя в механизмах перемещения или подъёма применяется механическое торможение, осуществляемое колодочным электромагнитным или другим тормозом.

Недостаток:

- тормозной момент и время торможения зависят от случайных факторов: попадания масла или влаги на тормозной шкив и других.

Управление тормозом обеспечивает электромагнит *YB*, при включении которого тормоз растормаживает двигатель, а при отключениях — затормаживает. Узлы схем включения электромагнита приведены на рисунке 2.15.

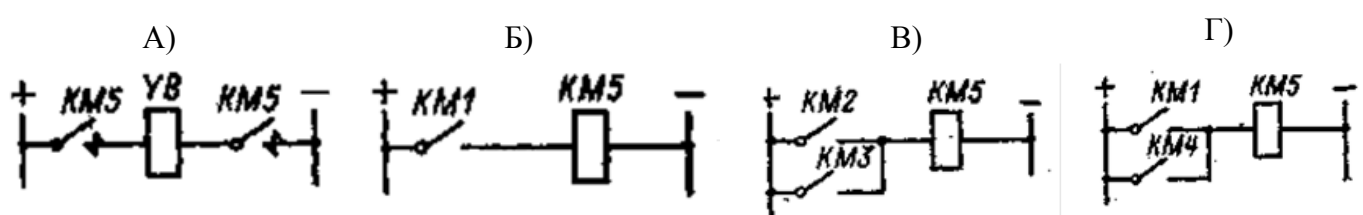


Рис. 2.15 – Узлы схем включения электромагнитного тормоза

Необходимость в таком торможении возникает, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться.

Если обмотку якоря отключить от сети, замкнуть на добавочный резистор, то двигатель перейдёт в генераторный режим. При этом в ЭП с ДПТ НВ(ПВ) обмотка возбуждения должна оставаться включённой в сеть (рисунок 2.17, а).

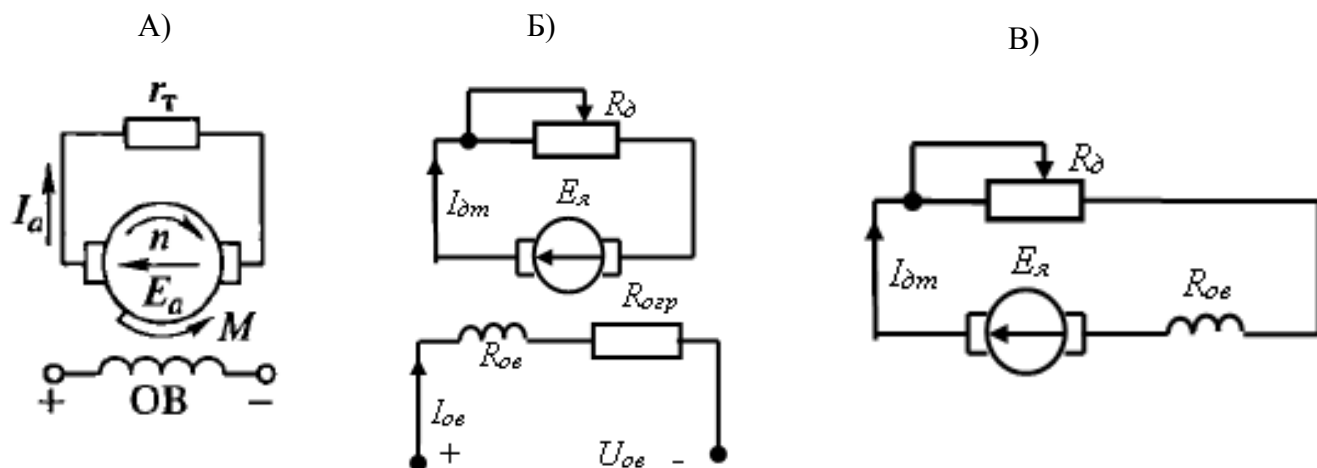


Рис. 2.17 – Схемы включения ДПТ для реализации динамического торможения

А) ЭП с ДПТ НВ; Б) ЭП с ДПТ ПослВ с независимым возбуждением;

В) ЭП с ДПТ ПослВ с самовозбуждением

Вырабатываемая электроэнергия не возвращается в сеть, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении.

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не меняет своего направления.

Т.к. обмотка якоря отключена от сети ($U = 0$), то ток якоря изменит направление, так как будет создаваться ЭДС обмотки якоря.

В результате электромагнитный момент также изменит направление и станет тормозящим

Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ($\omega = 0$).

Регулирование тормозного момента осуществляется путём изменения сопротивления регулировочного реостата подключённого к обмотке якоря.

$$I_{\text{я}} = \frac{E_{\text{я}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{доп}}} \quad M_{\text{т}} = \kappa \Phi \cdot I_{\text{я}} \quad (2.20)$$

Машина не может быть заторможена в неподвижном состоянии.

Механические характеристики при динамическом торможении для ЭП с ДПТ НВ приведены на рисунке 2.18, а.

Динамическое торможение ЭП с ДПТ ПослВ осуществляется по двум схемам:

- с независимым возбуждением (рисунок 2.17, б);
- с самовозбуждением (рисунок 2.17, в).

Динамического торможения при независимом возбуждении реализуется в следующем порядке:

- двигатель отключают от сети;
- обмотку возбуждения отключают от обмотки якоря и подключают к питающей сети последовательно с ограничительным сопротивлением;
- обмотку якоря замыкают на внешнее сопротивление.

Направление тока в обмотке возбуждения не меняется, а по обмотке якоря будет протекать ток под действием остаточной ЭДС.

Величина ограничительного сопротивления выбирается из условия, чтобы ток в обмотке возбуждения не превышал номинального значения:

$$R_{огр} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}} - R_{ном} \quad (2.21)$$

Механические характеристики при данном виде торможения будут совпадать с механическими характеристиками для ЭП с ДПТ НВ (рисунок 2.18, б)

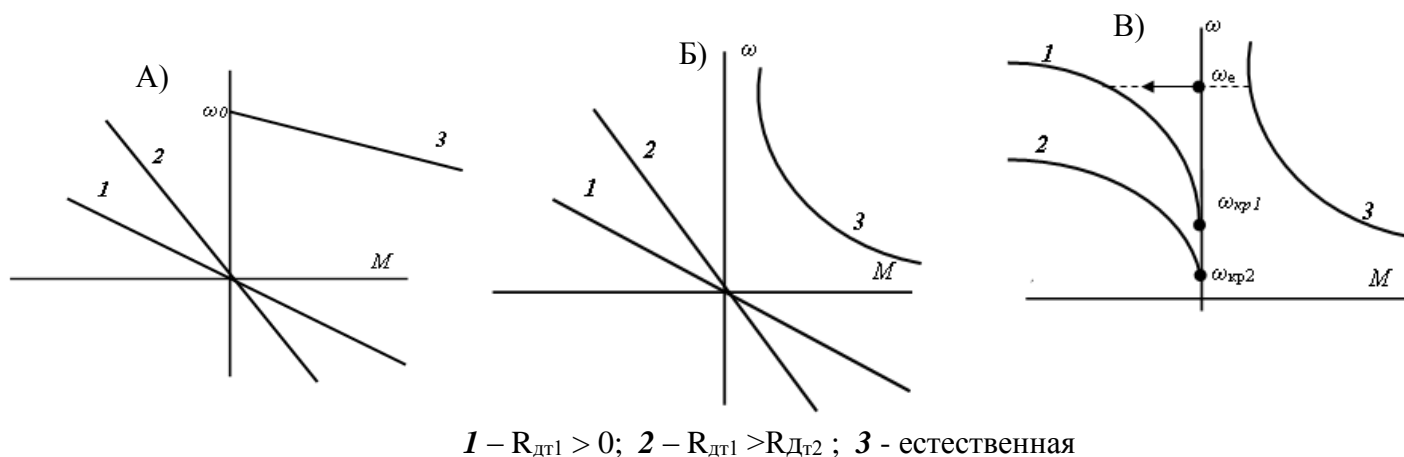


Рис. 2.18 – Механические характеристики при динамическом торможении

А) ЭП с ДПТ НВ; Б) ЭП с ДПТ ПослВ с независимым возбуждением;

В) ЭП с ДПТ ПослВ с самовозбуждением

Динамическое торможение с самовозбуждением

Режим торможения с самовозбуждением используется для интенсивного электрического торможения в электроприводах транспортных и грузоподъемных механизмах.

При данном виде торможения внешний источник возбуждения двигателя отсутствует.

Для возникновения и существования режима самовозбуждения необходимо выполнение следующих условий:

- наличие остаточного магнитного потока в двигателе;

- совпадение по направлению остаточного и основного магнитных потоков;
- сопротивление цепи обмотки якоря (с учётом добавочного сопротивления) меньше критического;
- цепь обмотки якоря замкнута;
- скорость двигателя не равна нулю;
- наводимая ЭДС должна быть равна суммарному падению напряжения в резисторах якорной цепи.

При выполнении этих условий торможение происходит следующим образом:

- под действием остаточного магнитного поля в проводниках вращающегося якоря наводится ЭДС;
- под действием ЭДС в обмотке якоря протекать ток противоположного направления (относительно тока в двигательном режиме) и прежнего направления в обмотке возбуждения;
- взаимодействие магнитного потока с током якоря создаёт тормозной момент.

Для сохранения направления тока возбуждения в цепи двигателя производят переключение обмоток таким образом, чтобы возникший начальный ток увеличивал остаточный магнитный поток.

Без переключения обмоток двигатель размагничивается и тормозного момента не создаёт.

Механические характеристики при данном торможении приведены на рисунке 2.18, в.

Достоинства:

- не требуется источника энергии для возбуждения;
- торможение возможно при исчезновении напряжения питающей сети;
- высокая надёжность.

Недостаток:

Уменьшение тормозного эффекта при снижении скорости и прекращение при скорости равной критической.

2.4.2.2 Торможение противовключением

Выполняется путём переключения вращающегося двигателя на обратное направление вращения.

При этом ЭДС и напряжение сети в якоре складываются, и для ограничения тока следует включать резистор с начальным сопротивлением

$$R_{доб} = \frac{E_{я} + U_c}{I_{max}} \quad (2.21)$$

где I_{max} – наибольший допустимый ток.

Торможение связано с большими потерями энергии.

Торможение противовключением в ДПТ реализуется двумя способами:

- при реактивном статическом моменте
- при активном моменте нагрузки, когда $M_c > M_{кз}$.

При наличии реактивного статического момента торможения противовключением достигают, изменяя полярность на зажимах якоря и включая в его цепь тормозной реостат R_m и при сохранении того же направления тока в обмотке возбуждения (или наоборот).

Схема включения и механические характеристики при данном виде торможения для ЭП с ДПТ НВ представлены на рисунке 2.19.

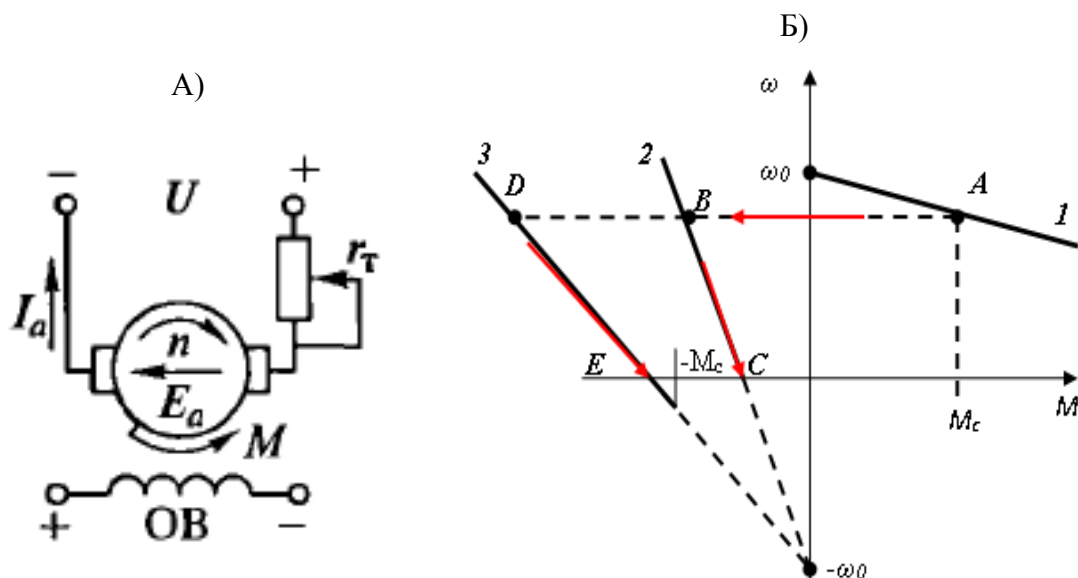


Рис. 2.19 – Режим торможения противовключением при реактивном моменте В ЭП с ДПТ НВ
А) Схема включения; Б) Механические характеристики

Процесс торможения осуществляется следующим образом:

После переключения полярности (рисунок 2.19, б) двигатель переходит из точки A (характеристика 1) в точку B механической характеристики 2, проходящую через точку $-\omega_0$. Наклон будет зависеть от величиной сопротивления тормозного реостата.

Благодаря действию суммарного отрицательного динамического момента происходит интенсивное торможение. Ток и момент двигателя изменяют знак на противоположный.

В точке C (характеристика 2) происходит остановка двигателя, т.к. $M_c > M_{дин}$

Реактивный статический момент меняет свой знак и препятствует вращению двигателя в противоположном направлении.

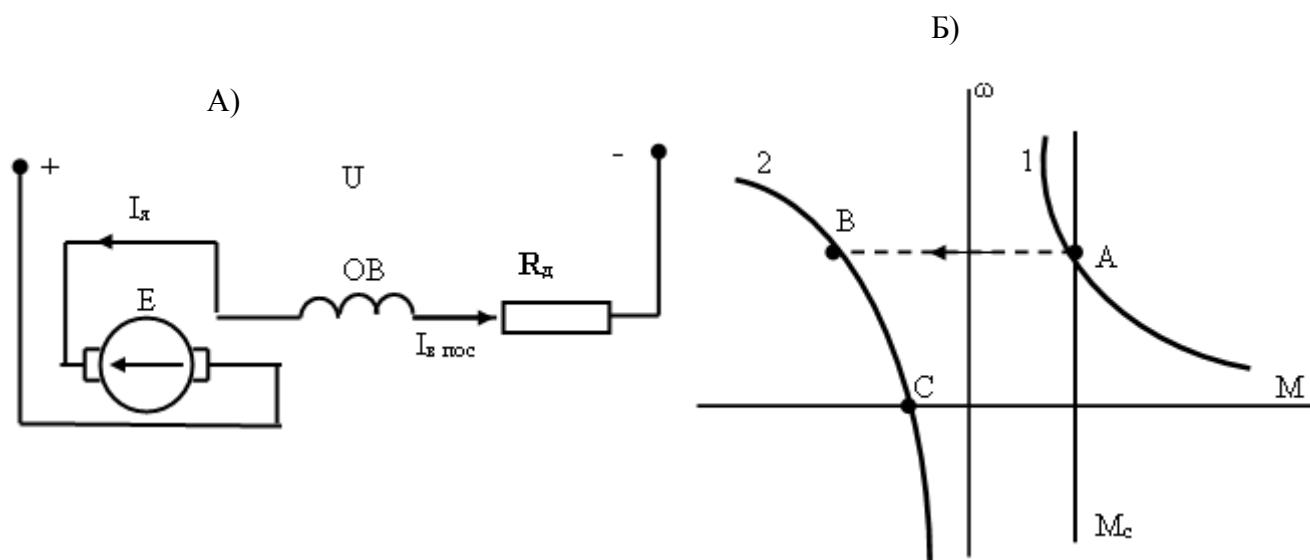
Если переводить двигатель в режим противовключения при меньшем значении сопротивления тормозного реостата, то двигатель из точки A перейдёт в точку D новой механической характеристики (с меньшим наклоном к оси абсцисс).

В этом случае тормозной режим не закончится в точке E . ($M_c < M_{дин}$) и двигатель может перейти в режим реверсирования.

Для того, чтобы исключить реверс и остановить двигатель в точке E , его отключают от сети и применяют механическое торможение.

Для реализации этого режима в ЭП с ДПТ ПослВ (рисунок 2.20, а) ток в обмотке возбуждения имеет тоже направление, что и в двигательном режиме, а ток обмотки якоря меняет направление на противоположное.

При этом изменяется знак момента двигателя. Для ограничения тока в режиме торможения в цепь якоря вводится дополнительный резистор.



Рису. 2.20 – Режим торможение противовключением при реактивном моменте в ЭП с ДПТ ПослВ
А) Схема включения; Б) Механические характеристики

До торможения двигатель работал в точке A характеристики 1 (рисунок 2.20, б), преодолевая момент сопротивления M_c .

После изменения полярности напряжения на обмотке якоря и ввода добавочного сопротивления R_d двигатель переходит на работу по характеристике 2 (точка B). Начинается процесс торможения противовключением, которому соответствует участок BC .

В точке C ($M_c > M_{дин}$) торможение заканчивается (скорость двигателя равна нулю), и двигатель отключается от сети.

При наличии активного статического момента в режим противовключения двигатель можно ввести без изменения полярности напряжения управления на якоре.

Для этого двигатель необходимо нагрузить активным моментом, величина которого больше момента короткого замыкания ($M_c > M_{кз}$), для этого в цепь обмотки якоря вводится добавочное сопротивление большой величины. Под действием потенциальных сил происходит торможение якоря до остановки.

ЭДС при этом меняет свой знак на противоположный, а ток (момент) сохраняет прежнее направление.

Этот вариант торможения показан на рисунке 2.21. Процесс торможения не зависит от типа двигателя.

Двигатель в исходном режиме работает в точке A характеристики 1, преодолевая момент сопротивления M_c .

При введении в цепь обмотки якоря большого сопротивления тормозного реостата он переходит в точку B и C (характеристика 2).

При увеличении сопротивления тормозного реостата двигатель может начать вращаться в другую сторону (переход из точки A в точки D , E и K характеристики 3).

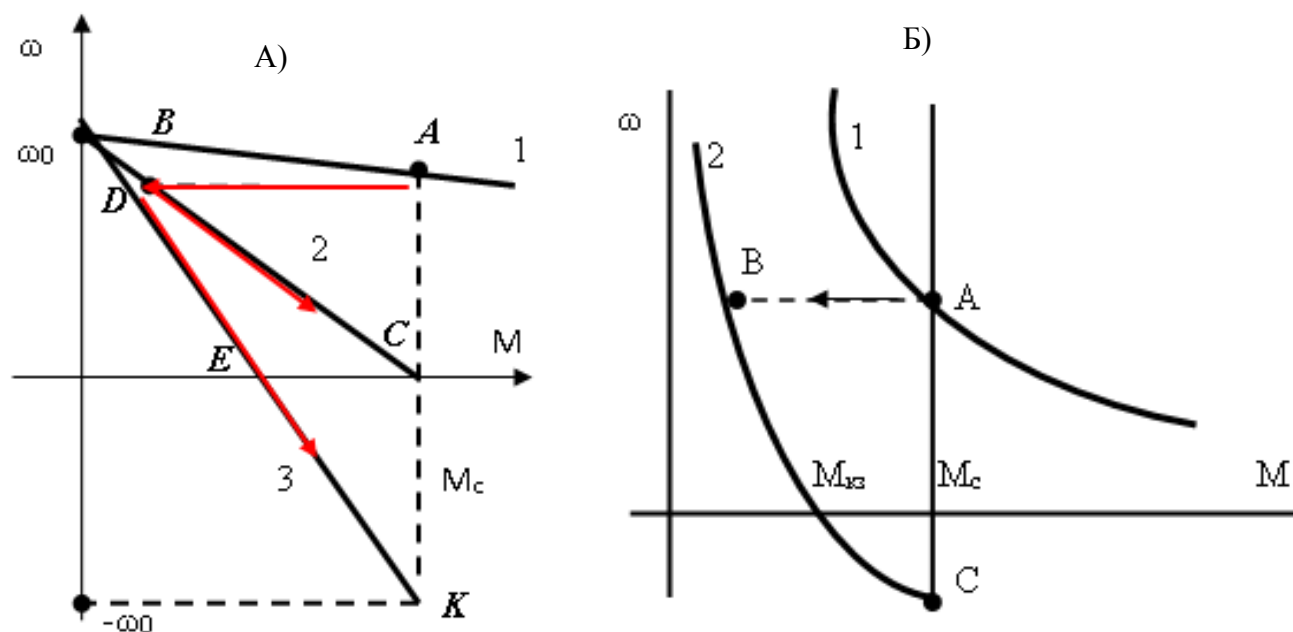


Рис. 2.21 – Механические характеристики при режиме торможение противовключением при активном моменте нагрузки
А) ЭП с ДПТ НВ; Б) ЭП с ДПТ ПослВ

Данный способ торможения используется в грузоподъемных машинах и механизмах при спуске груза.

2.4.2.3 Реверсирование двигателей постоянного тока

Реверсирование ДПТ осуществляется сменой полярности напряжения на якоре или обмотке возбуждения.

Для этого требуется изменить направление магнитного потока двигателя постоянного тока, т. е. переключить обмотку возбуждения или якорь, при этом в якоре будет протекать ток другого направления.

При переключении и цепи возбуждения, и якоря направление вращения останется прежним.

Обмотка возбуждения двигателя параллельного возбуждения имеет значительный запас энергии: постоянная времени обмотки составляет секунды для двигателей больших мощностей. Значительно меньше постоянная времени обмотки якоря. Поэтому для того чтобы реверсирование проходило возможно быстрее, производится переключение якоря.

Только там, где не требуется быстрое действие, можно выполнять реверсирование путем переключения цепи возбуждения.

При реверсировании двигателя якорь сперва отключается от источника питания и двигатель механически тормозится или переключается для торможения.

После окончания торможения якорь переключается, если он не был переключён в процессе торможения, и выполняется пуск при другом направлении вращения.

Для ДПТ малой мощности (десятки и сотни ватт) используются схемы, приведённые на рисунке 2.22, где в качестве пусковых аппаратов используются реле или вспомогательные контакты контакторов.

Узлы схем (рисунок 2.22, а и б) используются для ДПТ НВ.

В схеме используются контакторы $K1$ и $K2$, имеющие по одному замыкающему и одному размыкающему контакту и осуществляющие пуск ДПТ в условных направлениях «Вперёд» и «Назад». В этом случае могут использоваться реле с переключающими контактами.

При остановке ДПТ схема (рисунок 2.22, а) обеспечивает динамическое торможение.

Узлы схем используются для ДПТ ПВ возбуждения с одной (рисунок 2.22, в) и двумя (рисунок 2.22, г) обмотками возбуждения, в этом случае используются два аппарата, имеющих по одному замыкающему контакту.

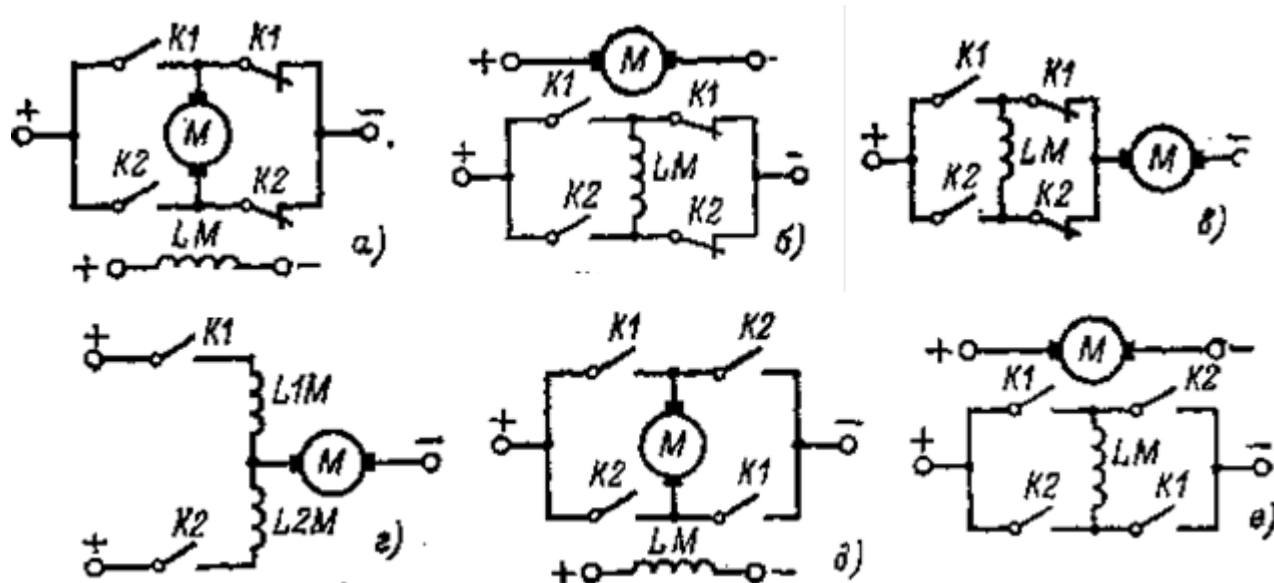


Рис. 2.22 – Схемы для реализации реверса ДПТ

Для реверсирования ДПТ средней и большой мощности используются узлы схем с реверсом тока в обмотке якоря (рисунок 2.22, д) и в обмотке возбуждения (рисунок 2.22, е). В этих случаях используются контакторы с двумя замыкающими контактами, обеспечивающие двойной разрыв цепи при остановке ДПТ.

Команды на включение и отключение реверсивных контакторов могут подаваться кнопками управления *SB* и командоконтроллерами *SM* (рисунок 2.23).

В реверсивных схемах используются пусковые кнопки *SB2* и *SB3*, подающие команды на пуск двигателя в условных направлениях «Вперёд» и «Назад» или «Вверх» и «Вниз» (контакторами *KM3* или *KM4*, рисунок 2.23, а).

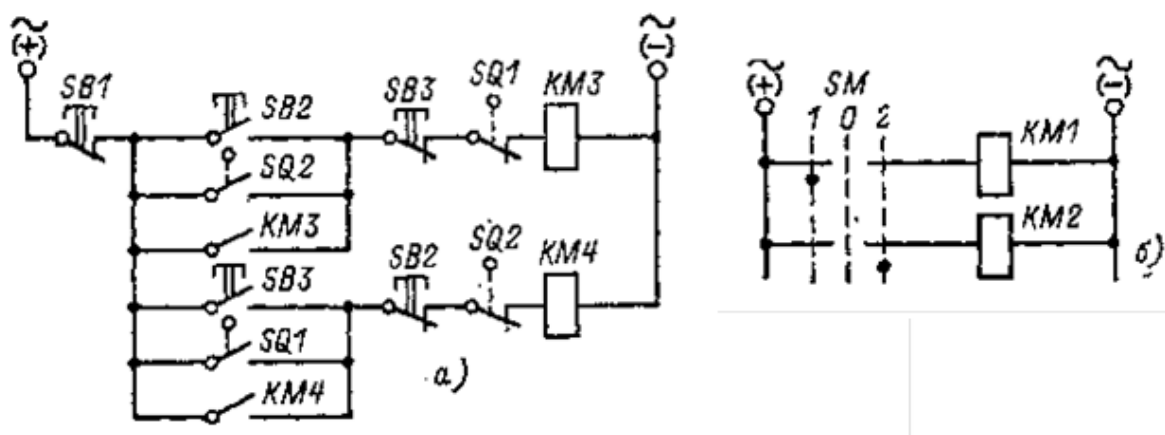


Рис. 2.23– Узлы схем управления для осуществления реверса

Кнопки управления применяются двухцепными с замыкающими и размыкающими контактами, необходимыми для отключения включённого до реверса контактора.

При использовании командоконтроллера *SM* (рисунок 2.23, б) включение реверсивных контакторов *KM1* и *KM2* обеспечивается установкой *SM* в положения 1 или 2.

Команды на включение и отключение контакторов *KM3* и *KM4* могут также подаваться от конечных выключателей *SQ1* и *SQ2*, обеспечивающих управление возвратно-поступательным движением механизма с контролем положения (рисунок 2.23, а).

Практическая работа 5

Описание схем