

## Оглавление

1. Функциональная схема электропривода.....	3
2. Классификация элементов электроприводов. ....	4
3. Конструкция и принцип действия электрических машин постоянного тока. Способы возбуждения электрических машин. ....	6
4. ЭДС и электромагнитный момент в электрических машинах постоянного тока.....	11
5. Структурная схема ДПТ.....	14
6. Статические характеристики ДПТ. ....	16
7. Способы регулирования скорости вращения ДПТ.....	18
8. Режимы работы ДПТ. ....	19
9. Схема и принцип работы системы тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока. ....	20
10. Реверсивный привод с транзисторным широтно-импульсным преобразователем с ДПТ. ....	22
11. Принципы построения автоматического электропривода. Синтез компенсационных регуляторов.....	23
12. Модульный оптимум (МО) настройки контуров.....	26
13. Симметричный оптимум (СО) настройки контуров. ....	28
14. Синтез регуляторов, настроенных на МО в системах подчиненного регулирования.....	30
15. Синтез регуляторов, настроенных на СО в системах подчиненного регулирования.....	32
16. Синтез регулятора контура тока, настроенного на МО .....	33
17. Синтез регулятора контура скорости, настроенного на МО .....	36
18. Синтез регулятора контура скорости, настроенного на СО. ....	37
19. Синтез контура положения .....	39
20. Получение дискретных регуляторов.....	42
21. Вентильные электроприводы. Принцип действия вентильного двигателя. .....	44
22. Управление скоростью вентильного двигателя. ....	49
23. Шаговый электропривод. Принцип действия шагового электродвигателя. .....	52
24. Редукторные ШД.....	56

25. Особенности динамики работы ШД, отработка единичного шага.....	57
26. Режимы работы ШД.....	59
27. Асинхронный электропривод. Конструкция и принцип действия АД.....	61
28. Режимы работы АД.....	63
29. Регулирование скорости вращения АД.....	65
30. Схема и принцип действия устройства плавного пуска, основные характеристики.....	70
31. Схема и принцип действия устройства плавного пуска, дополнительные функции.....	75
32. Виды и аппараты защиты, блокировок в электроприводе.....	77
33. Коммутация электроприводов. Аппараты ручного управления. Аппараты дистанционного управления. ....	86
Аппараты ручного управления .....	86
Аппараты дистанционного управления .....	87
34. Твердотельные реле. Структура и принцип действия.....	90
35. Классификация твердотельных реле.....	93
36. Твердотельные реле. Коммутация через ноль и реле с фазовым управлением.....	94
37. Телекоммуникационные твердотельные реле.....	96

## 1. Функциональная схема электропривода.

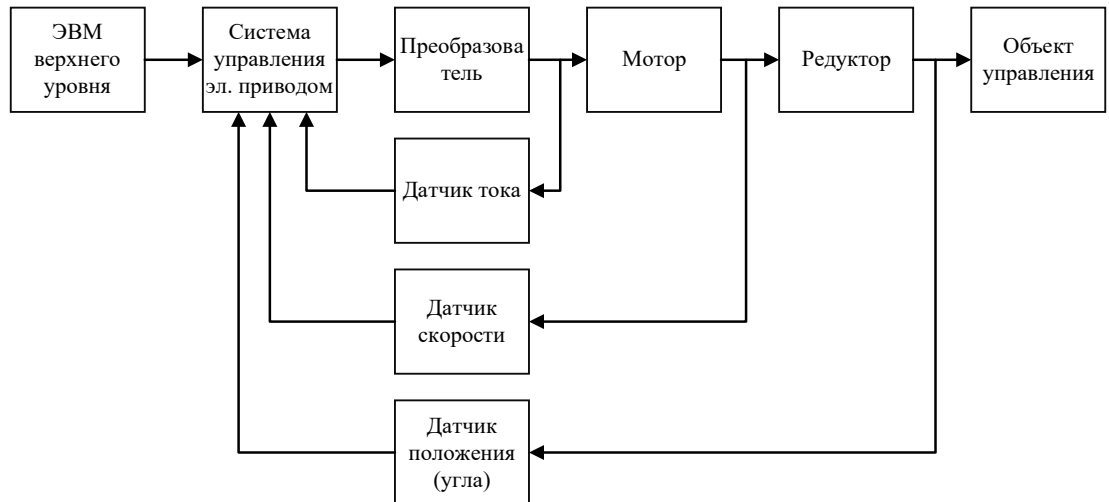


Рисунок 1 – Функциональная схема электропривода

При проектировании привода приходится учитывать ряд противоречивых требований. В частности, необходимо не только воспроизвести закон изменения угла, но и достичь этого при минимальных габаритах, массе, максимальном КПД, минимальной температуре и т.д. При этом на выходном валу необходимо обеспечить заданное значение моментов (усилий), скоростей и ускорений. Причем эти моменты скорости и ускорения могут изменяться в самых широких пределах от 0 значения до максимального.

## **2. Классификация элементов электроприводов.**

### **1. Электрические элементы систем питания**

#### **1.1 Трансформаторы**

**1.2 Преобразователи напряжения** (вентильные, тиристорные, транзисторные)

#### **1.3 Машинные усилители**

#### **1.4 Эл/машинные усилители**

**1.5 Элементы коммутации силовой части** (контакторы, магнитные пускатели)

#### **1.6 Реле**

### **2. Классификация электрических двигателей**

#### **2.1 ДПТ**

#### **2.2 Шаговый двигатель (ШД)**

#### **2.3 Вентильный двигатель (ВД)**

#### **2.4 Синхронный двигатель (СД)**

#### **2.5 Асинхронный двигатель (АД)**

### **3. Датчики внутренней информации**

#### **3.1 Датчики тока**

#### **3.2 Напряжения**

**3.3 Скорости** (тахогенераторы) – постоянный, синхронный, асинхронный.

**3.4 Положения** (вращающийся трансформатор, индуктосины, редуктосины, сельсины, магнесины)

### **4. Датчики внешней информации**

#### **4.1 Локационные Э/М датчики**

#### **4.2 Магнитоуправляемые контакты**

#### **4.3 Э/М датчики измерения усилия, моментов, проскальзывания**

#### **4.4 Оптические**

**5.** В зависимости от наличия или отсутствия обратной связи по положению или углу эл. привода подразделяют на разомкнутые и замкнутые.

### 3. Конструкция и принцип действия электрических машин постоянного тока. Способы возбуждения электрических машин.

Принцип действия всех машин основан на методе электромагнитной индукции. Его суть состоит в том, что в проводнике, перемещающемся в магнитном поле и пересекающем его, наводится ЭДС. Величина ее пропорциональна магнитной индукции ( $\vec{B}$ ) активной длине проводника ( $L$ ) и скорости перемещения ( $\vec{v}$ ).

Если проводник перемещается перпендикулярно вектору  $B$ , наводимая ЭДС определяется:

$$E = B \cdot l \cdot v$$

В случае замкнутого витка речь пойдет о двух проводниках:

$$E = 2 \cdot B \cdot l \cdot v$$

Направление ЭДС определяется правилом «правой руки» (Рисунок 2).

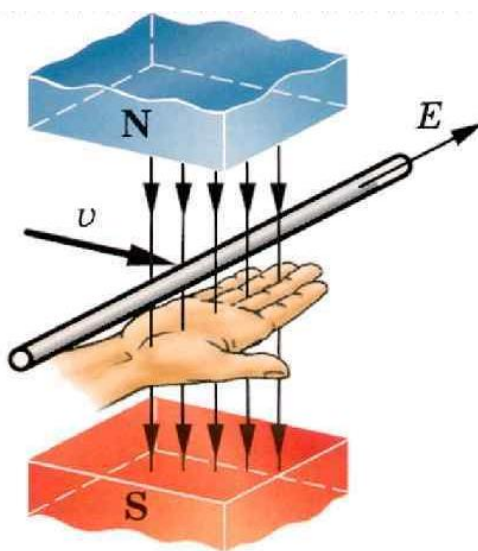


Рисунок 2 – Определение направления ЭДС

Принцип ЭМИ используют как в двигателях, так и в генераторах.

*Рассмотрим схему электрического генератора* (Рисунок 3):

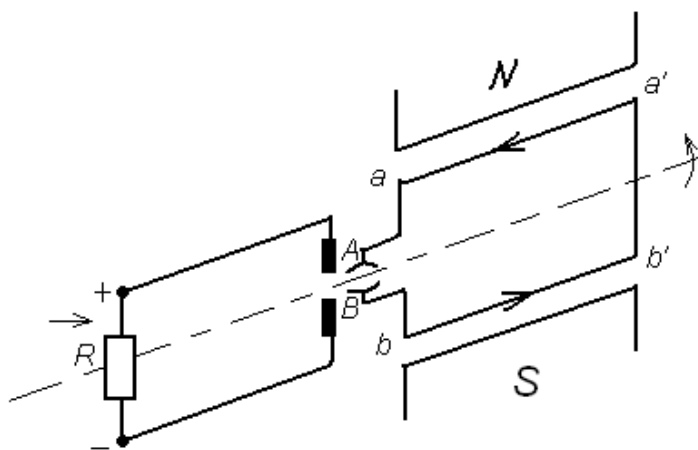


Рисунок 3 – Схема электрического генератора, где А, В – два полукольца, а-а`, b-b` – активные стороны витка

В магнитном поле вращается цилиндр, на котором расположены виток с двумя активными сторонами а-а` и b-b`. Начало и конец витка присоединяются к двум полукольцам А и В, образующим коллектор. По коллектору скользят неподвижные пластины-щётки, которые соединены с внешней электрической цепью. Виток с цилиндром и коллектором образуют вращающуюся часть машины, которая называется якорь (ротор). Примем, что в  $E = 2 \cdot B \cdot l \cdot v$  параметры  $l \cdot v$  постоянны. Тогда закон изменения ЭДС будет определяться характером распространения  $\vec{B}$  в воздушном зазоре между поверхностью якоря и полюсами *N* и *S*. Под серединой полюса индукция имеет  $B = \max$ , а в точках наиболее удаленных  $B = \min = 0$ . Допускаем, что  $\vec{B}$  в воздушном зазоре по окружности распределяется синусоидально, тогда ЭДС определяется:

$$E = 2 \cdot B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha, \text{ где } \alpha - \text{угол поворота якоря.}$$

Эту формулу изобразим графически:

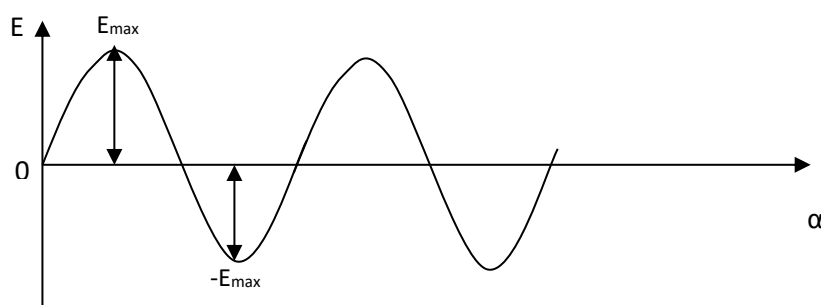


Рисунок 4 – Зависимость напряжения от угла поворота

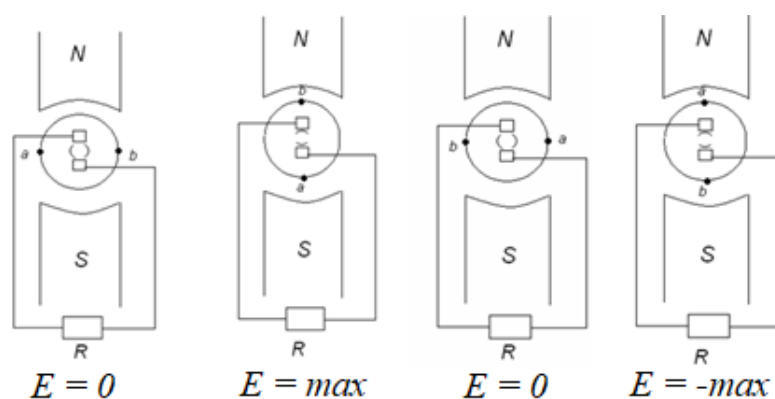


Рисунок 5 – Значения ЭДС при различных положениях ротора

В обмотке наводится переменный ЭДС при вращении якоря и появляется переменный ток в ветвях А и В. Однако, во внешней среде ЭДС и ток не меняют своей полярности. Причина этого в том, что в I и III полукольца коллектора меняются местами одновременно с изменением полярности ЭДС. Во внешней цепи будет протекать пульсирующий постоянный ток. Пульсации можно ослабить, если обмотку выполнить из нескольких витков. При этом необходимо увеличивать число коллекторных пластин.

**Принцип действия двигателя постоянного тока** (Рисунок 6).

Электрические машины постоянного тока могут работать как в генераторном режиме, так и в двигательном. Это свойство называют обратимостью.

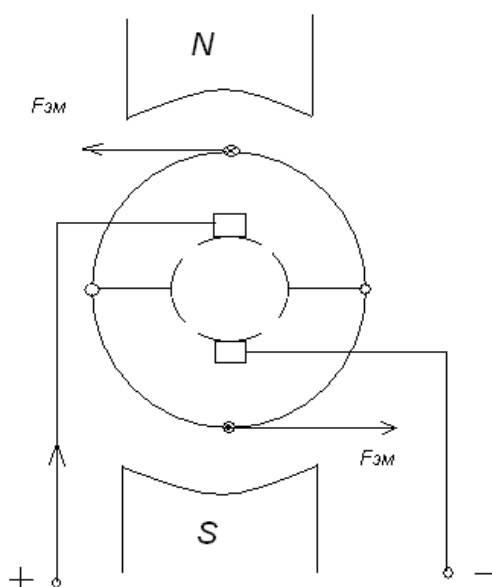


Рисунок 6 – Схема ДПТ

Электрическая машина содержит 2 витка и одну пару коллекторных пластин. Подключим к щеткам внешний источник постоянного тока. Тогда по



витку будет протекать ток  $I$ , который будет создавать внутреннее магнитное поле. В условиях существования внешнего магнитного поля от полюсов  $N$  и  $S$  происходит взаимодействие двух магнитных полей, что вызовет возникновение ЭМС.

$$F_{эм} = B \cdot l \cdot I, \text{ где } I - \text{ величина тока в проводнике.}$$

Направление силы определяется по правилу «левой руки» (Рисунок 7).

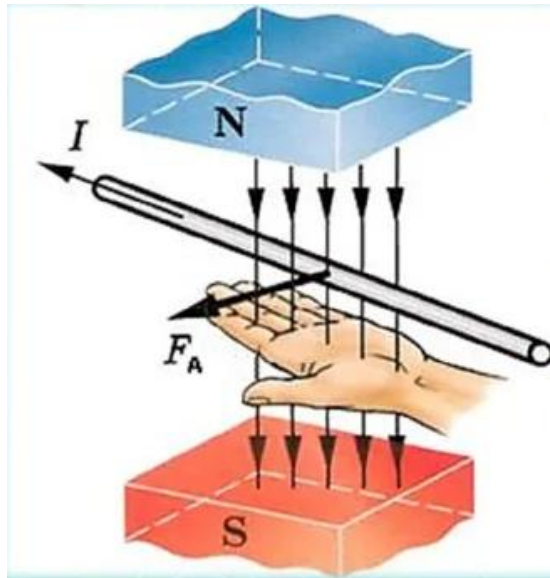


Рисунок 7 – Определение направления силы Ампера

Совокупность ЭМС создает вращающий момент якоря. Объясняется это тем, что при вращении якоря происходит смена контактов пластины и смена витка. В этом и заключается преобразование электрической энергии в механическую. Во всех электрических машинах происходит взаимодействие двух магнитных полей – неподвижного (статора) и подвижного (поле ротора). Образование неподвижного поля называется возбуждением электрической машины.

***Способы возбуждения электрических машин.***

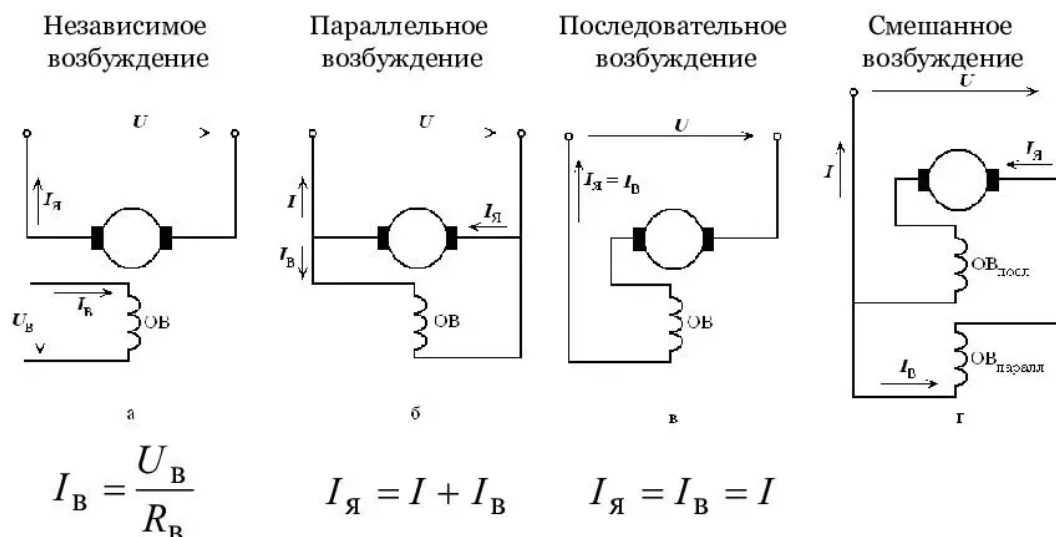


Рисунок 8 – Способы возбуждения ДПТ

Отличие способов возбуждения друг от друга:

ДПТ с постоянными магнитами (частный случай независимого возбуждения) имеют более высокий КПД, т.к. не тратится энергия на возбуждение. ДПТ с постоянными магнитами более дорогие, т.к. высока стоимость материалов для магнитов. ДПТ с постоянными магнитами имеют более стабильный поток. При э/м возбуждении наблюдается зависимость магнитного потока от тока, протекающего в обмотке возбуждения. Магнитный поток зависит от температуры. Эти отличия не существенно влияют на статические характеристики.

Статический режим обмотки возбуждения описывается уравнением:

$$U_B = I_B \cdot R_B$$

#### 4. ЭДС и электромагнитный момент в электрических машинах постоянного тока.

Распределение магнитного потока в пределах каждого полюса имеет приблизительно трапецевидную форму.

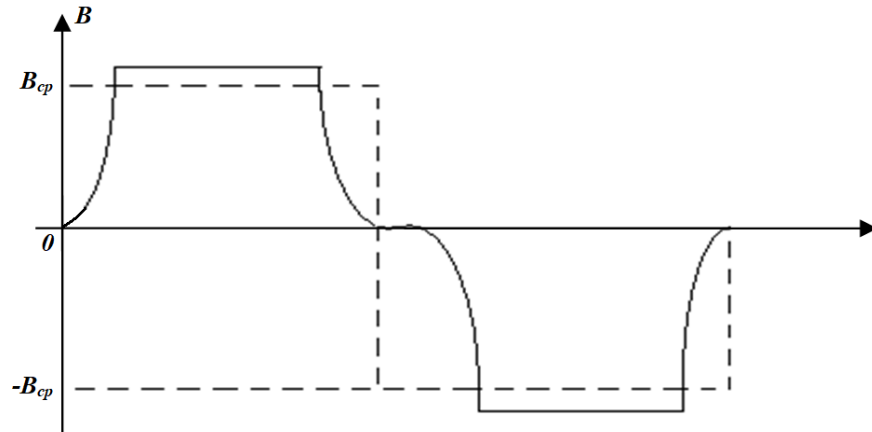


Рисунок 9 – Распределение магнитного потока

Для удобства расчетов вводят  $B_{cp}$ , тогда  $E = B_{cp} \cdot l \cdot v$

В реальных машинах используется множество проводников, число которых обозначим большой буквой  $N$ . Число пар полюсов  $2p$ . Конструктивно обмотка размещается в виде совокупности ветвей. Каждая ветвь занимает часть окружности якоря, соответствующая одному полюсу. В пределах одной ветви ЭДС действует в одном направлении. Число параллельных ветвей обозначим  $2a$ . В пределах одной ветви ЭДС действует в одном направлении.

Число проводников в одной ветви:  $\frac{N}{2a}$ .

Круговая скорость:  $v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60}$ .

Магнитный поток:  $\Phi = B_{cp} \cdot S$ .

Площадь поверхности проводника:  $S = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} \cdot l$

$n$  – частота вращения якоря, об/мин.

$D$  – диаметр якоря.

Подставим в формулу  $E = B_{cp} \cdot l \cdot v$  записанные выше выражения, тогда:

$$E = \frac{\Phi}{S} \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{N}{2 \cdot a} = \frac{\Phi \cdot 2 \cdot p}{\pi \cdot D \cdot l} \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \cdot \frac{1}{2 \cdot a} = \frac{p}{60} \cdot \frac{N}{a} \cdot n \cdot \Phi = c_l'' \cdot n \cdot \Phi$$

$c_l''$  – постоянный параметр, определяющий конструкцию машины.

Часто формула  $E = c_l'' \cdot n \cdot \Phi$  рассматривается с показателем угловой скорости  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ :

$$E = c_l'' \cdot \frac{30 \cdot \omega}{\pi} \cdot \Phi = c_l' \cdot \Phi \cdot \omega$$

Эти формулы ЭДС можно упростить, считая  $\Phi$  постоянным  $\Phi = const \rightarrow c_l' \cdot \Phi = c_l = const$ :

$$E = c_l \cdot \omega$$

### Электромагнитный момент ДПТ

При работе электрической машины с двумя полюсами в режиме двигателя на каждый проводник действует сила  $F = B_{cp} \cdot l \cdot I_a$  и возникает

момент  $M = F \cdot \frac{D}{2} \cdot N$ , где  $D$  – диаметр якоря,  $N$  – число проводников. Либо

$M = c_m \cdot \Phi$ , где  $c_m = \frac{p \cdot N}{2\pi a}$  – конструктивный параметр,  $a$  – число ветвей.

На вал двигателя действует не только движущий момент, но и момент сопротивления, который состоит из момента холостого хода  $M_0$  и момента нагрузки:  $M_{cm} = M_0 + M_n$ . Равновесие  $M = M_{cm}$  определяет статический режим двигателя. В динамическом режиме скорость вращения изменяется, а на вал воздействует не только статический, но и динамический момент:

$M = M_{cm} + M_\partial$ , где  $M_\partial = J \frac{d\omega}{dt}$ , где  $J$  – момент инерции вращающихся частей,

$\omega$  – угловая скорость вала.

### ПротивоЭДС двигателя

При работе двигателя его якорь вращается в магнитном поле, поэтому в обмотке возникает ЭДС  $E_{\text{я}} = c'_e \cdot \Phi \cdot \omega$ . Она направлена навстречу току якоря, поэтому ее и называют противоЭДС. Ее учитывают при составлении уравнения установившегося режима:  $U_{\text{я}} = E_{\text{я}} + r_{\text{я}} I_{\text{я}}$ , где  $U_{\text{я}}$  – напряжение якоря,  $r_{\text{я}}$  – сопротивление обмотки якоря,  $I_{\text{я}}$  – ток якоря.

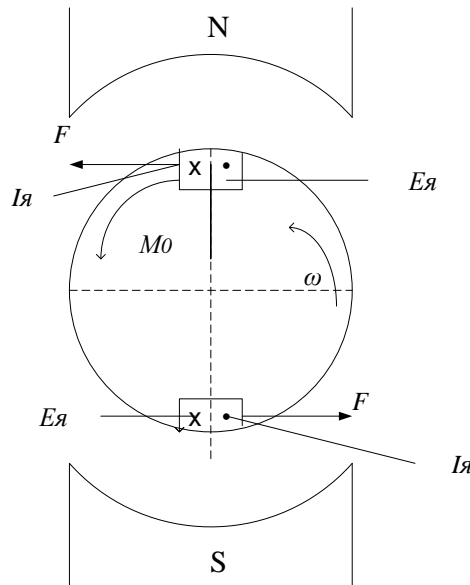


Рисунок 10 – Направление векторов ЭДС, тока якоря, угловой скорости и момента

Для машин средней мощности величина  $E_{\text{я}}$  может составлять до 90% от  $U_{\text{я}}$ .

$$I_{\text{я}} = \frac{U_{\text{я}} - E_{\text{я}}}{r_{\text{я}}},$$

$$U = c_e \cdot \Phi \cdot n + I_{\text{я}} \cdot r_{\text{я}},$$

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} \cdot r_{\text{я}}}{c_e \cdot \Phi}.$$

Последняя формула показывает, что скорость вращения  $n$  зависит от:

1. Подводимого к якорной цепи напряжения;
2. Активного сопротивления якорной цепи и магнитного потока  $\Phi$ .

## 5. Структурная схема ДПТ.

Линеаризованные уравнения ДПТ позволяют представить описание двигателя в графической форме:

$$\begin{cases} U_{я} = r_{я} I_{я} + L_{я} \frac{dI_{я}}{dt} + c_e \omega & (1) \\ M = c_m I_{я} & (2) \\ J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c & (3) \end{cases}$$

Переведем в операторную форму:

$$\begin{cases} U_{я}(p) = r_{я} \cdot I_{я}(p) + L_{я} p I_{я}(p) + c_e \omega(p) \\ M(p) = c_m \cdot I_{я}(p) \\ J p \omega(p) = M(p) - M_c(p) \end{cases}$$

Выделим в каждом уравнении независимые переменные и определим выходную переменную  $\omega(p)$ :

$$I_{я}(p) = \frac{1}{r_{я} + L_{я} p} \cdot U_{я}(p) - \frac{c_{я}}{r_{я} + L_{я} p} \cdot \omega(p) \quad (4)$$

$$M(p) = c_m I_{я}(p) \quad (5)$$

$$\omega(p) = \frac{M(p) - M_c(p)}{J p} \quad (6)$$

В уравнение (4) введем обозначения  $T_{я} = \frac{L_{я}}{r_{я}}$ ,  $k_{\partial в} = \frac{1}{c_e}$ , тогда:

$$I_{я}(p) = \frac{1/r_{я}}{1 + T_{я} p} U_{я}(p) - \frac{1/k_{\partial в}}{1 + T_{я} p} \omega(p) \quad (7).$$

Уравнения (7), (4), (5) условно можно представить в графической форме:

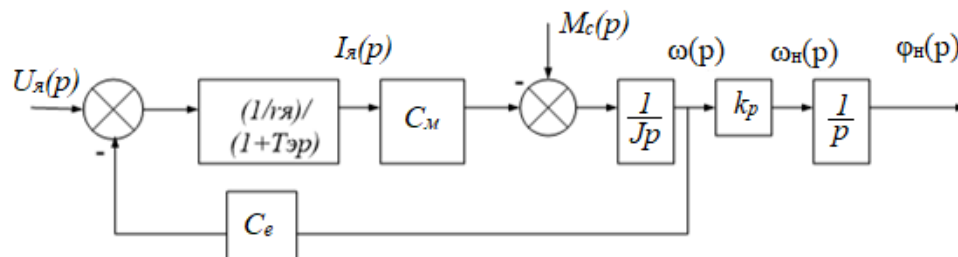


Рисунок 11 – Структурная схема ДПТ

В задачах управления часто приходится понижать скорость двигателя до скорости нагрузки с помощью редуктора. Кроме того, выходной величиной в мехатронных системах обычно бывает не скорость  $\omega_n$ , а угол поворота вала  $\varphi_n$ .

$$k_{ред} = \frac{\omega_n}{\omega}$$

$$i_{ред} = \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$\omega(t) = \frac{d}{dt} \cdot \varphi(t)$$

$$\omega(p) = p \cdot \varphi(p)$$

$$\varphi(p) = \frac{\omega(p)}{p}$$

Таким образом, переход от скорости к углу поворота отобразится интегрирующим звеном.

## 6. Статические характеристики ДПТ.

Запишем систему уравнений для двигателя:

$$\begin{cases} U_{\delta} = r_{\delta} I_{\delta} & (1) \\ U_{я} = r_{я} I_{я} + E, E = c_e \omega & (2) \\ M = M_c, M = c_m I_{я} & (3) \end{cases}$$

Поток возбуждения неизменен. Найдем зависимости:

$$\omega = f(U_{я}), \omega = f(M_c).$$

Для получения  $\omega = f(U_{я})$  выведем из (2):

$$\omega = \frac{1}{c_e} (U_{я} - r_{я} I_{я}) = k_{\delta\delta} (U_{я} - r_{я} I_{я}) \quad (4).$$

Для получения зависимости  $\omega = f(M_c)$  заменим в (4)  $I_{я}$  на его выражение из (3):

$$\omega = k_{\delta\delta} (U_{\delta\delta} - r_{я} \frac{1}{c_m} M) \quad (5).$$

Уравнения (4) и (5) являются аналитическим представлением статических характеристик: 4 – скоростной (электромеханической), 5 – механической.

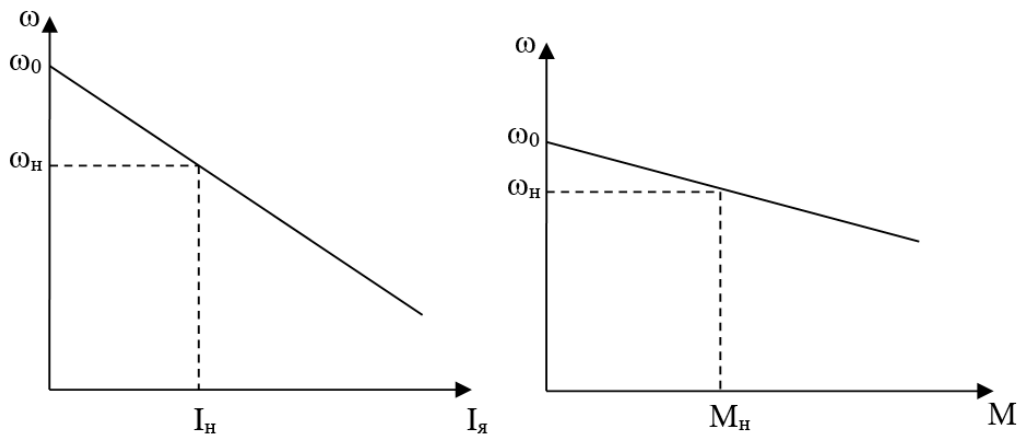


Рисунок 12 – Механическая и электромеханическая характеристика ДПТ

$\omega_{н}$  – номинальная скорость,  $I_{н}$  – номинальный ток,  $M_{н}$  – номинальный момент.



$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}, \alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta M}, \beta - \text{жесткость механической характеристики, } \alpha -$$

крутизна механической характеристики.

### ***Искусственные механические характеристики.***

Различают естественные и искусственные механические характеристики. Если характеристика получена при номинальных значениях потока, напряжения и сопротивления якоря, то это естественная характеристика. Изменение какого-либо из описанных параметров приводит к искусственной характеристике. Наиболее часто такие характеристики получают при изменении напряжения и сопротивления якоря.

## 7. Способы регулирования скорости вращения ДПТ.

Регулирование частоты вращения ДПТ осуществляется по закону:

$$n = \frac{U_{\text{я}}}{C_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \cdot M}{C_e \cdot C_M \cdot \Phi^2}$$

### *I Регулированием сопротивления якоря.*

Введение реостата в цепь якоря. Влияет только на потери частоты под нагрузкой. При таком способе скорость холостого хода остаётся постоянной, но меняется жёсткость механической характеристики. Не экономично – потери мощности на реостате.

### *II Регулирование потока возбуждения.*

Введение реостата в цепь обмотки возбуждения. Влияет, в большей степени, на частоту холостого хода. В данном способе при незначительных изменениях момента значительно изменяется скорость. Наиболее экономично.

### *III Регулирование напряжения на якоре (с помощью тиристорного или транзисторного преобразователя).*

Жесткость характеристики не меняется. Характеристики параллельно перемещаются по оси ординат вниз, при понижении напряжения.

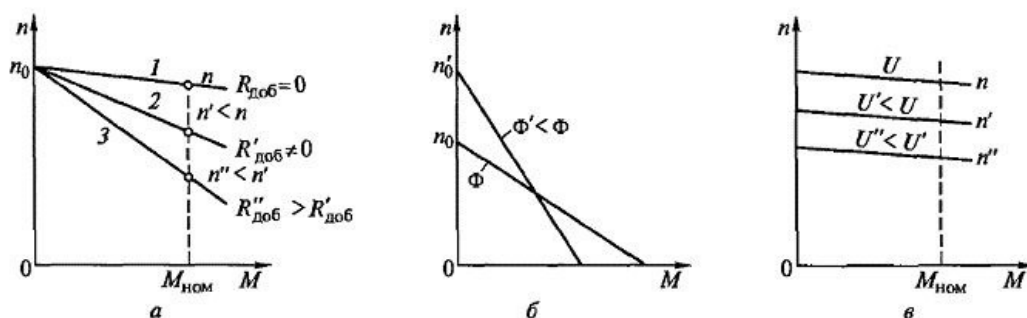


Рисунок 13 – Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого (параллельного) возбуждения:

а – при изменении сопротивления резистора  $R_{\text{доб}}$ ; б – при изменении основного магнитного потока возбуждения; в – при изменении напряжения  $U_{\text{я}}$ , подводимого к якору.

## 8. Режимы работы ДПТ.

Механическая характеристика двигателя 1 и 3 квадранты — двигательный режим. Если кто-то или что-то начинает разгонять двигатель больше скорости холостого хода, то начинается генераторный режим.

**Режим противовключения** реализуется следующим образом: меняется полярность на якоря (+ на -), статор и ротор начинают крутиться в другую сторону. Момент превышает пусковой раза в 2. Если не выключит двигатель, когда скорость 0, то он начнет крутиться в другую сторону. Применяется для двигателей малой и средней мощности.

**Режим динамического торможения** реализуется путем замыкания якорной обмотки накоротко, либо через сопротивление. Все преобразуется в тепло. Быстрая остановка двигателя.

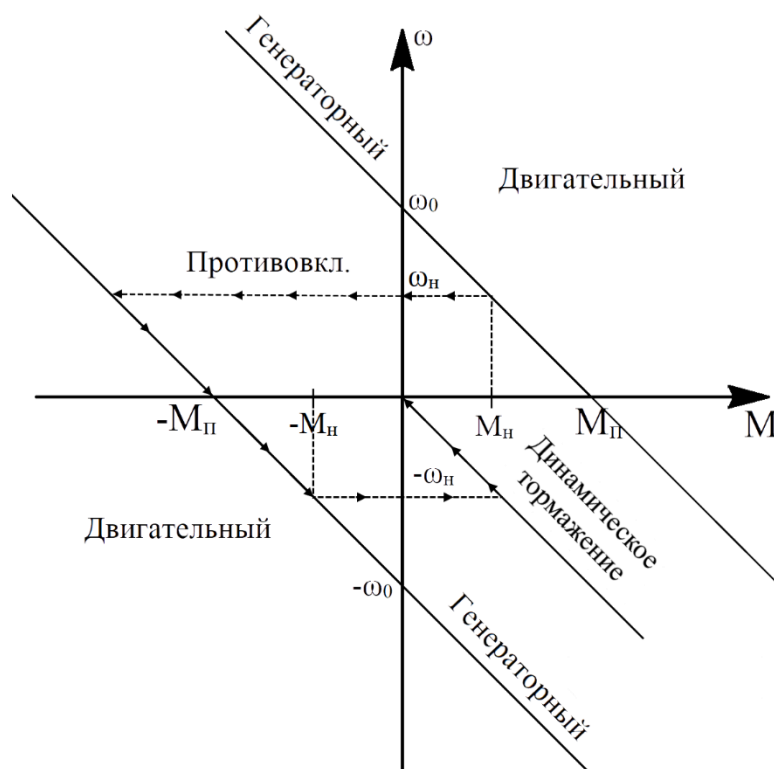


Рисунок 14 – Механическая характеристика ДПТ во всех режимах работы

## 9. Схема и принцип работы системы тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока.

В автоматизированных электроприводах с широким диапазоном регулирования скорости система ТП-Д постоянного тока является в настоящее время преобладающей.

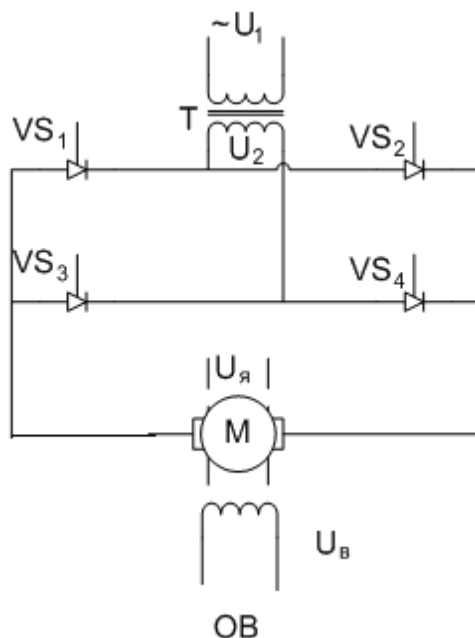


Рисунок 15 – Однофазный мостовой преобразователь нереверсивный

Пусть отпирающие импульсы подаются на  $VS_1, VS_4$ , когда на них положительная полуволна. Тогда среднее выпрямленное напряжение будет максимальным:  $U_{\text{я}} = K_{\text{сх}} \cdot U_2$ ,  $K_{\text{сх}}$  – коэффициент схемы выпрямления. Для данной схемы равен 0,9.

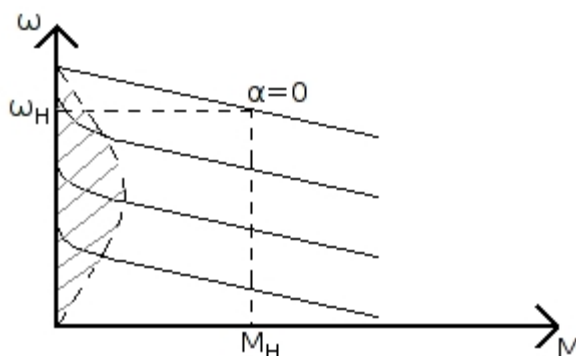


Рисунок 16 – Механические характеристики ДПТ при регулировании тиристорным преобразователем

Характеристики в основной области имеют вид параллельных прямых, а левее линии первой группы характеристики становятся нелинейными. Это объясняется влиянием прерывистых токов.

Суть явления связана с переходом в зону прерывистых токов, где  $U_{\text{ср.выпр.}}$  больше по сравнению с режимом непрерывных токов.

Преобразователи подсоединяются к питающей сети или через трансформатор, служащий для согласования напряжения питающей сети и двигателя, или через сетевой реактор. Сетевые (токоограничивающие) реакторы в бестрансформаторных схемах питания выполняют две функции: ограничивают ток короткого замыкания в преобразователе и уменьшают негативное влияние преобразователя на питающую сеть. И трансформаторы, и реакторы обладают активным и индуктивным сопротивлением.

## 10. Реверсивный привод с транзисторным широтно-импульсным преобразователем с ДПТ.

Механические характеристики нереверсивного привода постоянного тока независимого возбуждения с ШИР регулятором напряжения представлены на рисунке 17.

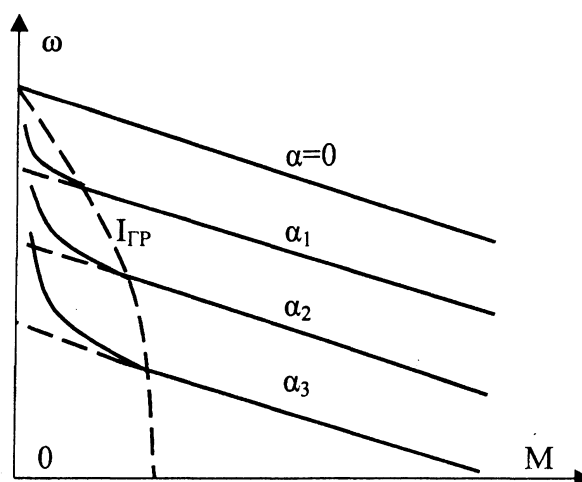


Рисунок 17 – Механические характеристики реверсивного привода с транзисторным широтно-импульсным преобразователем

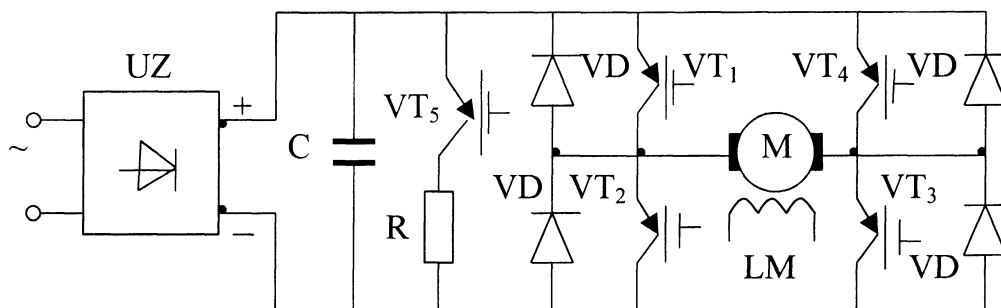


Рисунок 18 – Схема реверсивного электропривода постоянного тока с широтно-импульсным регулятором напряжения

Двигатель включен в диагональ моста из  $VT_1$ - $VT_4$ . Диоды предназначены для обеспечения непрерывности тока. Протекание тока в едином направлении для вращения двигателя в одну сторону обеспечивается открытием плеч моста.

Для реализации режима динамического торможения в схеме имеется  $VT_5$  и  $R$ .

Конденсатор необходим для фильтрации питающего напряжения.

## 11. Принципы построения автоматического электропривода.

### Синтез компенсационных регуляторов.

В основе современного подхода к построению САУ на базе электропривода лежит принцип подчиненного регулирования координат (ток якорной цепи, скорость вращения вала двигателя, угол его поворота [либо линейное перемещение исполнительного механизма]).

Задача построения электропривода является сложной, так как

1. Задача синтеза даже для одной координаты не имеет точного решения
2. САУ имеет трехконтурную структуру
3. Система в целом имеет высокий порядок

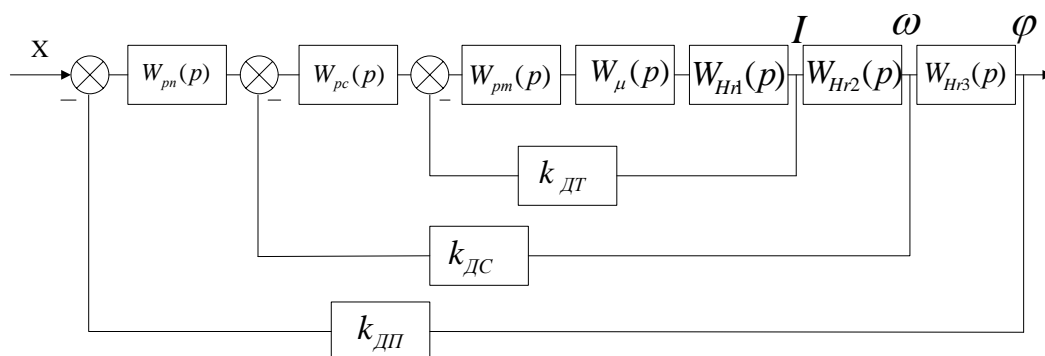


Рисунок 19 – Структурная схема САУ электропривода, где  $W_{pn}$ ,  $W_{pc}$ ,  $W_{pm}$  – передаточные функции регулятора (тока, положения, скорости).  $W_{Hr}$  – неизменяемая часть передаточной функции,  $W_{\mu}$  – некомпенсированная передаточная функция,  $K_{\partial t}$ ,  $K_{\partial c}$ ,  $K_{\partial n}$  – коэффициент передачи датчика тока,  $U$  и положения,  $X$  – входной сигнал

Из-за сложности системы аналитическое решение задачи синтеза даже в линеаризованном варианте не достижимо. Поэтому разработан инженерный метод, основанный на упрощениях. Главная идея этого метода найти такие параметры регулятора, при которых была бы достигнута компенсация наибольшей постоянной времени контура. При этом остаётся некомпенсированная постоянная времени  $T_{\mu}$ , она будет определять свойства контура и поэтому на её основе формируется желаемая передаточная функция.

### Синтез компенсационных регуляторов.

Выделим любой из контуров из рисунка и представим его в виде:

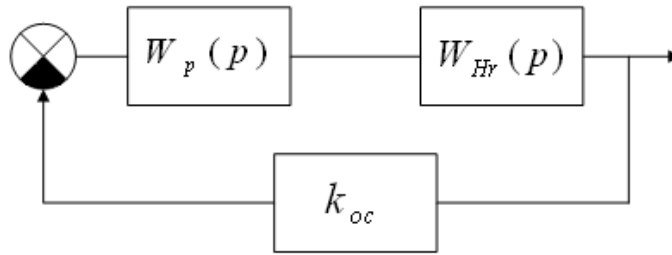


Рисунок 20 – Один из замкнутых контуров САУ

Примем:

$$W_p(p) = k_p \cdot \frac{T_{1p}p + 1}{T_{2p}p + 1}$$

$$W_{Hr}(p) = \frac{k_{Hr}}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}$$

При синтезе регулятора задача состоит в том, чтобы быстродействие контура было максимальным. Для этого необходимо иметь малые постоянные времени в передаточной функции знаменателя разомкнутого контура.

$$W_k^p(p) = W_p(p) \cdot W_{Hr}(p) = k_p \cdot \frac{T_{1p} \cdot p + 1}{T_{2p} \cdot p + 1} \cdot \frac{k_{Hr}}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)}$$

Постоянные времени  $T_1$  и  $T_2$  известны, причем  $T_1 \gg T_2$ , а  $T_{1p}$  и  $T_{2p}$  нам необходимо определить, (т.е.  $T_l$  – механическая постоянная времени, а  $T_2$  – электрическая, а  $T_{lp}$  и  $T_{2p}$  требуется выбрать по условию быстродействия). Примем  $T_{1p} = T_1$  (то есть в регуляторе задаётся самая медленная постоянная времени), тогда:

$$W_k^p(p) = k_p \cdot \frac{T_1p + 1}{T_{2p}p + 1} \cdot \frac{k_{Hr}}{(T_1p + 1)(T_2p + 1)} = k_p \cdot \frac{k_{Hr}}{(T_{2p}p + 1)(T_2p + 1)} = \frac{k^p}{a_1p^2 + a_2p + 1} \quad (1)$$

Здесь  $T_2$  мала по условию, а  $T_{2p}$  назначает проектировщик, и она так же может быть очень маленькой. На основе приведённого можно составить передаточную функцию (1), к которой следует стремиться, её называют желаемой и обозначают  $W_{жс}^p(p)$ . В ней имеется малая постоянная времени



неизменяемой части  $T_2$ , она называется некомпенсируемой и обозначают как  $T_\mu$ .

На практике используется два типа передаточной функции, которые соответствуют настройке контура на:

***Технический или модульный оптимум (МО).***

$$W_{MO}(p) = \frac{1}{a_\mu T_\mu^2 p^2 + a_\mu T_\mu p + 1}$$

***Симметричный оптимум (СО).***

$$W_{CO}(p) = \frac{4T_\mu p + 1}{a_c T_\mu^3 p^3 + a_c T_\mu^2 p^2 + a_c T_\mu p + 1} \quad (a)$$

$a_\mu, a_c$  — коэффициенты настройки на МО и СО.

Постоянную времени  $T_\mu$  рассмотрим, как некомпенсированную постоянную времени апериодического звена. Если в реальном контуре находится несколько апериодических звеньев с малой постоянной времени  $T_1, T_2, T_3 \dots T_n$ , то тогда вводят понятие эквивалентного апериодического звена с постоянной времени  $T_{\mu\partial} = T_1 + T_2 + \dots + T_n$ .  $W_{\mu\partial}(p) = \frac{1}{T_{\mu\partial} p + 1}$

## 12. Модульный оптимум (МО) настройки контуров.

Суть данного метода заключается в приближении свойств реального контура к желаемому, который описывается передаточной функцией (1). Свойства модели (1) сравнительно легко исследовать. А выбором значения  $a_m$  можно придать модели желаемое перерегулирование и время переходного процесса. Обычно значение  $a_m$  находится в пределах от 1 до 4. Чаще всего его принимают равным 2 и это называется **стандартным коэффициентом настройки контура на МО**.

Для исследования свойств контура описываемого (1), представим (1) в виде колебательного звена

$$W_{MO}(p) = \frac{1}{T_2^2 p^2 + 2 \xi T_e p + 1} \quad (2)$$

$T_e = T_\mu + \sqrt{a_m}$  – эквивалентная постоянная времени колебательного звена.

$$\xi = \frac{\sqrt{a_m}}{2} \text{ – коэффициент затухания колебания.}$$

Известно, что частота колебания в рассмотренном звене определяется постоянной времени  $T_e$  и может быть найдена из решения знаменателя (2)

$$P_{1,2} = -\frac{2\xi T_e}{2T_e^2} \pm \frac{2T_e \sqrt{\xi^2 - 1}}{2T_e} = \frac{\xi}{T_e} \pm \frac{1}{T_e} \sqrt{\xi^2 - 1}$$

Параметр  $a_m$  позволяет задать нужную частоту колебаний, и частота колебаний будет определяться выражением:

$$W_k = \frac{1}{T_e} \sqrt{\xi^2 - 1} = \frac{1}{T_\mu \sqrt{a_m}} \sqrt{\xi^2 - 1}$$

Из последнего выражения видно, что  $W_k$  зависит от  $a_m$  и это даёт возможность достичь  $W_z$  (частота затухания). Именно на этом основании рекомендуется принимать  $a_m$  от 1 до 4, что соответствует  $\Delta L = 0,15$  при  $a_m = 1$ ,  $\sigma = 50\%$  (перерегулирование), а при  $a_m = 4$   $\sigma = 0\%$ . В последнем случае переходный процесс будет монотонным и длительным. Но нам нужно, чтоб

быстродействие контура было максимальным, поэтому рекомендуется принимать  $a_m = 2$ , что является компромиссным решением: колебательность есть, но она мала

$$a_m = 2, \sigma = 4,3\%, t_p = 8,4T_\mu$$

Эта настройка является приемлемой для многих технических систем, поэтому иногда настройки на модульный оптимум называют еще на технический.

### 13. Симметричный оптимум (СО) настройки контуров.

Настройка на СО связана с использованием желаемой передаточной функцией вида (а). Переменным параметром является коэффициент  $a_c$ , его значение выбирается в пределах от 3,5 до 8. При  $a_c=8$ , это **стандартная настройка контура**.

Основные показатели передаточного процесса контура при настройке на СО:

$$t_p = 16,5T_\mu, \quad t_n = 3,1T_\mu, \quad \sigma = 43\%$$

Значит перерегулирование и малое время  $t_n$  связано с наличием желаемой передаточной функции форсирующего звена  $(4T_\mu p + 1)$

С целью уменьшения  $\sigma$  рекомендуется дополнить передаточную функцию (а) звеном фильтра:

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi p + 1}, \quad \text{где } T_\phi = 4T_\mu$$

Тогда

$$W_{CO+\phi}(p) = \frac{1}{8T_\mu^3 p^3 + 8T_\mu^2 p^2 + 4T_\mu p + 1} \quad (3)$$

Соответственно переходный процесс

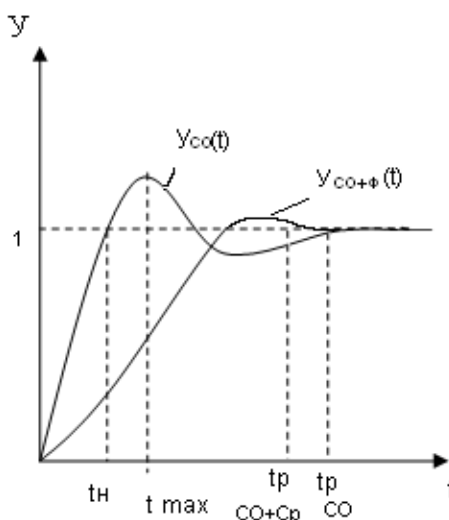


Рисунок 21 – Сравнение переходных процессов САУ, настроенных на СО и СО + фильтр

Ввод фильтра позволяет значительно улучшить качество переходного процесса. Перерегулирование получается  $\sigma = 1\%$  вместо  $43\%$ ,  $t_p = 13,3T_\mu$  вместо  $t_p = 16,5T_\mu$ .

#### 14. Синтез регуляторов, настроенных на МО в системах подчиненного регулирования.

Система подчиненного регулирования представляет собой многоконтурную систему с каскадным включением регуляторов. При этом число регуляторов и контуров регулирования равно числу регулируемых параметров. Название системы объясняется тем, что выходной сигнал регулятора, включенного во внешний контур, является задающим для регулятора, включенного во внутренний контур, т. е. один регулятор подчинен другому.

##### Синтез регуляторов настройки на МО.

Синтез начинают с внутреннего контура, затем переход ко второму, к третьему и т.д. Уравнение синтеза составляют на основе эквивалентного, эталонного и синтезируемого контуров. Первая выглядит  $W_{MO}^p(p)$ , вторая передаточная функция представлена следующим произведением передаточных функций:  $W_p^{MO}(p) \cdot W_\mu(p) \cdot W_{oy}(p)$

$$\underbrace{\hspace{10em}}_{W_{Hr}(p)}$$

$W_\mu(p)$  — передаточная функция апериодического звена малой, некомпенсированной постоянной времени  $T_\mu$ .

$W_p^{MO}(p)$  — передаточная функция регулятора, обеспечивающая настройку на МО.

Желаемая ПВ:

$$W_p^{MO}(p) \cdot W_\mu(p) \cdot W_{oy}(p) = \frac{1}{a_\mu T_\mu p (T_\mu p + 1)} = W_{MO}^p(p) \quad (1)$$

Найдём передаточную функцию регулятора

$$\begin{aligned} W_p^{MO}(p) &= \frac{1}{a_\mu T_\mu p (T_\mu p + 1)} \cdot \frac{1}{W_\mu(p) \cdot W_{oy}(p)} = \\ &= \frac{1}{a_\mu T_\mu p (T_\mu p + 1)} \cdot \frac{1}{\frac{1}{T_\mu p + 1} \cdot W_{oy}(p)} = \frac{1}{a_\mu T_\mu p \cdot W_{oy}(p)} \end{aligned} \quad (2)$$

Физический смысл равенства (2) заключается в том, что регулятор в составе своей передаточной функции должен содержать обратную передаточную функцию неизменяемой части и, следовательно, компенсировать инерционные свойства неизменяемой части.

В результате реализации передаточной функции (2) получим синтез контура, передаточная функция которого в разомкнутом виде имеет вид:

$$W_{МОсинт}^p(p) = W_{МО}(p) \cdot W_{\mu}(p) \cdot W_{oy}(p) = \\ = \frac{1}{a_{\mu} T_{\mu} p \cdot W_{oy}(p)} \cdot \frac{1}{T_{\mu} p + 1} \cdot W_{oy}(p) = \frac{1}{a_{\mu} T_{\mu} p \cdot (T_{\mu} p + 1)}$$

Контур, содержащий интегральное звено и апериодическое звено с постоянной времени  $T_{\mu}$ . Переходные процессы будут быстрыми, так как  $T_{\mu}$  мало. Приближенные решения определены тем, что:

- Передаточная функция  $W$  неизменяемой части может иметь высокий порядок, а порядок регулятора ограничен вторым
- При реализации регулятора требуется выполнение условия физической реализации регулятора.

Диапазон регулирования скорости 1: 20-30 (отношение максимальной к минимальной скорости) это достаточно мало.

## 15. Синтез регуляторов, настроенных на СО в системах подчиненного регулирования.

Система подчиненного регулирования представляет собой многоконтурную систему с каскадным включением регуляторов. При этом число регуляторов и контуров регулирования равно числу регулируемых параметров. Название системы объясняется тем, что выходной сигнал регулятора, включенного во внешний контур, является задающим для регулятора, включенного во внутренний контур, т. е. один регулятор подчинен другому.

$$W_p^{CO}(p) \cdot W_\mu(p) \cdot W_{oy}(p) = \frac{4T_\mu p + 1}{a_c T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)} \quad (3)$$

$$W_p^{CO}(p) = \frac{4T_\mu p + 1}{a_c T_\mu^2 p^2 (T_\mu p + 1)} \cdot \frac{1}{W_\mu \cdot W_{oy}(p)} = \frac{4T_\mu + 1}{a_c T_\mu^2 p^2 \cdot W_{oy}(p)} \quad (4)$$

Переходный процесс будет протекать быстро  $t_p \approx 3T_\mu$ , но с большим перерегулированием. **Настройка на СО** используется в тех случаях, когда требуется значительный диапазон изменения скоростей 1:10000, а требования **к качеству системы не очень высоки.**

### Области применения на МО и СО:

Определены особенностями желаемых передаточных функций и особенностями контуров. Начнем рассмотрение с контура тока. В его состав входят регулятор, транзистор или тиристорный преобразователь и неизменная часть. При невысоких требованиях точности все три контура настраивают на МО. Время регулирования  $t_p \cong 9T_{\mu n} \cong 18T_{\mu c} \cong 36T_{\mu m}$ ,  $\sigma = 8\%$ .

**При понижении требований точности** целесообразно настраивать контур скорости и положения на **СО**, а контур тока на МО, тогда  $t_p \cong 17T_{\mu n} \cong 34T_{\mu c} \cong 68T_{\mu m}$ ,  $\sigma = 8\%$ .



## 16. Синтез регулятора контура тока, настроенного на МО

(у нас это было синтез СУ на основе ДПТ)

Электроприводы постоянного тока выпускают как двухконтурные системы. Имеется внутренний контур тока, и внешний контур скорости. Регулируемой координатой является скорость вращения якоря, которую изменяют путём изменения направления **тока** на якоре. В свою очередь, постоянное регулируемое направление получают с преобразователей, как тиристорных, так и транзисторных.

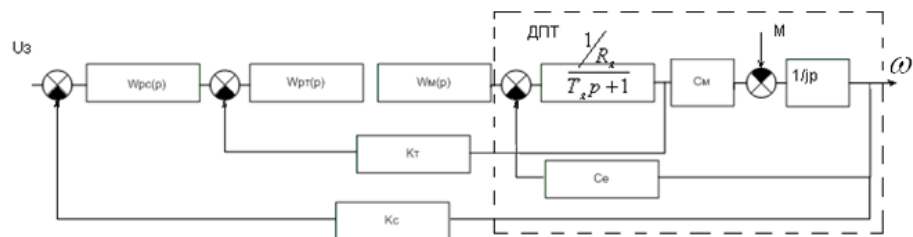


Рисунок 22 – Операторно-структурная схема электропривода на ДПТ

Расчет начинают с внутреннего контура тока, при этом противоЭДС пренебрегают, это обратная связь с  $C_e$ , для упрощения модели обычно контур настраивают на МО.

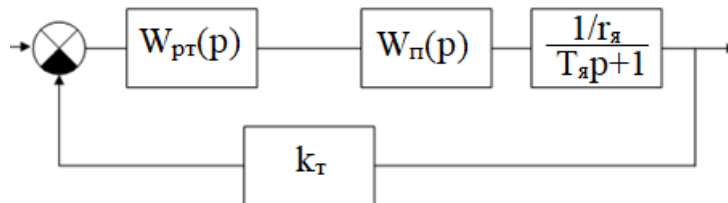


Рисунок 23 – Внутренний контур (контур тока)

Пусть в качестве преобразователя будет

$$W_{mn}(p) = \frac{k_{mn}}{T_{mn}p + 1}$$

$T_{mn}$  – некомпенсированная постоянная времени

$T_{\mu n} = T_{mn}$ , причем  $T_{mn}$  нам известно.

Для определения структуры и параметров регулятора, составим уравнение синтеза:

$$W_m^p(p) = W_{m\text{мо}}^p(p)$$

$W_m^p(p)$  – передаточная функция контурного тока, разомкнутая

$$W_{pm}(p) \cdot W_{mn}(p) \cdot \frac{1/R_\gamma}{T_\gamma p + 1} \cdot k_m = \frac{1}{a_{\mu m} T_{\mu m} p (T_{\mu m} p + 1)} \quad (1)$$

$$W_{pm}(p) = \frac{1}{a_{\mu m} T_{\mu m} p (T_{\mu m} p + 1)} \cdot \frac{T_\gamma p + 1}{W_{mn}(p) \cdot \frac{1/R_\gamma}{R_m}} = \frac{T_\gamma p + 1}{a_{\mu m} \frac{k_m \cdot k_{mn}}{R_\gamma} T_{\mu m} p} \quad (2)$$

$T_{um}$  – постоянная времени интегрирования, равная  $T_{um} = a_{\mu m} \cdot \frac{k_m \cdot k_{mn}}{R_\gamma}$

$k_{pm}$  – коэффициент передачи регулятора тока, равная  $k_{mn} = \frac{T_\gamma}{T_{um}}$

$$W_{pm}(p) = \frac{T_\gamma p + 1}{T_{um} p} = \frac{T_\gamma}{T_{um}} + \frac{1}{T_{um} p} = k_{pm} + \frac{k_{um}}{p} \quad (3)$$

Где  $k_{um} = \frac{1}{T_{um}}$

Переходные характеристики, получаемые при разной настройке:

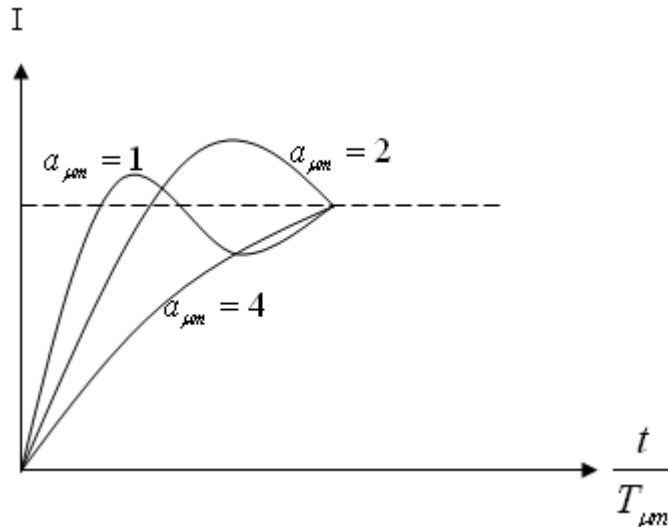


Рисунок 24 – Переходные характеристики внутреннего контура тока при разной настройке на МО

При  $a_{\mu m} = 4$  переходный процесс является монотонным, и его длительность составляет  $14\mu T$

$$W_{кзм}^3(p) = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{1}{a_{\mu m} T_{\mu m}^2 p^2 + a_{\mu m} T_{\mu m} p + 1} \quad (4)$$

Обратная связь по току реализуется с помощью специальных резисторов, шунтов включается в токовую цепь якоря, эти резисторы

характеризуются вторым током.  $I_n$  (номинальный ток двигателя, и характеризуется  $U_{2n}$  выхода сопротивления щита).

Дальше это напряжение усиливается:

$$k_m = \frac{U_{m\max}}{T_{1\max}} = 8B$$

Полученное выражение (4) является достаточно точной моделью постоянного контура тока, но оно не может быть использовано в процедуре синтеза контура скорости, как  $\omega_{кз}$ .

Там должно присутствовать апериодическое звено

$$\omega_{hr}(p) = \frac{k}{T_p + 1} \quad (5)$$

Поэтому необходимо аппроксимировать выражение (4) выражением (5). В результате получим выражение (6):

$$W_{кзм}^3(p) = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{1}{a_{\mu m} T_{\mu m} p + 1} \quad (6)$$

## 17. Синтез регулятора контура скорости, настроенного на МО

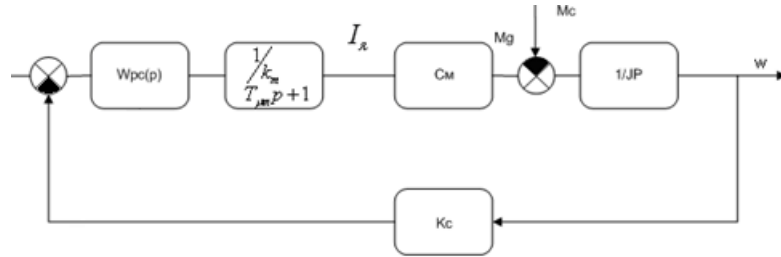


Рисунок 25 – Внешний контур (контур скорости)

$$T_{\mu c} = a_{\mu m} T_{\mu m}$$

Настройка тока скорости на МО используется при допустимом низком диапазоне изменения скорости и сравнительно высоких показателях качества.

В контуре сделано два упрощения:

- Не учтена противоЭДС, т.к. она инерционна по сравнению с процессами в контуре скорости;
- ПФ контура тока аппроксимирована дробью первого порядка (формула 6 из вопроса 16, а также на схеме, откуда выходит  $I_a$ ).

ОУ для контура скорости является механическая часть двигателя, которая описывается произведением:  $C_m \cdot \frac{1}{J \cdot p}$

Примем, что передаточная функция скорости должна быть вот такого вида:

$$W_{MOC}(p) = \frac{1}{a_{\mu c} T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)}$$

Найдем передаточную функцию регулятора из уравнения синтеза:

$$W_{pc}^M(p) \cdot \frac{1/k_m}{T_{\mu c} p + 1} \cdot C_m \cdot \frac{k_c}{JP} = \frac{1}{a_{\mu c} T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)}$$

$$W_{pc}^M(p) = \frac{1}{a_{\mu c} T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)} \cdot \frac{1}{\frac{1}{k_m} / (T_{\mu c} p + 1)} \cdot \frac{JP}{C_m} = \frac{J \cdot k_m}{a_{\mu c} T_{\mu c} C_m k_c} = k_{pc} \quad (7)$$

Настройка на МО контура скорости требует применение пропорционального регулятора, значение коэффициента передачи, которого определена нулём выражения (7).

## 18. Синтез регулятора контура скорости, настроенного на СО.

Найдем передаточную функцию замкнутого контура скорости

$$W_{\text{МОС}}^3(p) = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{1}{a_{\mu c} T_{\mu c}^2 p^2 + a_{\mu c} T_{\mu c} p + 1}$$

Синтез контура скорости рассмотрим на СО

$$\begin{aligned} W_{pc}^c(p) \cdot W_{km}(p) \cdot W_{Hr}(p) \cdot k_c &= \frac{4T_{\mu c} p + 1}{a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2 (T_{\mu c} p + 1)} \\ W_{pc}^c(p) &= \frac{4T_{\mu c} p + 1}{a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2 (T_{\mu c} p + 1)} \cdot \frac{1}{\frac{k_m}{T_{\mu c} p + 1}} \cdot \frac{1}{C_M \cdot \frac{k_c}{JP}} = \\ &= \frac{4T_{\mu c} p + 1}{a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2} \cdot k_m \cdot \frac{JP}{C_M \cdot k_c} = \frac{4T_{\mu c} p^2 J \cdot k_m}{a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2 C_M \cdot k_c} + \\ &+ \frac{k_m JP}{a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2 C_M \cdot k_c} = \frac{4k_m J}{a_{cc} T_{\mu c} C_M \cdot k_c} \cdot \frac{k_m J}{a_{cc} T_{\mu c}^2 C_M \cdot k_c} \cdot \frac{1}{p} = k_n + \frac{k_u}{p} \\ W_{kcc}^n(p) &= (k_n + \frac{k_u}{p}) \cdot \frac{1}{T_{\mu c} p + 1} \cdot C_M \cdot \frac{1}{Jp} \quad (A) \end{aligned}$$

Замкнуты контур скорости симметричного оптимума:

$$W_{kcc}^3(p) = \frac{(k_n + \frac{k_u}{p}) \cdot C_M}{(T_{\mu c} p + 1) J p k_m + (k_n + \frac{k_u}{p}) \cdot C_M \cdot k_c} = \frac{4T_{\mu c} p + 1}{a_{cc} T_{\mu c}^3 p^3 \cdot k_c + a_{cc} T_{\mu c}^2 p^2 + a_{cc} T_{\mu c} p + 1} \quad (B)$$

Из полученной передаточной функции видно, что статические и скоростные ошибки отсутствуют. Недостаток такой функции – велико значение перерегулирования.

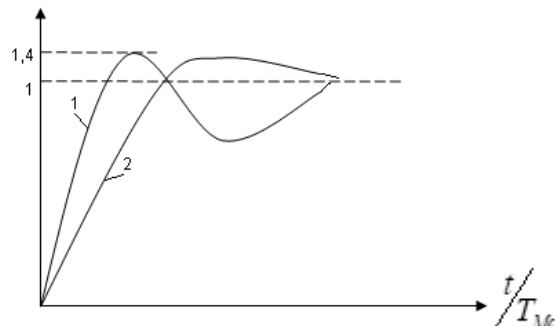


Рисунок 26 – Переходные характеристики внешнего контура скорости при разной настройке на СО, где 1 – переходный процесс без (без фильтра более колебательный) и 2 – с фильтром. Фильтр был упомянут ранее в вопросе 13.

## 19. Синтез контура положения

Третий внешний контур системы может выполнять одну из трёх функций:

1. Слежение за входным сигналом  $X$
2. Регулирование выходного сигнала  $y$
3. Стабилизацию выходного сигнала  $y$

Выделенные функции позволяют отнести систему к одному из трёх классов:

- первую относят к следящим системам,
- вторую к системам регулирования,
- третью к системам стабилизации.

Этим определяют требования по быстродействию,  $\sigma$ , точности и так далее. Также этими функциями определены требования, предъявляемые к системе:

- Первые должны иметь малое время переходного процесса, т.е. быть самыми быстрыми.
- Вторые системы связаны с обработкой входных сигналов, которые изменяются очень медленно, а время регулирования не требует минимизации.
- Система третьего класса осуществляет стабилизацию выхода, т.е. входной сигнал обычно остается постоянным, а время перехода системы из одного состояния в другое роли почти не играет. Здесь, в этом классе систем наиболее важная задача уменьшить влияние возмущения на выходную координату.

В мехатронных и робототехнических системах чаще всего используют следящие системы. Методика расчета регулятора положения сохраняется такой же, что для контура тока и скорости.

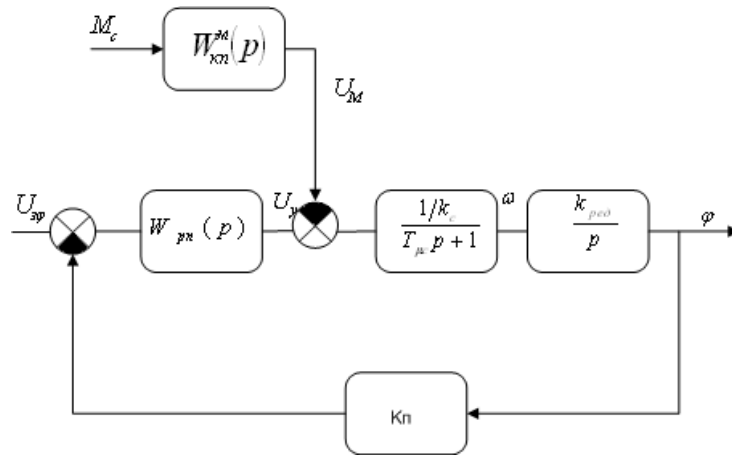


Рисунок 27 – Внешний контур положения, где  $k_{ред}$  – коэффициент

передачи редуктора,  $k_{ред} = \frac{1}{i_{ред}}$

$M_c$ : точка приложения  $M_c$  переносится из контура тока на вход контура скорости.

Контур скорости, аппроксимированный аperiодическим звеном с малой постоянной времени  $T_{\mu n}$  и коэффициентом передачи  $1/k_c$ . Величина  $k_c$  известна (это коэффициент передачи по скорости), а  $T_{\mu n}$  находится из следующих соображений:

$$T_{\mu n1} = \frac{t_{pkc}^{co}}{4} = \frac{13T_{\mu c}}{4} \approx 3,3T_{\mu c} \approx 6,6T_{\mu n}$$

$$T_{\mu n2} = \frac{t_{pkc}^{mc}}{4} = \frac{8,4T_{\mu c}}{4} \approx 2,1T_{\mu c} \approx 4,2T_{\mu n}$$

Видно, что быстродействие будет выше при настройке контура на МО.

$W_{kn}^M(p)$  – передаточная функция контура положения по моменту.

Передаточная функция регулятора находится из уравнения синтеза состояния для МО или СО.

$$W_{pn}^{MO}(p) = \frac{k_c}{k_{ред}k_n a_{mn} T_{\mu n}} = k_n^{mo}$$

$$W_{pn}^{CO}(p) = \frac{4T_{\mu p} + 1}{T_{\mu p} + 1} = k_{pn}^{co} + \frac{k_{un}}{p}$$



Как правило, контур положения является цифровым.

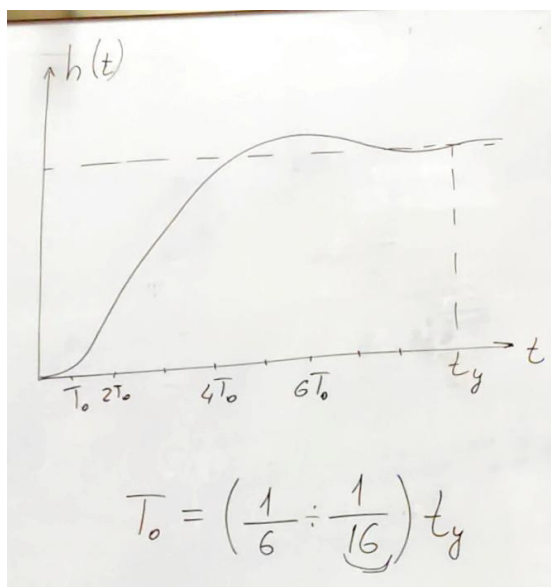
## 20. Получение дискретных регуляторов

Необходимо перейти от непрерывной ПФ к дискретной ПФ. Для пропорциональных регуляторов трудностей при переходе не возникает, а в других случаях нужно выполнить два этапа:

1. Найти частоту квантования (период). Частота квантования —  $\omega_o$ , период —  $T_o = \frac{1}{f_o} = \frac{2\pi}{\omega_o}$ . Несложно догадаться, что одно вытекает из другого.
2. По известной непрерывной ПФ и найденной частоте найти дискретную ПФ.

Первый этап может быть решён несколькими способами, хотя их идея едина:

- а) Первый способ решения этого этапа состоит в прямом использовании соотношения  $\omega_o \geq 2\omega_{\text{нп}}$  (1) [Условие Котельникова-Шеннона] с учётом реальных особенностей, позволяющих уменьшить величину  $\omega_o$ .
- б) Второй способ позволяет найти  $\omega_o$  или  $T_o$  по переходной характеристике регулятора. Имеем переходную характеристику регулятора:



Когда  $T_o = \frac{1}{16} t_y$  выполняется условие Котельникова-Шеннона ПФ эквивалентна непрерывной ПФ в смысле совпадения значений ПХ в тактовые моменты времени  $n \cdot T_o$ . При увеличении  $T_o$  эта эквивалентность нарушается, но экономятся вычислительные затраты.

с) Третий способ состоит в использовании таблиц соответствия  $f(p) \rightarrow f(z)$ . Применяется в случае ПФ низкого порядка.

d) Четвёртый способ — метод Тастина. Когда аргумент

$$p \cong \frac{2}{T_o} \cdot \frac{z-1}{z+1}.$$

## 21. Вентильные электроприводы. Принцип действия вентильного двигателя.

Вентильные двигатели также называются сервоприводами, бесконтактными двигателями постоянного тока.

Электродвигатели постоянного тока (ДПТ) имеют ряд недостатков, связанных с наличием коллекторно-щёточного узла. Среди них малый срок службы. Решить эту проблему можно заменой коллекторно-щёточного узла полупроводниковым коммутатором.

Отличительной особенностью вентильного двигателя (ВД в дальнейшем) является наличие датчика положения ротора (ДПР), по сигналам которого происходит переключение фаз обмотки статора (якорь).

Строение ВД:

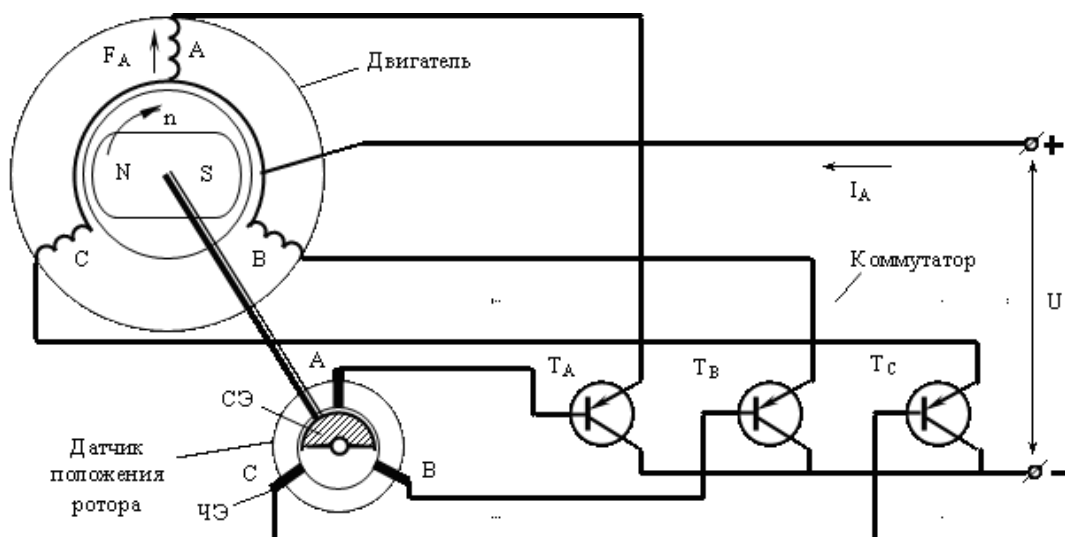


Рисунок 1

ЧЭ - чувствительный элемент, СЭ - сигнальный элемент.

Вентильный двигатель — синхронный двигатель из-за синхронного вращения векторов ротора и статора. Его этапы работы:

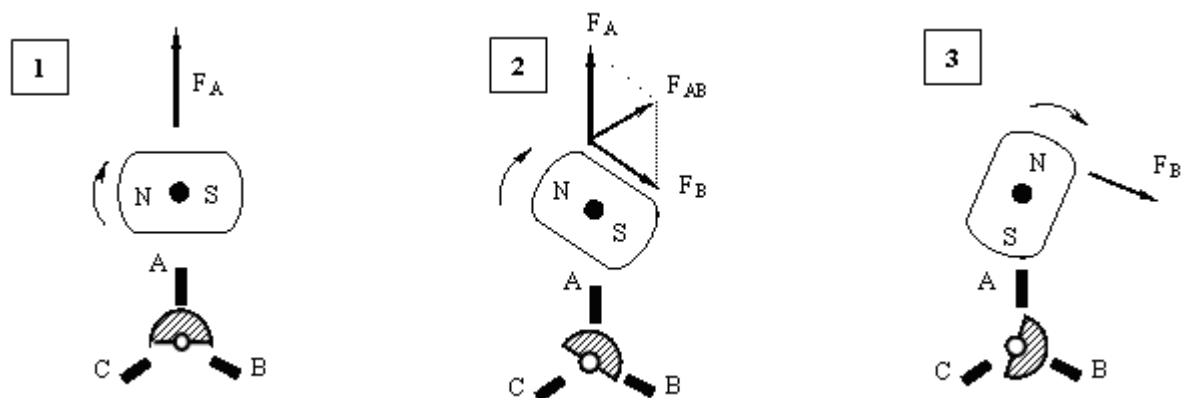


Рисунок 2

В положении, показанном на рис.1, сигнальный элемент через чувствительный элемент "А" открывает транзистор  $T_A$ . По обмотке А протекает ток  $I_A$ . Намагничивающая сила обмотки  $F_A$  взаимодействует с потоком постоянного магнита ротора. Возникает вращающий момент, и двигатель приходит во вращение (1-й такт на рис. 2). Вместе с ротором поворачивается и СЭ ДПР. При повороте ротора на угол чуть больший  $30^\circ$  СЭ будет воздействовать сразу на два ЧЭ: на "А" и на "В". Это значит, что будут открыты сразу два транзистора:  $T_A$  и  $T_B$ . Ток будет протекать по обеим обмоткам А и В. Появится результирующая НС статора  $F_{AB}$ , которая повернется на  $60^\circ$  по сравнению с первым положением (2-й такт на рис. 2).

Эта НС продолжает взаимодействовать с полем постоянного магнита; двигатель продолжает развивать вращающий момент.

Когда угол поворота станет чуть больше  $90^\circ$ , транзистор  $T_A$  закроется, ток будет проходить только по обмотке В. Поле ротора будет взаимодействовать только с НС этой обмотки, однако вращающий момент по-прежнему будет воздействовать на ротор двигателя и вращать его в том же направлении (3-й такт на рис. 2). В конечном итоге двигатель разовьет такую скорость, при которой его момент будет уравниваться моментом нагрузки.

#### *Особенности работы*

В ВД число обмоток не превышает трёх или четырёх. Это обуславливает ряд особенностей работы ВД.

Одна из таких особенностей — Пульсация вращающего момента. Возникает вследствие скачкообразного изменения ЭДС статора при переключении обмоток.

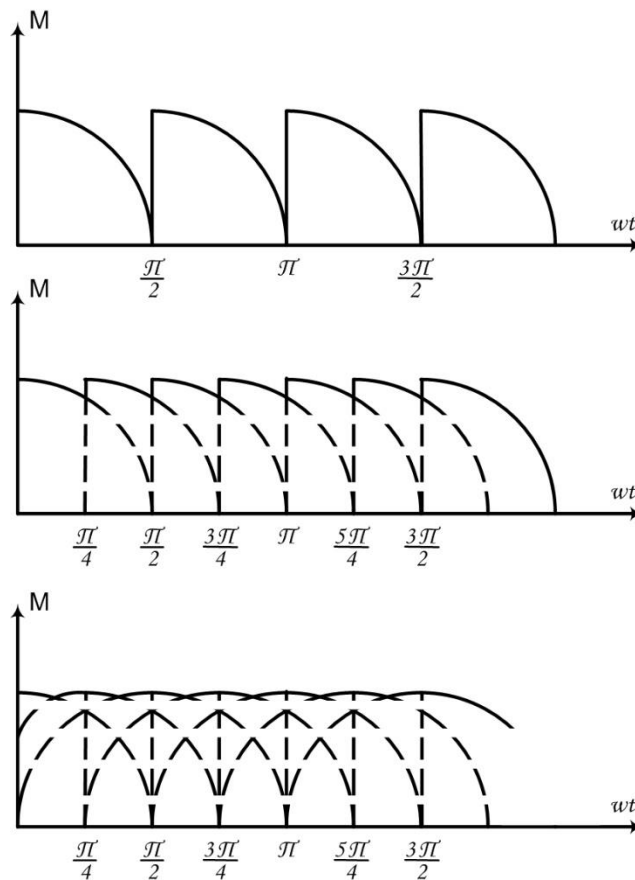


Рисунок 3

Первая картинка возникнет тогда, когда сигнальный элемент перекрывать только один чувствительный элемент, то есть всегда открыт только один транзистор (не наш случай).

Снижение пульсаций можно добиться, расширив зону действия сигнального элемента до  $\pi$ . В этом случае через каждые  $\pi/4$  одновременно включены обе фазы — Рисунок 2. Это уже наш случай, т.е. соответствует ВД, что был отображён на рисунке 1. Здесь открывается 1 транзистор, потом 1 и 2, потом 2, потом 2 и 3 и т.д.

Третья картинка для нашего случая — это сдвиг.

Учитывая синусоидальное распределение кривой момента каждой катушки, в зависимости от положения ротора, кривую момента можно ещё сгладить путём сдвига чувствительных элементов на угол  $\pi/8$ , это третий

рисунок. Проблема пульсации момента имеет значение только на малых скоростях, особенно для безредукторных приводов.

#### *Механические характеристики*

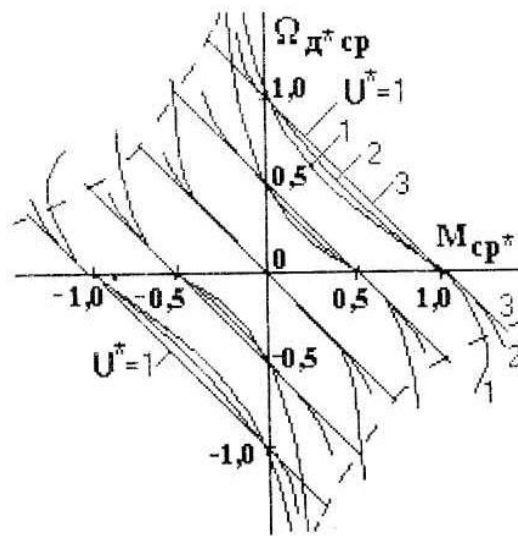


Рисунок 4

Прямая линия, проходящая через 0 — чистый ДПТ, а вот ВД очень к нему близок, но чутка всё же отличается. Имеют место быть лёгкие нелинейности, которые настолько незначительны, что при расчётах его считают, как ДПТ, то есть нелинейностями пренебрегают.

На рисунке 4 штриховыми линиями обозначена граница устойчивости.

Современные вентильные двигатели имеют большую перегрузочную способность, то есть момент пуска больше в 5-9 раз, чем номинальный. Это связано с использованием редкоземельных постоянных магнитов, NiFeB. В большинстве случаев можно считать, что механические характеристики ВД совпадают с ДПТ.

Следующая особенность ВД — пульсация токов в обмотке статора и суммарного тока двигателя. Также как и пульсация моментов, объясняется дискретным питанием обмоток.

Последняя особенность — большая индуктивность обмоток статора. В обычном двигателе секции якоря маловитковые, т.е. если даже ДПТ рассматривать, то каждая секция содержит мало витков, а здесь [в ВД] — много. Индуктивность таких секций большая. В ВД общее число витков якоря

разбивается на три или четыре обмотки (секции). В результате секции получаются многовитковыми, и обладают большой индуктивностью. Индуктивность примерно сопоставима с такой вот величиной:  $L \approx w^2$  (число витков в квадрате).



## 22. Управление скоростью вентильного двигателя.

В качестве управляющего воздействия для вентильных электродвигателей, также, как и для двигателей постоянного тока, используются изменение напряжения питания фаз путём применения импульсных способов управления (ШИМ).

Т.к. вентильный двигатель — это синхронный двигатель, то мы должны реализовывать закон синусоиды на его обмотках. Итак, рассмотрим одну из обмоток (фаза А). По сигналу ДПР мы видим, что нам необходимо коммутировать фазу А, заполняем её ШИМом. Сжимаем синусоиду — скорость увеличивается.

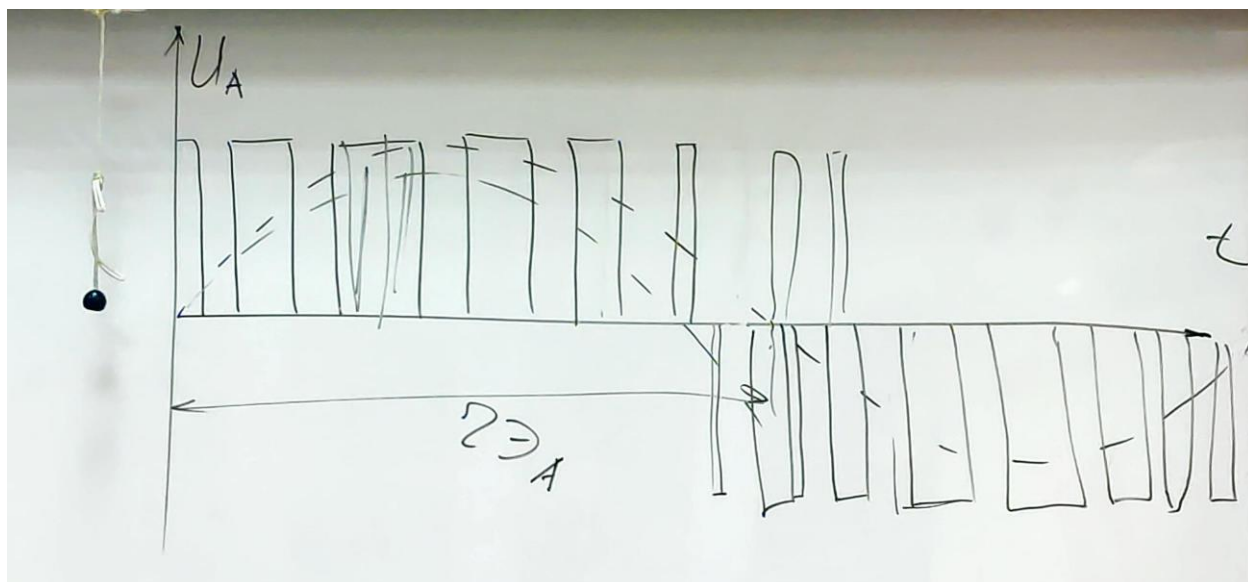
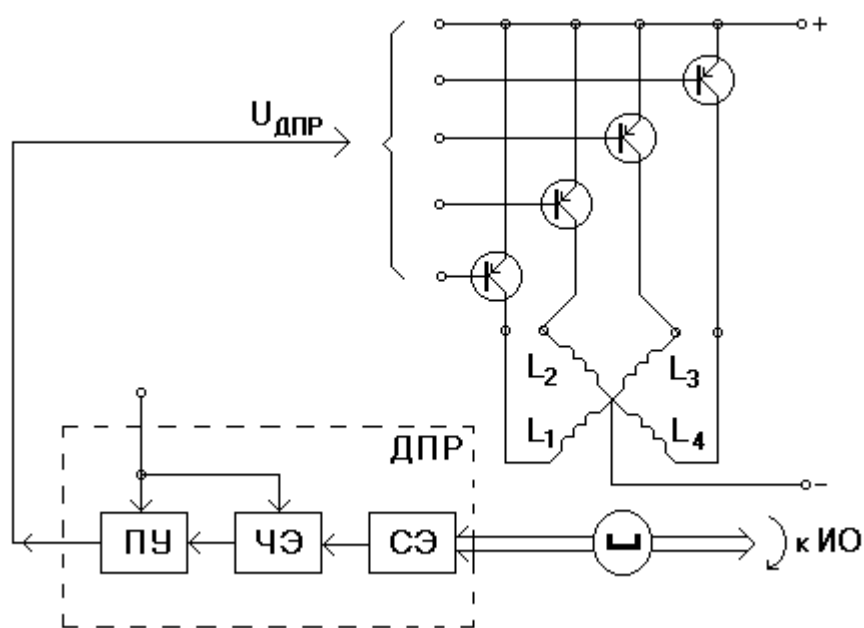


Рисунок 1 — ШИМ в обмотке двигателя

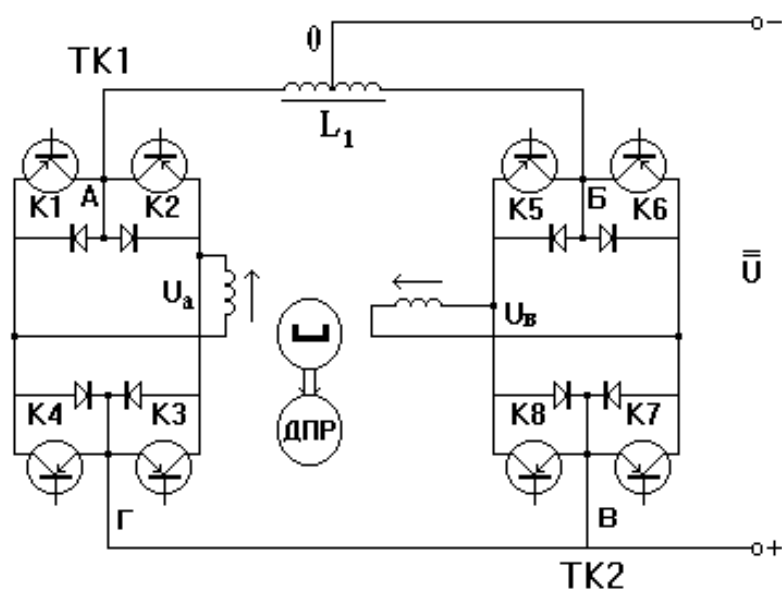
*Силовые схемы*

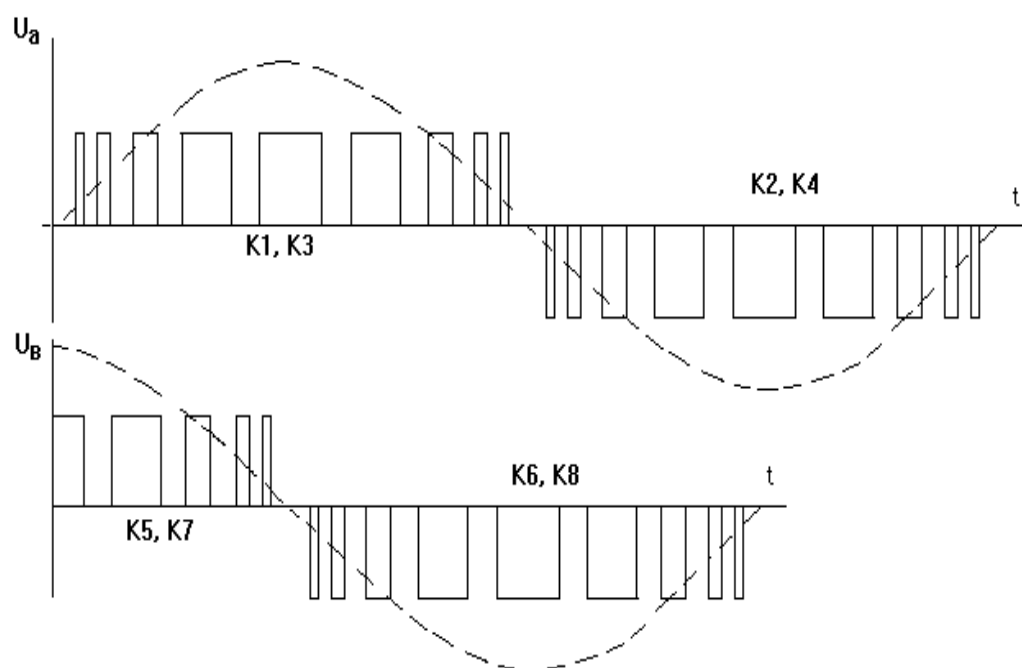
4 фазы, 4 транзистора, 4 обмотки:



ПУ — преобразующее устройство, вырабатывающее сигналы для управления транзисторами.

Две фазы, 8 транзисторов, автономный инвертор тока:





*Как будто чего-то не хватает, но, судя по моему конспекту, Каранкевич особо силовые схемы не комментировал.*

### 23. Шаговый электропривод. Принцип действия шагового электродвигателя.

Шаговые двигатели — это электромеханические устройства, преобразующие сигнал управления в угловое или линейное перемещение ротора с фиксацией его в заданном положении без устройств обратной связи.

ШД являются синхронными двигателями с возбуждёнными и невозбуждёнными роторами (т.е. с постоянными магнитами на роторе или с железом).

#### *Принцип работы*

При подаче постоянного напряжения на обмотку управления возникает магнитный поток, примерно вдвое больший, чем поток постоянных магнитов. Под действием электромагнитного усилия, создаваемого этим потоком, ротор поворачивается, преодолевая нагрузочный момент и момент, развиваемый постоянными магнитами, стремясь занять положение соосное с полюсами управляющей обмотки. Поворот происходит в сторону клювообразных выступов, т.к. магнитное сопротивление между статором и ротором в этом направлении меньше, чем в обратном.

В следующем такте напряжение выключается и двигатель поворачивается ещё на 90 градусов, потом включается противоположное напряжение, ещё на 90, выключается, ещё на 90, ну идею поняли.

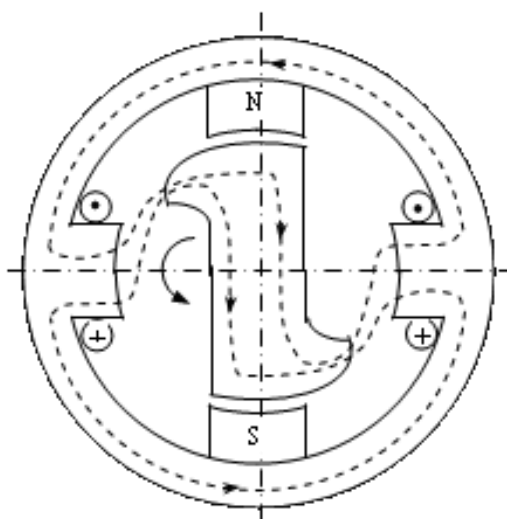
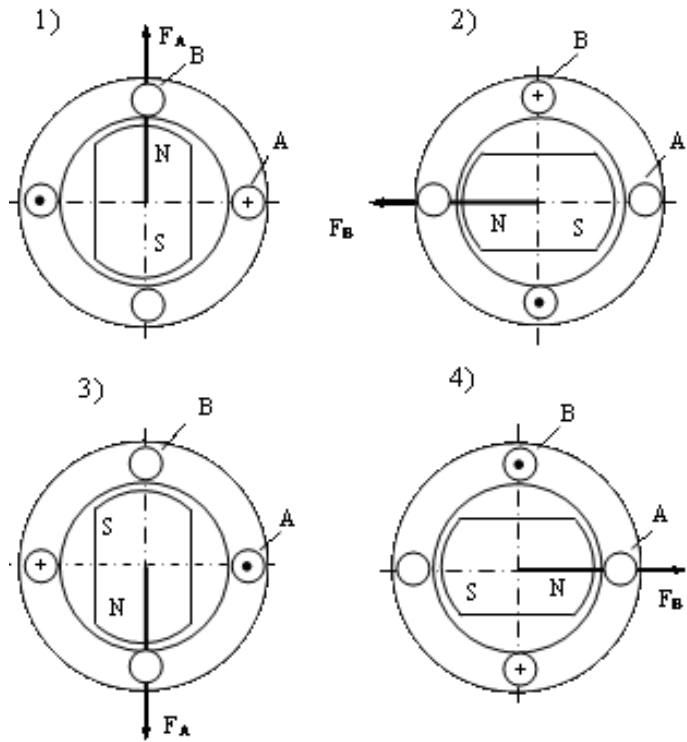


Рисунок 1 — Простейший однофазный ШД

Для того, чтобы имела возможность крутиться в разные стороны, рассмотрим следующую конструкцию



Рассмотренный способ переключения обмоток можно представить в виде таблицы 1.

Таблица 1

Полярность импульсов	Такты коммутации			
	1	2	3	4
+U <sub>A</sub>				
+U <sub>B</sub>				
-U <sub>A</sub>				
-U <sub>B</sub>				

Такой же шаг двигателя, но в√2 большее значение момента (т.е. намагничивающей силы) можно получить, если обмотки подключать в соответствии с таблицей 2.

Таблица 2

Полярность импульсов	Такты коммутации			
	1	2	3	4

$+U_A$	X			X
$+U_B$	X	X		
$-U_A$		X	X	
$-U_B$			X	X

Шаг двигателя можно уменьшить в два раза, если обмотки переключать в соответствии с таблицей 3.

Полярность импульсов	Такты коммутации							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$+U_A$	X	X						X
$+U_B$		X	X	X				
$-U_A$				X	X	X		
$-U_B$						X	X	X

В зависимости от типа электронного коммутатора управление ШД может быть:

1. Однополярным и разнополярным.
  - а. Однополярное — напряжение меняется от 0 до  $+U$
  - б. Разнополярное — напряжение меняется от  $-U$  до  $+U$
2. Симметричным и несимметричным.
  - а. При симметричном в каждом такте задействуется одинаковое число обмоток.
  - б. Соответственно не одинаковое число.
3. Потенциальным или импульсным.
  - а. Потенциальное — напряжение на обмотках изменяется только в моменты поступления управляющих импульсов. При отсутствии управления обмотка или группа обмоток находится под напряжением, и ротор фиксируется полем этих обмоток.
  - б. Импульсное — напряжение на обмотки подаётся только на время обработки шага или шагов, после чего оно снимается.

Число устойчивых положений в пределах одного оборота  $n$ , число фаз  $m$ .

1. При однополярной коммутации и симметричном управлении  $m = n$
2. При разнополярной и симметричном управлении  $n = 2m$
3. При несимметричной и разнополярной  $n = 4m$

В многополюсных ШД число устойчивых положений растёт прямопорционально с числом пар полюсов —  $p$ . Тогда, шаг ротора, т.е. угол поворота  $\alpha$  определится следующим образом:  $\alpha = \frac{360^\circ}{p \cdot n}$ .

Двигатели, которые были рассмотрены, удаётся выполнить с шагом до 15 градусов, меньше уже трудно. Дальнейшее уменьшение ограничено технологическими трудностями.

## 24. Редукторные ШД.

Гораздо более мелкий шаг (до долей градуса) можно получить в редукторных (индукторных) ШД.

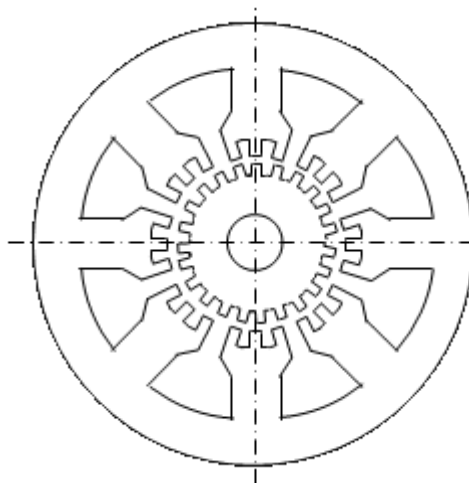


Рисунок 1

Редукторные ШД выполняются с числом фаз  $m = 2, 4$ . Они имеют зубчатый ротор с равномерно расположенными  $z_p$  зубцами и гребенчатые зоны статора, смещенные относительно друг друга на угол  $\frac{2p}{m \cdot z_p}$ .

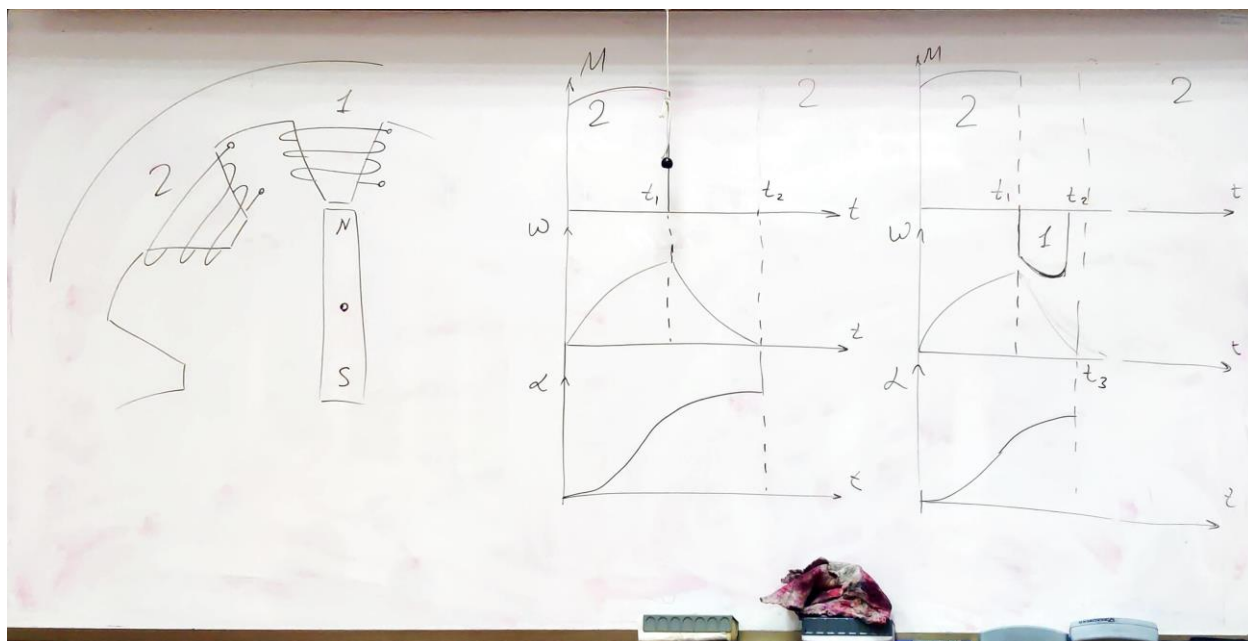
Число пазов статора и ротора, их геометрические размеры выбираются такими, чтобы обеспечить необходимую величину шага и синхронизирующий момент при заданном виде коммутации токов.

Для картинки выше имеется 8 всего фазных выступов статора, при переключении обмоток поле статора поворачивается на 45 градусов. Ротор же, при общем числе зубцовых делений на статоре 28 и на роторе 30, поворачивается всего на 3 градуса.



## 25. Особенности динамики работы ШД, отработка единичного шага.

Рассмотрим пару фаз ШД. Есть моменты, когда колебания ротора недопустимы, во всевозможных микро- и нановещах. И тогда мы хотим не допустить колебания ротора.



Для этого нам нужно выключить 1 и включить 2, но ротор начнёт колебаться. Для исключения колебаний используют старт-стопное управление. Суть метода: необходимо, чтобы энергия, запасённая ротором при разгоне, была полностью израсходована в процессе торможения. Торможение может быть естественным и искусственным.

Первый способ — принудительное торможение отключаем 1, включаем 2, ротор поехал, затем мы выключаем 2 включаем 1, начинает возникать тормозной момент, ротор подтормаживается, затем снова переключаем и наконец ротор достигает финального положения. При принудительном торможении используется принцип максимального по быстрдействию управления. Разгон с максимальным ускорением и торможение с максимальным замедлением. (на рисунке выше он отображён тремя графиками справа)

Второй способ — по времени (естественный): отключаем 1 включаем 2, ротор поехал, затем отключаем 2, и ротор со своей инерцией едет в 2, и около 2 мы снова включаем её чтобы двигатель принял конечное положение (на рисунке выше тремя графиками слева).

## 26. Режимы работы ШД.

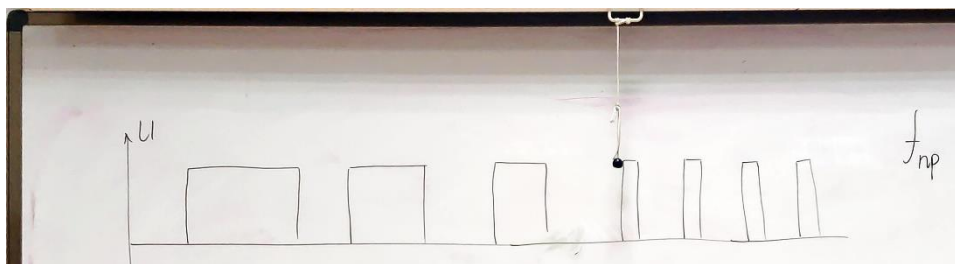
1. Статический — соответствует протеканию по одной из фаз постоянного тока, создающего неподвижное магнитное поле (и ротор тоже стоит неподвижно, логично).

2. Квзистатический — режим отработки единичных шагов. Характеризуется тем, что переходный процесс к началу следующего шага заканчивается. Т.е. скорость ротора, в начале каждого следующего шага равна 0. [Существуют технологические процессы, когда требуется чтобы двигатель отрабатывал чётко по одному шагу и следующий шаг начинается только тогда, когда все переходные процессы, колебания ротора устаканились].

3. Установившийся — соответствует постоянной частоте управляющих импульсов и непрерывному вращению ротора.

### 4. Переходный

а. Пуск — скачкообразное изменение частоты импульсов от нуля до рабочей частоты. Переходный процесс может идти с перерегулированием по скорости. Максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД без потери шага называется частотой приемистости.



б. Торможение — осуществляют скачкообразным изменением частоты импульсов до нуля. Также надо соблюдать  $f_{пр}$  — частоту приемистости.

с. Реверс — производят путём изменения последовательности коммутаций токов в фазах. Т.е. изменением направления вращения поля статора.



## 27. Асинхронный электропривод. Конструкция и принцип действия АД.

Самые распространённые двигатели в мире. Потребляют до 70% всей вырабатываемой электроэнергии. Это связано с их дешевизной и простотой в изготовлении. Цена примерно в 10-15раз ниже, чем на аналогичный по мощности двигатель ДПТ.

### *Конструкция и принцип действия*

АД состоит из двух частей: статора и ротора. Статор собирается из двух листов электротехнической стали, внутрь которой вставляется обмотка медная. Обмотка укладывается 3-фазно, выход — звезда. На эту обмотку подаётся напряжение, которое также сдвинуто на 120 градусов. Благодаря тому, что это всё сдвинуто, то внутри статора у нас появляются вектора (N и S), создающие вращения. Обмотки можно разбивать, чтобы менять количество полюсов.

Статор собирается из нескольких листов, потому что существуют токи фуко, и если делать всё из одного листа, то получится нагреватель.

Ротор состоит из листов электротех. стали, в пазы которых заливается алюминиевая обмотка по типу беличьей клетки, то есть из стержней, которые замкнуты с торцов кольцами. Из-за того, что внутри статора вращающееся магнитное поле, это поле воздействует на стержни ротора, в них начинает возникать ЭДС. В результате того, что эти стержни замкнуты накоротко, то по ним начинает течь большой ток. Вокруг них возникает магнитное поле, которое начинает взаимодействовать с полем статора, и возникает магнитодвижущая сила, которая увлекает ротор во вращение. Скорость вращения ротора немного отстаёт от скорости вращения поля статора, поэтому эти двигатели называются **асинхронными**.

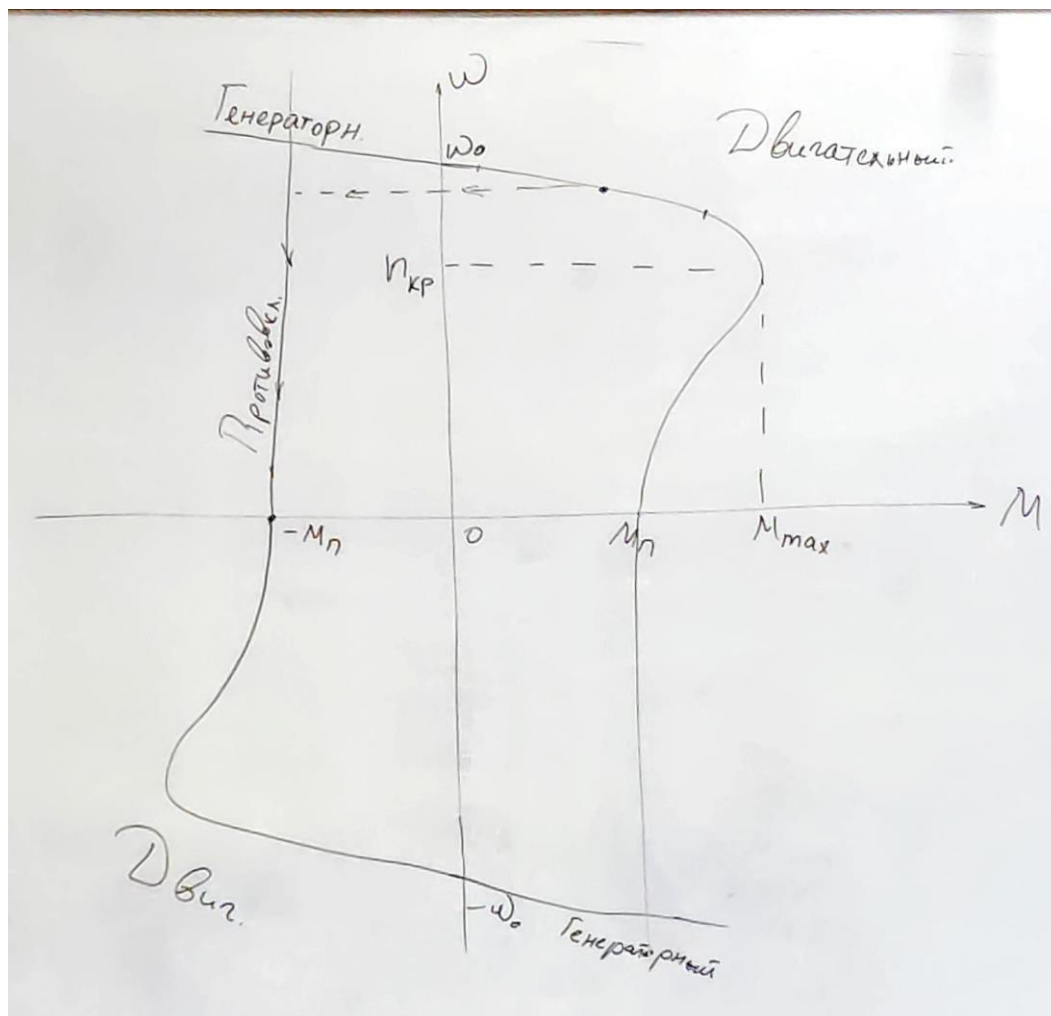
$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{2p}$$

2p	2	4	6	8	10
$n_1$ , об/мин	3000	1500	1000	750	600

Разница между частотой поля и частотой ротора называется *частотой скольжения*:  $n_s = n_1 - n_2$ .

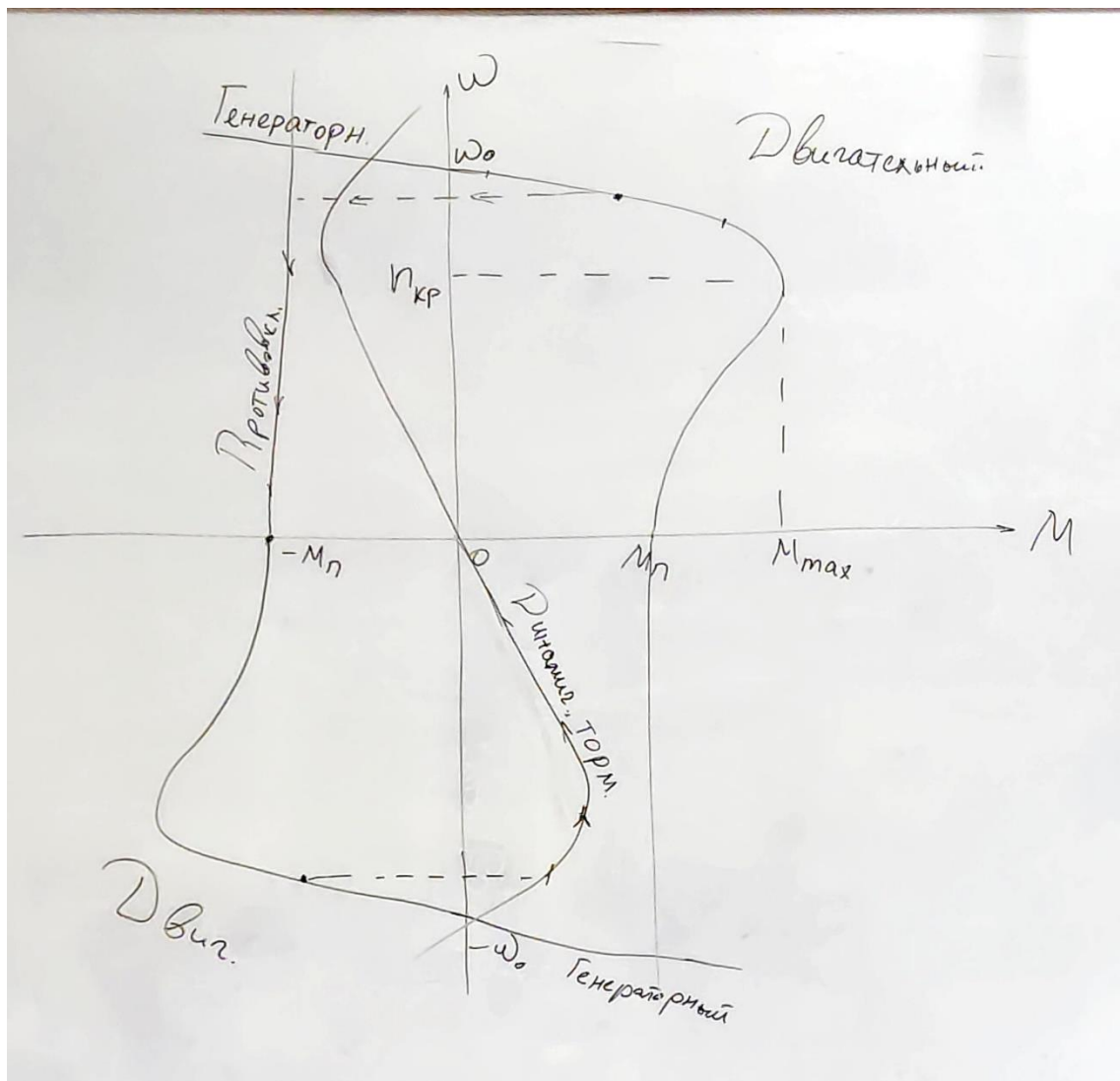
Ну и само скольжение:  $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$ . Обычно оно составляет 1-8%. Чем больше нагрузка, тем больше скольжение.

## 28. Режимы работы АД.



Рабочий диапазон линейный около  $\omega_0$  в двигательном режиме (ограничен двумя точками на рисунке).

Недостаток АД: малый пусковой момент. В тех случаях, где нужен большой пусковой момент ставят синхронный.



Режим динамического торможения применяется для быстрой остановки работающего двигателя. Реализуется путём отключения фаз статора от сети переменного тока, и одна фаза если выведен 0, или две фазы подключаются к источнику постоянного тока. В результате внутри статора возникает неподвижное магнитное поле, в котором вращается ротор. Возникает резкий тормозной момент и двигатель останавливается.



## 29. Регулирование скорости вращения АД.

Рассмотрим основную зависимость для частоты вращения ротора АД

$$\Omega = \Omega_1(1-s) = (2\pi f_1/p_{\text{пол}}) (1-s).$$

Очевидны три возможных способа регулирования частоты вращения:

- изменением частоты питающего напряжения;
- изменением числа пар полюсов машины;
- изменением значения скольжения.

*Способ переключения числа пар полюсов.* Для реализации этого способа предусматривается в обмотке статора переключение секций фаз из последовательного соединения в параллельное и наоборот (из треугольника в звезду и наоборот). Существуют АД с несколькими обмотками статора, имеющими различное число пар полюсов. Этот способ является наиболее простым, однако частота вращения изменяется дискретно. В системах автоматического регулирования этот способ применяется редко.

*Способ изменения величины скольжения.* Величина момента вращения трехфазных АД зависит от квадрата приложенного напряжения. Меняя величину напряжения, подаваемого на фазы статора АД, например, с помощью трехфазного МУ или тиристорного преобразователя, рис.13.13 для двигателя, работающего под нагрузкой, например  $M_{\text{ст1}}$ , смещаем точку установившегося режима в диапазоне  $s_{\text{н}} - s_{\text{кр}}$ . В настоящее время существует большое число различных схем включения тиристоров, позволяющих коммутировать статорные цепи АД и регулировать подводимое к двигателю напряжение.

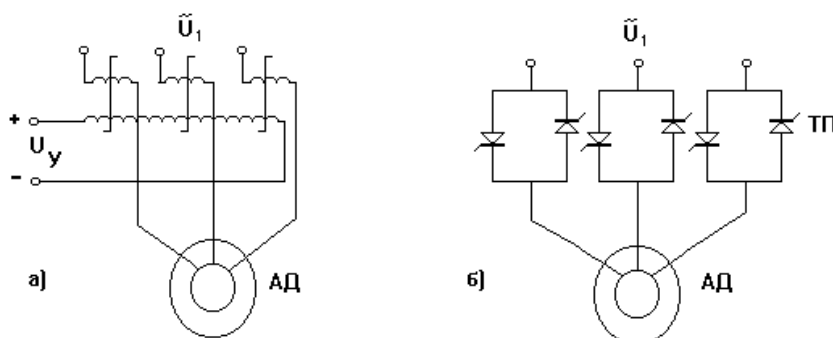


Рис.13.13

Учитывая, что в электродвигателях общепромышленного применения  $s_{н.мин} = 0,01$ , а  $s_{к.маx} = 0.15$ , этот способ дает небольшой диапазон регулирования частоты вращения ротора, рис.13.14,а. Кроме того, при тиристорном регулировании напряжения по мере увеличения угла управления тиристоров напряжение статора принимает все более импульсный характер, возникают высшие гармонические напряжения и тока, в свою очередь вызывающие повышенные тепловые и магнитные потери, а также высшие гармонические момента вращения, являющиеся тормозными по отношению к основной частоте.

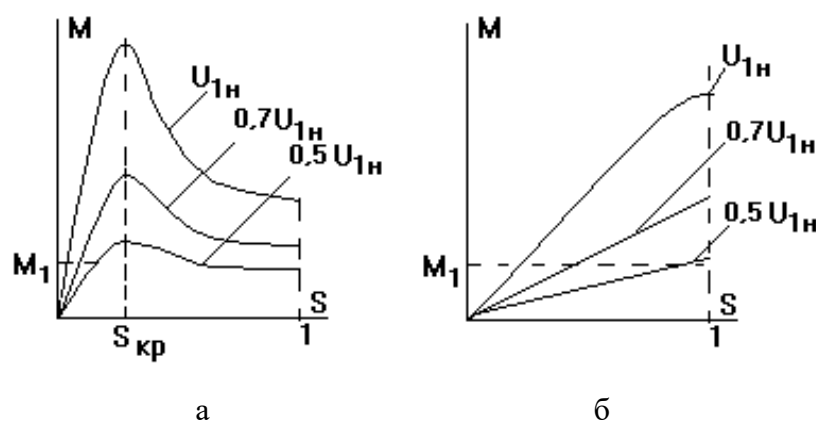


Рис.13.14

Этот способ находит широкое распространение для специальных электродвигателей с повышенным сопротивлением обмотки ротора,  $s_k > 1$ , рис.13.14,б. Для электроприводов малой мощности разработаны специальные двухфазные АД, в которых для регулирования частоты вращения применяется способ асимметричного управления.

*Способ изменения частоты питающего напряжения.* Наиболее рациональным способом плавного регулирования частоты вращения АД является частотный способ. Рассмотрим механические характеристики трехфазного АД в диапазоне изменения момента вращения от нуля до максимального значения. Принимаем, что при изменении частоты питающего напряжения амплитуда напряжения постоянна. Тогда, момент вращения АД будет изменяться обратно пропорционально квадрату частоты, рис.13.19,а.

Очевидно, что такие характеристики потребуют сложных алгоритмов управления.

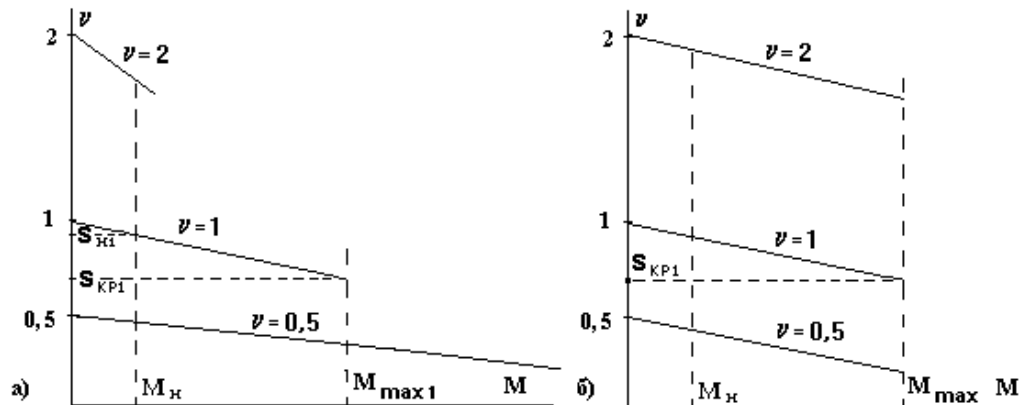


Рис.13.19

Характер кривых момента вращения можно существенно приблизить к идеальным для автоматического управления, если выполнять равенство  $U_v/U_{1н} = f_v/f_{1н} = \nu$ , рис.13.19,б. Основной закон частотного регулирования, установленный академиком М.П. Костенко, формулируется следующим образом: чтобы обеспечить оптимальный режим работы АД при всех значениях частоты и нагрузки, относительное напряжение, подаваемое на электродвигатель, необходимо изменять пропорционально произведению относительной частоты на корень квадратный из относительного момента нагрузки. Этот закон можно записать уравнением

$$\frac{U_v}{U_{1н}} = \frac{f_v}{f_{1н}} \sqrt{\frac{M}{M_n}} \quad (13.32)$$

где  $U_v$  и  $f_v$  - напряжение и частота, подаваемые на двигатель,  $U_{1н}$  и  $f_{1н}$  - номинальные,  $M$  - момент, развиваемый двигателем,  $M_n$  - момент нагрузки.

М.П. Костенко отмечал, что при регулировании напряжения по его закону абсолютное скольжение остается практически неизменным. Очевидно, что если регулировать напряжение так, чтобы абсолютное скольжение оставалось постоянным, то режим работы АД будет близок к режиму по основному закону М.П. Костенко.

При небольших частотах происходит снижение значения максимального (критического) момента при выполнении условия (13.32) из-за влияния падения напряжения на активном сопротивлении обмотки статора. Для предотвращения этого эффекта следует с уменьшением частоты снижать напряжение в меньшей степени, чем это рекомендуется указанной формулой.

Следует заметить, что вид расчетной формулы для частоты вращения ротора зависит от характера изменения момента нагрузки при изменении частоты вращения:

- если  $M_{\text{ст}}(\nu) = \nu M_{\text{ст.н}}$ , то  $\Omega(\nu) = \nu \Omega_1 (1 - s_{\text{н}})$ ;
- если  $M_{\text{ст}}(\nu) = M_{\text{ст.н}} = \text{const}$ , то  $\Omega(\nu) = \nu \Omega_1 (1 - s_{\text{н}}/\nu)$ ;

где  $s_{\text{н}}$  соответствует  $M_{\text{ст.н}}$  при базовой (основной) частоте питающего напряжения.

Частотный способ позволяет увеличить частоту вращения по отношению к номинальной в 2 - 3 раза. Ограничение – по механической прочности ротора и потерям в стали, которые увеличиваются пропорционально квадрату относительного значения напряжения. Нижний предел снижения частоты вращения относительно номинальной определяется допустимыми пульсациями скорости и величиной момента статического сопротивления при трогании двигателя с места.

*Векторное управление асинхронными электродвигателями.* Разновидностью частотного управления АД являются частотно-токовое и фазовекторное управление током и напряжением статора асинхронного электродвигателя в полярных или декартовых координатах, которое начало развиваться в начале 90-х годов. Новая тенденция, ранее рассматриваемая как математическая абстракция, - управление векторами получила сейчас всеобщее признание и развитие, особенно в США, Германии, Японии. Идея представления трехфазного тока статора в виде потокообразующей и моментобразующей составляющих, чтобы отдельно управлять потоком возбуждения и моментом двигателя, в сочетании с использованием

преобразованной системы координат, ориентированной по полю электродвигателя, нашла широкое практическое использование. Наиболее ответственной операцией является определение направления и измерение значения потокосцепления ротора электродвигателя. Существует несколько способов реализации этого. Чаще используют датчики Холла, установленные в воздушном зазоре машины под углом  $90^\circ$  относительно друг друга, измеряющие проекции вектора основного потокосцепления машины  $\Psi_{o\alpha}$  и  $\Psi_{o\beta}$  на оси  $\alpha$ – $\beta$  статора, неподвижные в пространстве.

Векторное управление асинхронными электродвигателями позволяет довести качество управления асинхронными электроприводами до лучших образцов электроприводов постоянного тока: полоса пропускания 100 - 200 Гц, диапазон регулирования скорости 1 : (10 000 - 20 000), номинальная частота вращения 3000 - 12 000 об/мин.

### **30. Схема и принцип действия устройства плавного пуска, основные характеристики.**

#### *Схема и принцип действия*

Как следует из названия, задача прибора – организовать плавный пуск асинхронного двигателя переменного тока. Дело в том, что при прямом пуске (то есть при подключении двигателя к питающей сети при помощи обычного пускателя) двигатель потребляет пусковой ток, превышающий номинальный в 5-7 раз, и развивает пусковой момент, существенно превышающий номинальный. Все это приводит к двум группам проблем:

1) *Пуск слишком быстрый*, и это приводит к различным неприятностям – гидравлическим ударам, рывкам в механизме, ударному выбору люфтов, обрыву транспортерных лент и т.д.

2) *Пуск тяжелый*, и завершить его не удастся. Здесь сначала нужно определиться с термином "тяжелый пуск" и возможностями его "облегчения" при помощи УПП. К "тяжелому пуску" обычно относят три разновидности пуска:

а) *Пуск, "тяжелый" для питающей сети* – от сети требуется ток, который она может обеспечить с трудом или не может вообще. Характерные признаки: при пуске отключаются автоматы на входе системы, в процессе пуска гаснут лампочки и отключаются некоторые реле и контакторы, останавливается питающий генератор. Скорее всего, УПП тут действительно поправит дело. Однако следует помнить, что в лучшем случае пусковой ток удастся снизить до 250% от номинального тока двигателя, и если этого недостаточно, то решение одно – необходимо использовать преобразователь частоты.

б) *Двигатель не может запустить механизм при прямом пуске* – не крутится вообще или "зависает" на определенной скорости и остается на ней до срабатывания защиты. Увы, УПП ему не поможет – двигателю не хватает

момента на валу. Возможно, с задачей справится преобразователь частоты, но этот случай требует исследования.

в) Двигатель уверенно разгоняет механизм, но *не успевает дойти до номинальной частоты* – срабатывает автомат на входе. Такое часто бывает на тяжелых вентиляторах с достаточно высокой частотой вращения. Устройство плавного пуска здесь, скорее всего, поможет, но риск неудачи сохраняется. Чем ближе механизм к номинальной скорости в момент срабатывания защиты, тем больше вероятность успеха.

Принцип работы устройства плавного пуска заключается в том, что напряжение, подаваемое от сети через УПП на нагрузку, ограничивается при помощи специальных силовых ключей – симисторов (или встречно – параллельно включенных тиристоров) – см. рис. 1. В результате напряжение на нагрузке можно регулировать.

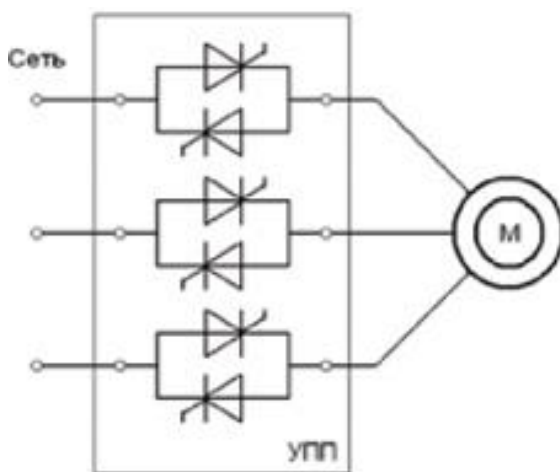


Рис.1

Немного теории: процесс пуска – это процесс преобразования электрической энергии источника питания в кинетическую энергию работающего на номинальной скорости механизма. Очень упрощенно этот процесс можно описать так: сопротивление двигателя  $R$  в процессе разгона увеличивается от очень маленького при остановленном двигателе до

достаточно большого на номинальной скорости, поэтому ток, который по закону Ома равен:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1)$$

оказывается очень большим, а передача энергии

$$E = P \cdot t = I \cdot U \cdot t \quad (2)$$

очень быстрой. Если между сетью и двигателем установить УПП, то формула (1) действует на его выходе, а формула (2) – на входе. Понятно, что ток в обеих формулах одинаковый. УПП ограничивает напряжение на двигателе, плавно повышая его по мере разгона вслед за ростом сопротивления, ограничивая, таким образом, потребляемый ток. Поэтому по формуле (2) при постоянстве необходимой энергии  $E$  и напряжении сети  $U$  чем меньше ток  $I$ , тем больше время пуска  $t$ . Отсюда видно, что при снижении напряжения будут решаться как проблемы, связанные со слишком быстрым пуском, так и проблемы, связанные со слишком большим током, потребляемым от сети.

Однако в наших выкладках не учитывалась нагрузка, для разгона которой нужен дополнительный момент, и соответственно дополнительный ток, поэтому уменьшать ток слишком сильно нельзя. Если нагрузка велика, то момента на валу двигателя может не хватить даже при прямом пуске, не говоря уже о пуске при пониженном напряжении – это вариант тяжелого пуска "б", описанный выше. Если же при снижении тока момент оказывается достаточным для разгона, но время в формуле (2) растет, то может сработать автомат – с его точки зрения время протекания тока, существенно превышающего номинальный, недопустимо велико (вариант тяжелого пуска "в").

#### *Основные характеристики УПП.*

*Возможность контроля тока.* По существу, это способность УПП регулировать напряжение так, чтобы ток изменялся по заданной



характеристике. Эта функция обычно называется пуском в функции тока. Простейшие УПП, не имеющие такой возможности, просто регулируют напряжение в функции времени – т.е. напряжение на двигателе плавно возрастает от начального до номинального за заданное время. Во многих случаях этого достаточно, особенно при решении проблем группы 1. Но если основная причина установки УПП – ограничение тока, то без его точного регулирования не обойтись. Эта функция особенно важна тогда, когда из-за ограниченной мощности сети (маленький трансформатор, слабый генератор, тонкий кабель и т.п.) превышение предельно допустимого тока чревато аварией. Кроме того, УПП с контролем тока способны реализовать его плавное нарастание в начале процесса пуска, что особенно важно при работе от генераторов, которые очень чувствительны к резким броскам нагрузки.

*Необходимость шунтирования.* По окончании процесса пуска и достижении номинального напряжения на двигателе УПП желательно вывести из силовой цепи. Для этого применяется шунтирующий контактор, соединяющий вход и выход УПП пофазно (см. рис. 2). Силовая схема с дополнительным пускателем (By-pass)

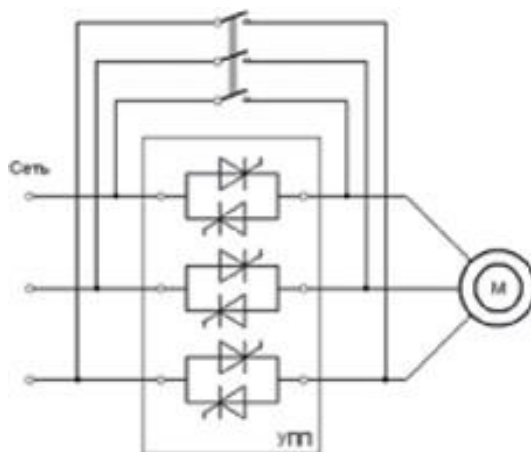


Рис.2

По команде от УПП этот контактор замыкается, и ток течет в обход прибора, что позволяет его силовым элементам полностью остыть. Однако, даже при отсутствии шунтирующей цепи, когда во все время работы двигателя через симисторы течет номинальный силовой ток, их нагрев по сравнению с

режимом пуска оказывается небольшим, поэтому многие УПП допускают работу без шунтирования. Платой за такую возможность оказывается немного меньший номинальный ток и существенное увеличение веса и габаритов за счет радиатора, необходимого для отвода тепла от силовых ключей. Некоторые УПП строятся по обратному принципу – в них шунтирующий контактор уже встроен, и на работу без шунтирования они не рассчитаны, поэтому из-за уменьшения охлаждающих радиаторов их размеры оказываются минимальными. Это положительно сказывается и на цене, и на получающейся схеме подключения, но их время работы в пусковом режиме оказывается меньше по сравнению с другими приборами.

*Количество регулируемых фаз.* По этому параметру УПП делятся на двухфазные и трехфазные. В двухфазных, как это следует из названия, ключи установлены только в двух фазах, третья же подключается к двигателю напрямую. Плюсы – снижение нагрева, уменьшение габаритов и цены.

Минусы – нелинейное и несимметричное по фазам потребление тока, которое хотя и частично компенсируется специальными алгоритмами управления, все же отрицательно влияет на сеть и двигатель. Впрочем, при нечастых пусах этими недостатками можно пренебречь.

*Цифровое управление.* Система управления УПП может быть цифровой и аналоговой. Цифровые УПП обычно реализуются на микропроцессоре и позволяют очень гибко управлять процессом работы прибора и реализовывать множество дополнительных функций и защит, а также обеспечивать удобную индикацию и связь с управляющими системами верхнего уровня. В управлении аналоговых УПП используются операционные элементы, поэтому их функциональная насыщенность ограничена, настройка выполняется потенциометрами и переключателями, а связь с внешними системами управления обычно осуществляется при помощи дополнительных устройств.

### **31. Схема и принцип действия устройства плавного пуска, дополнительные функции.**

*Схема и принцип действия*

(См. вопрос 30)

*Дополнительные функции*

*Защита.* Кроме своей основной функции – организации плавного пуска – УПП содержат в себе комплекс защит механизма и двигателя. Как правило, в этот комплекс входит электронная защита от перегрузки и неисправностей силовой цепи. В дополнительный набор могут входить защиты от превышения времени пуска, от перекоса фаз, изменения чередования фаз, слишком маленького тока (защита от кавитации в насосах), от перегрева радиаторов УПП, от снижения частоты сети и т.д. Ко многим моделям возможно подключение термистора или термореле, встроенного в двигатель. Однако следует помнить, что УПП не может защитить ни себя, ни сеть от короткого замыкания в цепи нагрузки. Конечно, сеть будет защищена вводным автоматом, но УПП при коротком замыкании неизбежно выйдет из строя. Некоторым утешением может служить только то, что короткое замыкание при правильном монтаже не возникает мгновенно, и в процессе снижения сопротивления нагрузки УПП обязательно отключится, только не стоит вновь включать его, не установив причину отключения.

*Пониженная скорость.* Некоторые устройства плавного пуска способны реализовать так называемое псевдочастотное регулирование – перевод двигателя на пониженную скорость. Этих пониженных скоростей может быть несколько, но они всегда строго определены и не поддаются коррекции пользователем.

Кроме того, работа на этих скоростях сильно ограничена по времени. Как правило, эти режимы используются в процессе отладки или при

необходимости точной установки механизма в нужное положение перед началом работы или по ее окончании.

*Торможение.* Довольно много моделей способны подать на обмотку двигателя постоянный ток, что приводит к интенсивному торможению привода. Эта функция обычно нужна в системах с активной нагрузкой – подъемники, наклонные транспортеры, т.е. системы, которые могут двигаться сами собой при отсутствии тормоза. Иногда эта функция нужна для предпусковой остановки вентилятора, вращающегося в обратную сторону из-за тяги или действия другого вентилятора.

*Толчковый пуск.* Используется в механизмах, имеющих высокий момент трогания. Заключается функция в том, что в самом начале пуска на двигатель кратковременно (доли секунды) подается полное напряжение сети, и происходит срыв механизма с места, после чего дальнейший разгон происходит в обычном режиме.

*Экономия энергии в насосно-вентиляторной нагрузке.* Поскольку УПП представляет собой регулятор напряжения, то при малой нагрузке можно снизить напряжение питания без ущерба для работы механизма.

Экономия энергии это дает, но не следует забывать, что тиристоры в режиме ограничения напряжения являются нелинейной нагрузкой для сети со всеми вытекающими отсюда последствиями.

## 32. Виды и аппараты защиты, блокировок в электроприводе

Для обеспечения надежной работы ЭП и технологического оборудования в схемах управления предусматривается специальная защитная аппаратура. Этой же цели служат и различные блокировочные связи, обеспечивающие заданный порядок операций по управлению одним или несколькими ЭП и технологическим оборудованием, а также предотвращающие ошибочные действия оператора. Кроме того, во многих случаях целесообразно осуществлять контроль за состоянием и режимами работы отдельных узлов ЭП, что обеспечивается с помощью средств сигнализации, измерительных и регистрирующих приборов.

**Аппараты максимальной токовой защиты.** При работе ЭП может произойти замыкание электрических цепей между собой или на землю (корпус), а также увеличение тока в силовых цепях сверх допустимого предела, вызванное стопорением движения исполнительного органа рабочей машины, обрывом одной из фаз питающего АД или СД напряжения, резким снижением тока возбуждения ДПТ. Для защиты ЭП и питающей сети от появляющихся в этих случаях недопустимо больших токов (сверхтоков) предусматривается максимальная токовая защита, которая может реализовываться различными средствами – с помощью плавких предохранителей, реле максимального тока и автоматических выключателей.

**Плавкие предохранители  $FU$**  включаются в каждую линию (фазу) питающей двигатель сети между выключателем напряжения сети  $Q$  и контактами линейного контактора  $KM$ , а также в цепи управления.

Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка и дугогасительное устройство. Выбор плавкой вставки предохранителей производится по току, который рассчитывается таким образом, чтобы она не перегорала от пускового тока двигателя.

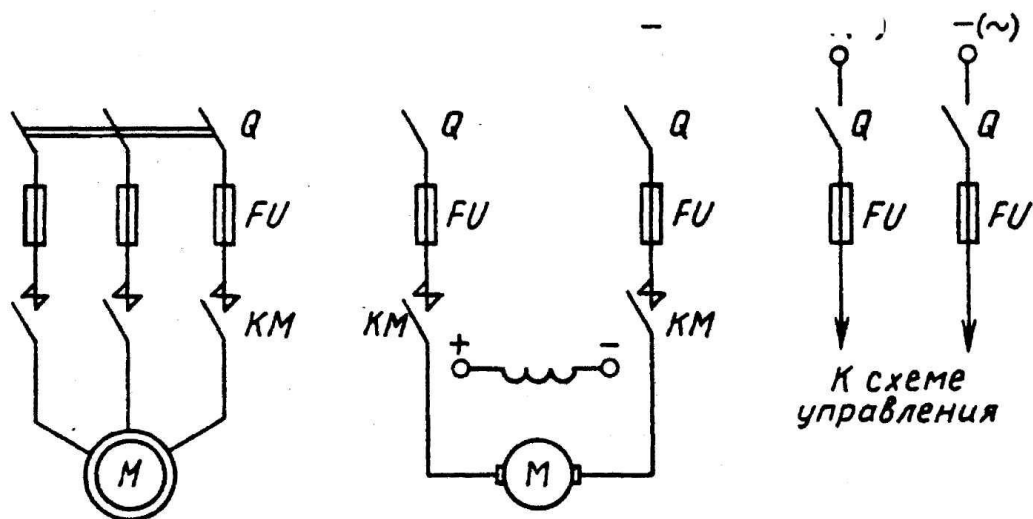


Рисунок 10.10

**Реле максимального тока** используются в основном в ЭП средней и большой мощности. Катушки этих реле *FA1* и *FA2* включаются в две фазы трехфазных двигателей переменного тока и в один или два полюса ДПТ между выключателем *Q* и контактами линейного контактора *KM* (рис. 10.11, а, б). Размыкающие контакты этих реле включаются также в цепь катушки линейного контактора *KM* (см. рис. 10.11, в). При возникновении сверхтоков в контролируемых цепях, превышающих токи срабатывания (уставки) реле *FA1* и *FA2*, контакты этих реле размыкаются и силовые контакты линейного контактора *KM* отключают двигатель от питающей сети.

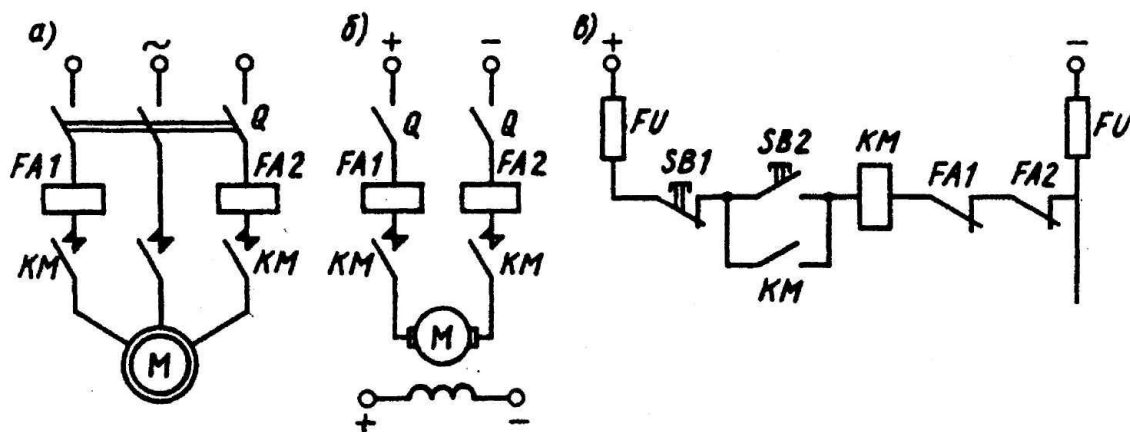


Рисунок 10.11

**Автоматические воздушные выключатели (автоматы).** Эти комплексные многоцелевые аппараты обеспечивают ручное включение и отключение двигателей, их защиту от сверхтоков, перегрузок и  $I$  снижения питающего напряжения. Кроме того, некоторые автоматы обеспечивают дистанционное отключение двигателей. Для обеспечения выполнения этих функций автомат имеет контактную систему, замыкание и размыкание которой осуществляется вручную с помощью рукоятки или кнопки, максимальное токовое реле и тепловое токовое реле.

Важной частью автомата является механизм свободного расцепления, который обеспечивает его отключение при поступлении управляющих или защитных воздействий, например при протекании токов перегрузки, коротком замыкании, снижении напряжения сети, а также при необходимости дистанционного отключения автомата.

Упрощенное устройство автомата показано на рис. 10.12, а. Рабочий ток нагрузки протекает через контакт  $1$  автомата и нагреватель теплового реле  $6$  в катушку  $9$  реле максимального тока. При коротком замыкании в контролируемой цепи сердечник  $10$  реле максимального тока втягивается в катушку  $9$  и через толкатель  $8$  воздействует на рычаг  $5$  механизма свободного расцепления. Последний поворачивается по часовой стрелке и приподнимает защелку  $4$ . При этом освобождается рычаг  $3$  и, действуя на пружину  $2$ , размыкает контакты  $1$  автомата.

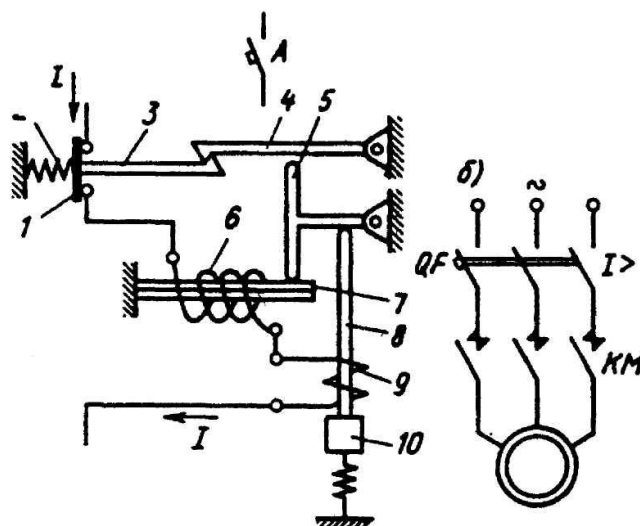


Рисунок 10.12

Автоматические выключатели широко используются для коммутации и защиты силовых и маломощных цепей ЭП всех видов.

### Нулевая, тепловая и другие виды защит

**Нулевая защита.** При значительном снижении напряжения сети или его исчезновении эта защита обеспечивает отключение двигателей и предотвращает самопроизвольное их включение (самозапуск) после восстановления напряжения.

В тех случаях, когда двигатели управляются кнопками контакторов или магнитных пускателей, нулевая защита осуществляется самими этими аппаратами без применения дополнительных средств.

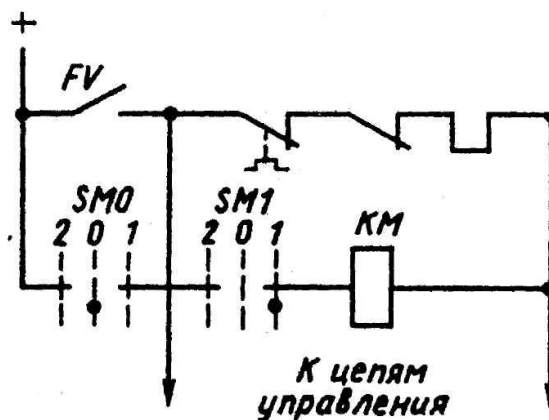


Рис. 10.13



При управлении ЭП от командоконтроллера или ключа с фиксированным положением их рукояток нулевая защита (рис. 10.13) осуществляется с помощью дополнительного реле напряжения  $FV$ . В этой схеме реле  $FV$  включается при нулевом положении командоконтроллера (ключа) через контакт  $SM0$ , после чего оно начинает получать питание через свой собственный контакт. При переводе рукоятки командоконтроллера (ключа) в положение пуска  $I$  питание всей схемы управления будет осуществляться через этот контакт, поэтому при исчезновении напряжения реле  $FV$  отключится, прекратит питание схемы и линейный контактор  $KM$  отключит двигатель от сети. При восстановлении напряжения питания повторное включение двигателя возможно лишь после установки рукоятки вновь в нулевое (среднее) положение, чем исключается возможность его самозапуска.

**Тепловая защита** отключает двигатель от источника питания, если вследствие протекания по его цепям повышенных токов происходит значительный нагрев его обмоток. Такая перегрузка возникает, например, при обрыве одной из фаз трехфазного АД или СД.

Тепловая защита двигателей осуществляется с помощью тепловых, максимальных токовых реле и автоматических выключателей. Тепловые реле  $FR$  включаются в две фазы трехфазных двигателей непосредственно (рис. 10.14, *а*) или через трансформаторы тока  $TA$  (см. рис. 10.14, *б*), если ток двигателя превышает номинальный ток реле. Для защиты ДПТ тепловые реле включаются в один или два полюса цепи их питания. Размыкающие контакты тепловых реле включаются в цепи катушек главных (линейных) контакторов или в цепь защитного реле (см. рис. 10.13).



**Минимальная токовая защита** применяется в ЭП с ДПТ и СД для защиты их цепей возбуждения от обрыва. Исчезновение тока возбуждения опасно тем, что, вызывая исчезновение противо-ЭДС двигателя, приводит к значительному возрастанию тока в его силовой цепи и резкому снижению развиваемого момента.



82

помещается в цепь катушки контактора  $KM$ , что позволяет включать двигатель только при наличии тока возбуждения в его обмотке возбуждения  $ОВМ$ . При работе ЭП в случае исчезновения или резкого снижения тока возбуждения контакт реле  $KF$  разомкнётся и контактор  $KM$ , потеряв питание, отключит двигатель от сети.

В качестве реле минимального тока в ЭП используется реле серии РЭВ 830.

**Специальные виды защит.** К ним относятся защита от перенапряжения на обмотке возбуждения ДПТ; защита от повышения напряжения в системе «преобразователь - двигатель»; защита от превышения скорости ЭП; защита от затянувшегося пуска СД и ряд других.

**Защита от превышения скорости** применяется в ЭП рабочих машин, для которых недопустимо превышение скорости движения исполнительных органов (лифты, подъемные лебедки, эскалаторы, шахтные подъемники). Такая защита обеспечивается с помощью тахогенератора или центробежных выключателей, соединенных с валом двигателя.

**Защита от затянувшегося пуска СД** обеспечивает его прекращение, если к концу расчетного времени ток возбуждения СД не достигает заданного уровня.

**Путевая защита** обеспечивает отключение ЭП при достижении исполнительным органом рабочей машины крайних положений. Она осуществляется с помощью конечных выключателей, устанавливаемых в этих положениях исполнительного органа и размыкающих в случае необходимости цепи реле защиты или непосредственно линейных контакторов.

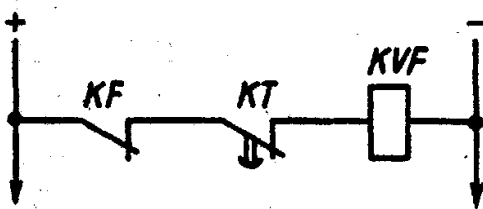


Рис. 10.16

**Электрические блокировки в схемах ЭП** служат для обеспечения заданной последовательности операций при управлении, предотвращения нештатных и аварийных ситуаций, а также для предотвращения последствий неправильных действий оператора, что значительно повышает надежность работы ЭП и технологического оборудования.

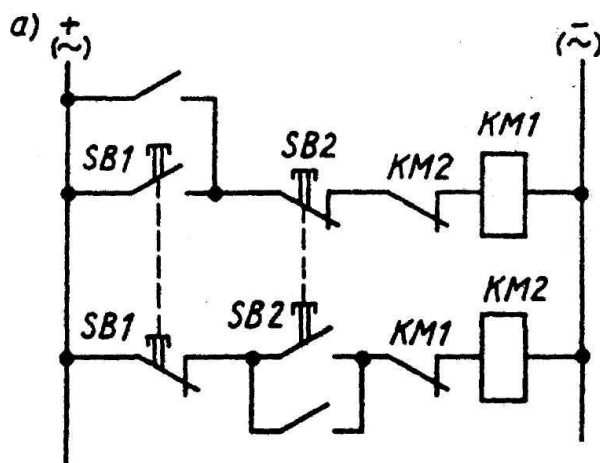


Рисунок 10.18

Так, например, перекрестное включение размыкающих контактов контакторов *KM1* и *KM2* (рис. 10.18, а) в цепи катушек не допускает включения одного из них при включенном другом. Такая блокировка применяется в реверсивных ЭП, где недопустимо одновременное включение двух контакторов, или в ЭП с электрическим торможением двигателя, где торможение может начаться только после отключения двигателя от сети.

Одновременное включение двух контакторов можно предотвратить также, используя двухцепные кнопки управления, имеющие замыкающий и размыкающий контакты. Как видно из рис. 10.18, а, нажатие любой из кнопок приводит к замыканию цепи катушки одного из контакторов и одновременному размыканию цепи другого контактора.

**Сигнализация в схемах управления ЭП.** При контроле хода технологического процесса, последовательности выполнения операций, состояния защиты ЭП, наличия напряжения питания или какого-либо электрического сигнала, в случае отклонения от нормы применяется сигнализация, которая может быть световой (сигнальные лампы, табло),

звуковой (звонок, сирена) и визуальной (указательные реле, измерительные приборы).

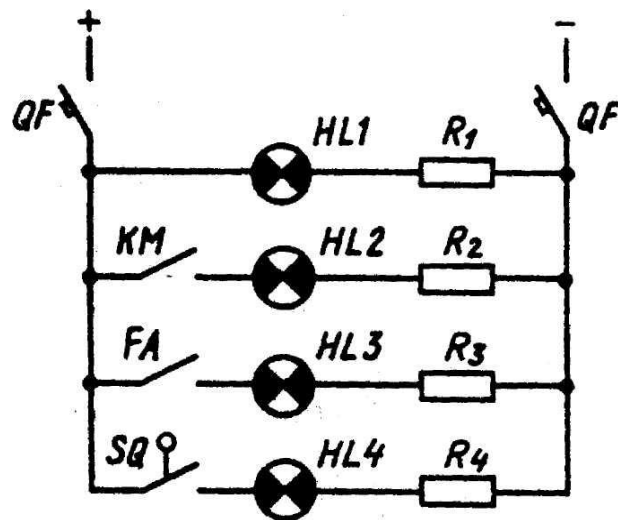


Рисунок 10.19

На рис. 10.19 показана возможная сигнализация в схеме управления ЭП. Здесь лампа *HL1* сигнализирует о подаче напряжения на схему (включение автомата *QF*), лампа *HL2* – о включении контактора *KM*, лампа *HL3* – о срабатывании реле максимальной токовой защиты *FA*, лампа *HL4* – о срабатывании конечного выключателя *SQ*.

### **33. Коммутация электроприводов. Аппараты ручного управления.**

#### **Аппараты дистанционного управления.**

Для коммутации цепей ЭП применяются соответствующие аппараты и устройства. В основном используется релейно-контакторная аппаратура, в состав которой входят командные маломощные аппараты, силовые коммутационные аппараты с ручным и дистанционным управлением, а также реле управления и защиты.

#### **Аппараты ручного управления**

К аппаратам ручного управления относятся кнопки и ключи управления, а также рубильники, пакетные выключатели и силовые контроллеры.

**Кнопки управления** предназначены для подачи оператором управляющего воздействия на ЭП. Они различаются размерами, числом замыкающих и размыкающих контактов, формой. Две и более кнопок, смонтированных в одном корпусе, образуют кнопочную станцию. Одноцепные кнопки выпускаются с замыкающим и размыкающим контактами. Двухцепные кнопки имеют обе пары указанных контактов с единым приводом. (На схемах, контакты всегда изображаются в «нормальном» состоянии, т. е. когда на них ничего не действует). Особенностью кнопок управления является их способность возвращаться в исходное положение после снятия воздействия.

**Ключи управления** (универсальные переключатели) предназначены для подачи управляющего воздействия на ЭП и имеют два или более фиксированных положения рукоятки и несколько замыкающих и размыкающих контактов.

**Рубильники** – простейшие силовые коммутационные аппараты, предназначенные для неавтоматического нечастого замыкания и размыкания силовых электрических цепей двигателей постоянного и переменного тока

напряжением до 500в и током до 5000а. Они различаются по силе коммутируемого тока, числу коммутируемых цепей, виду привода рукоятки.

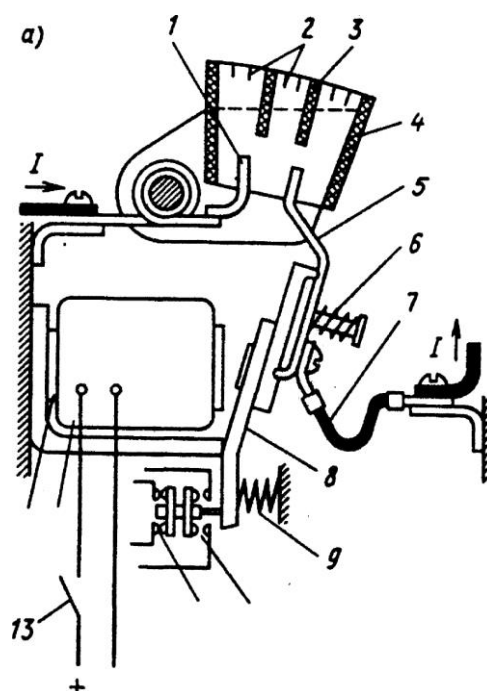
**Пакетные выключатели** являются, фактически, разновидностью рубильников. Их контактная система набирается из отдельных пакетов по числу коммутируемых цепей. Пакет состоит из изолятора, в пазах которого находятся неподвижный контакт с винтовыми зажимами для подключения проводов и пружинный подвижный контакт с устройством искрогашения.

**Контроллеры** – многопозиционные электрические аппараты с ручным или ножным приводом для непосредственной коммутации силовых цепей электродвигателей. В ЭП используются кулачковые и магнитные контроллеры. В кулачковых контроллерах замыкание и размыкание контактов обеспечивается смонтированными на барабане кулачками (распред. вал).

### **Аппараты дистанционного управления**

К аппаратам дистанционного управления относятся контакторы, магнитные пускатели и реле, коммутация контактов которых осуществляется при подаче на их катушки электрического сигнала и снятии этого сигнала. Другими словами, это двухпозиционные коммутационные аппараты с самовозвратом, включение и выключение которых осуществляется электрическим сигналом.

**Контактор** представляет собой электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных коммутаций силовых цепей. Контакторы различаются по роду коммутируемого тока, числу главных контактов, роду тока катушки управления, номинальному току и напряжению коммутируемых цепей и т.п.



Контакторы переменного тока по принципу действия не отличаются от контакторов постоянного тока. Особенность их в питании катушки переменным током. В связи с этим их сердечник набирается из тонколистовой трансформаторной стали.

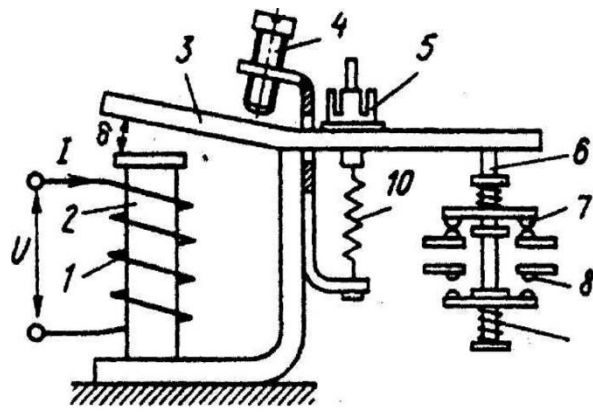
**Магнитный пускатель** представляет собой специализированный комплексный аппарат, предназначенный главным образом для управления трехфазными асинхронными двигателями, т.е. подключения их к сети, отключения, обеспечения тепловой защиты и сигнализации о режимах работы. В его состав могут входить контактор, кнопки управления, тепловые реле защиты, сигнальные лампы, размещенные в одном корпусе.

**Электромагнитное реле** представляет собой аппарат, предназначенный для коммутации слаботочных цепей управления ЭП в соответствии с электрическим сигналом, подаваемым на его катушку. Реле выполняют самые разнообразные функции управления, контроля, защиты и блокировок в автоматизированном электроприводе.

Электромагнитные реле работают аналогично контактору.

Герконовые реле имеют герметизированные контакты, что повышает их надежность и износостойчивость.





### 34. Твердотельные реле. Структура и принцип действия.

В настоящее время на смену электромагнитному реле идёт принципиально новый электронный прибор – твёрдотельное реле. Оно служит для управления силовыми цепями с помощью низковольтной цепи управления. В качестве коммутатора силовой цепи используются мощные ключи на полупроводниковых структурах, выполненных по типу: симистора, МДП-транзисторов, тиристоров, диодов, биполярных транзисторов и IGBT-транзисторов.

Твердотельное реле (ТТР), в англоязычной технической литературе имеет сокращённое обозначение SSR (Solid State Relays), обеспечивает полную гальваническую развязку между цепями управления и коммутируемыми цепями.

Твердотельные реле, в зависимости от типа могут работать как в цепях переменного, так и постоянного тока. Двухполярные твёрдотельное реле постоянного тока могут так же работать и в цепях переменного тока.

Структура твердотельных реле различных производителей относительно неизменна. Все реле данного типа, доступные на рынке, имеют лишь незначительные отличия.

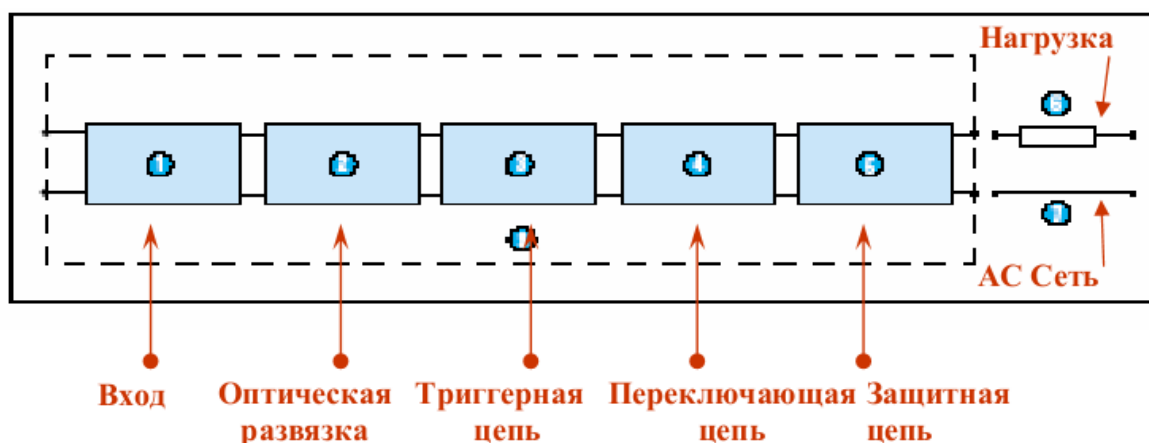


Рисунок 1. Элементная структура твердотельного реле.

**Входная цепь:** обычно называется «первичная». Входная цепь твердотельного реле может состоять из обычного резистора, включенного последовательно с оптическим изолятором, или быть более сложной схемой с

регулятором тока, защитой от обратной полярности, с фильтром ЕМС и т.д. В любом случае, обе этих схемы выполняют одинаковую функцию, которая состоит в том, чтобы принимать сигнал управления и «скомандовать» твердотельному реле коммутировать нагрузку.

**Оптическая развязка:** оптическая развязка в твердотельном реле обеспечивает изоляцию между входной, промежуточными и выходной(сеть переменного тока) цепями.

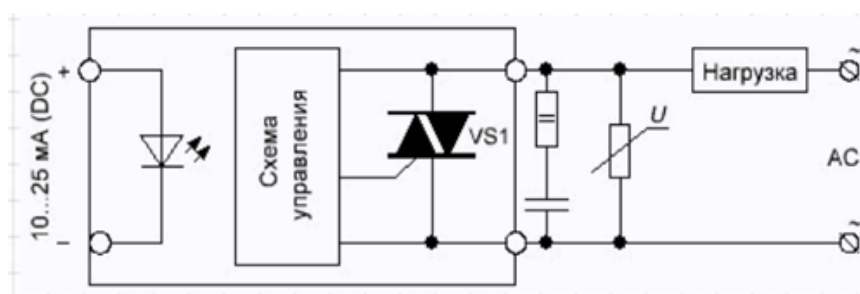
Тип оптической развязки, используемой в реле, определяет принцип работы реле, с переходом через ноль или нет.

**Триггерная цепь:** данная цепь обрабатывает входной сигнал и переключает выход твердотельного реле. Пусковая цепь может быть в составе оптического изолятора.

**Переключающая цепь:** это часть твердотельного реле, которая подает напряжение на нагрузку. Она обычно состоит из транзистора, кремниевого диода или симистора.

**Защитная цепь:** для надежной работы твердотельных реле необходимо наличие электрической защиты реле от возможных повреждений или от ошибок, связанных с неправильным использованием. Защитное устройство или устройства могут находиться внутри твердотельного реле или устанавливаться снаружи.

Работает твердотельное реле следующим образом: управляющий сигнал подаётся на светодиод. Оптическое излучение вызывает на фотоприёмнике (фотодиоде) появление ЭДС. Это напряжение подаётся на управляющую схему, которая вырабатывает сигнал для управления выходным ключом.



Основных параметров у твердотельного реле немного:

- Коммутируемое напряжение  $U_{\text{макс}}$ ;
- Коммутируемый ток  $I_{\text{макс}}$ ;
- Управляющий сигнал;
- Скорость переключения.

По сравнению с электромагнитными реле твердотельные реле обладают рядом несомненных преимуществ:

- Допускается не менее миллиарда переключений, что в тысячу раз превышает этот показатель у обычных реле.
- Совместимость с уровнями логических микросхем.
- Отсутствие контактов а, следовательно, и дребезга.
- Бесшумная работа, вибростойкость, высокое быстродействие.
- Малое энергопотребление.

### **35. Классификация твердотельных реле.**

**По типу управления** реле делятся на управляемые напряжением постоянного или переменного тока, переменным резистором или аналоговым сигналом 4.20 мА (в зависимости от типа реле). Реле управляемые уровнем напряжения позволяют производить вкл./откл. нагрузки за счет подачи или снятия с нагрузки полного напряжения питания. Реле, управляемые аналоговым сигналом тока 4.20 мА или переменным резистором позволяют регулировать напряжение на нагрузке, т.е., например, осуществлять управление мощностью ТЭНов и т.п.

**По типу нагрузки реле** делятся на одно и трехфазные.

**По методу коммутации нагрузки** реле делятся на управление с коммутацией через ноль и с фазовым управлением.

### 36. Твердотельные реле. Коммутация через ноль и реле с фазовым управлением.

**Коммутация через ноль.** Значит, переключение осуществляется, когда нам где-то попадается ноль. Так как ТТР коммутируют напряжение, значит, переключение и отключение происходит, когда напряжение где-то равняется нулю! Ну да, так оно и есть! Эврика! Так стоп, а в каких сигналах у нас напряжение может равняться нулю? Ну конечно же, в переменном напряжении!



То есть, мы подали управляющее напряжение на Вход. Но на Выходе у нас релюшка включилась только тогда, когда значение переменного напряжения (пусть это будет 220 Вольт с нашей домашней розетки) достигло нуля. То же самое справедливо и для того случая, когда мы снимаем управляющий Входной сигнал с реле. Релюшка в этом случае сразу не выключается, пока не достигнет опять того же самого уровня в "ноль Вольт".

Для нашего глаза эти колебания совершаются за время 0,02 сек, поэтому мы никак не сможем уловить задержку визуальюно. Для нас кажется, что релюшка включается и выключается одновременно с подачей сигнала на ее управляющие контакты

**Реле с фазовым управлением.** В зависимости от значения какого-либо параметра на управляющем входе мы можем менять МОЩНОСТЬ, подаваемую в нагрузку!



Думаю, он стоит во многих домах. С помощью диммера мы можем менять свечение лампы накаливания. А свечение лампы — это и есть мощность, рассеиваемая на ее нити накаливания. Меняя мощность на лампе - меняем освещение! А так как мощность у нас определяется формулой  $P=IU$ , то получается, изменяя напряжение, изменяем свечение лампы!

Почти точно также работают и реле с фазным управлением. Меняя значение какого-либо параметра на Входе, пропорционально меняем значение и на выходе ;-). Черная область — это все что останется от синусоиды переменного тока, если менять значение на Входе реле постепенно:



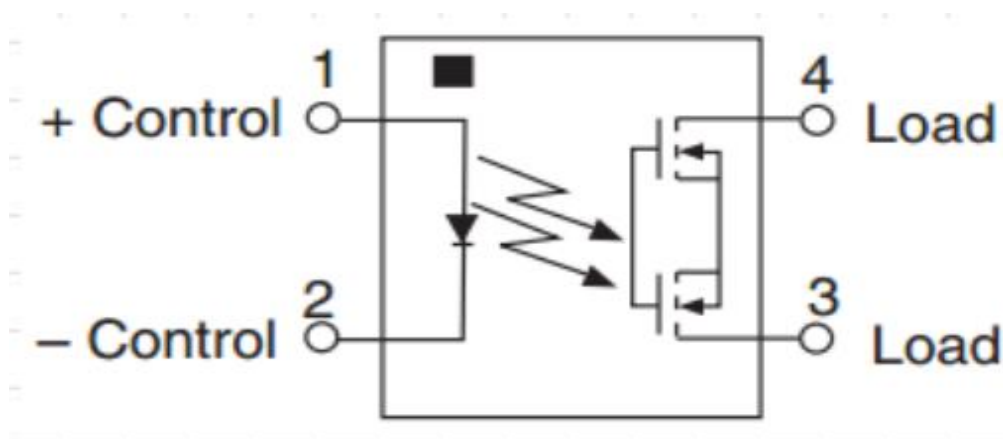
Подавать на Вход реле можно сопротивление или менять значение силы тока, тем самым регулируя мощность на коммутируемых контактах.

### 37. Телекоммуникационные твердотельные реле.

Существует целая серия твердотельных реле, рассчитанных на работу с небольшими токами и напряжениями. Их принято называть телекоммуникационными реле или **MER** (Microelectronic Relay).

Эти реле имеют очень небольшие размеры и прекрасно зарекомендовали себя, работая в многофункциональных телефонных аппаратах, контрольно-измерительной аппаратуре, модемах и в приёмно-контрольных приборах систем охранной и пожарной сигнализации.

Поскольку эти реле работают в слаботочных системах, их внутренняя схемотехника заметно упрощена с целью снижения себестоимости. Особенно удобно их использование в системах оповещения о пожаре или несанкционированном проникновении. В этих системах требуется очень высокий уровень надёжности, который далеко не всегда могут обеспечить электромагнитные реле. Рассмотрим устройство твёрдотельного слаботочного реле CPC1035.



Как видно из рисунка, реле представляет собой комбинированное устройство. В его составе есть высокоэффективный излучающий AsGaAl-инфракрасный диод. Он является управляющей цепью реле (Control). Нагрузку (Load) коммутирует сдвоенный MOSFET транзистор. Благодаря сдвоенному MOSFET транзистору реле допускает коммутацию переменного тока. Как только на инфракрасный диод подаётся напряжение, он начинает излучать. Излучение принимается фотодиодной матрицей, в которой создаётся фото-ЭДС. Далее, полученное от фотоматрицы напряжение (фото-



ЭДС) подаётся на управляющую схему. Та в свою очередь управляет ключом из полевых транзисторов. Цепь нагрузки начинает пропускать ток. Как видим, в основе любого твёрдотельного реле лежит полупроводниковая технология.