

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

КАФЕДРА «ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ТОЭ»

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ
по дисциплине
«ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ТЕХНИКА».**

**Часть 2. «Электрические машины и микромашины
устройств автоматики».**

Для студентов специальности 090803 «Электронные системы».

**Составители: доц. Васильев Л.А.
доц. Мнускин Ю.В.**

Донецк 2011

ЛИТЕРАТУРА

1. Подлипенский В.С., Петренко В.П. *Электромагнитные и электромашинные устройства автоматики.* –Киев. –1987.
2. Миловзоров В.П. *Электромагнитные устройства автоматики.* – Москва. –1983.
3. Волков Н.И., Миловзоров В.П. *Электромашинные устройства автоматики.* –Москва. –1986.
4. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. *Электрические машины и микромашины.* –Москва. –1990.
5. Кацман М.М. *Электрические машины и электропривод автоматических устройств.* –Москва. –1987.
6. *Электронный конспект лекций по дисциплине «Электромагнитная техника».* Составители: Васильев Л.А., Мнускин Ю.В.
7. *Методические указания №294 по дисциплине «Электромагнитная техника».* Раздел «Электромагнитные устройства». –ДонНТУ.
8. *Методические указания №196 по дисциплине «Электромагнитная техника».* Раздел «Электрические машины и микромашины». – ДонНТУ.

РАЗДЕЛ 2

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ.

Лекция 8

ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА.

- 8.1 Общие сведения, конструкция, принцип действия.**
- 8.2 Реакция якоря, коммутация.**
- 8.3 Основные уравнения.**
- 8.4 КПД.**

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

8.1 Общие сведения, конструкция, принцип действия.

Электрическая машина постоянного тока (МПТ) – устройство для преобразования электрической энергии постоянного тока и механической энергии посредством электромагнитной индукции.

Генератор постоянного тока (ГПТ) – для преобразования механической энергии в электрическую энергию постоянного тока:

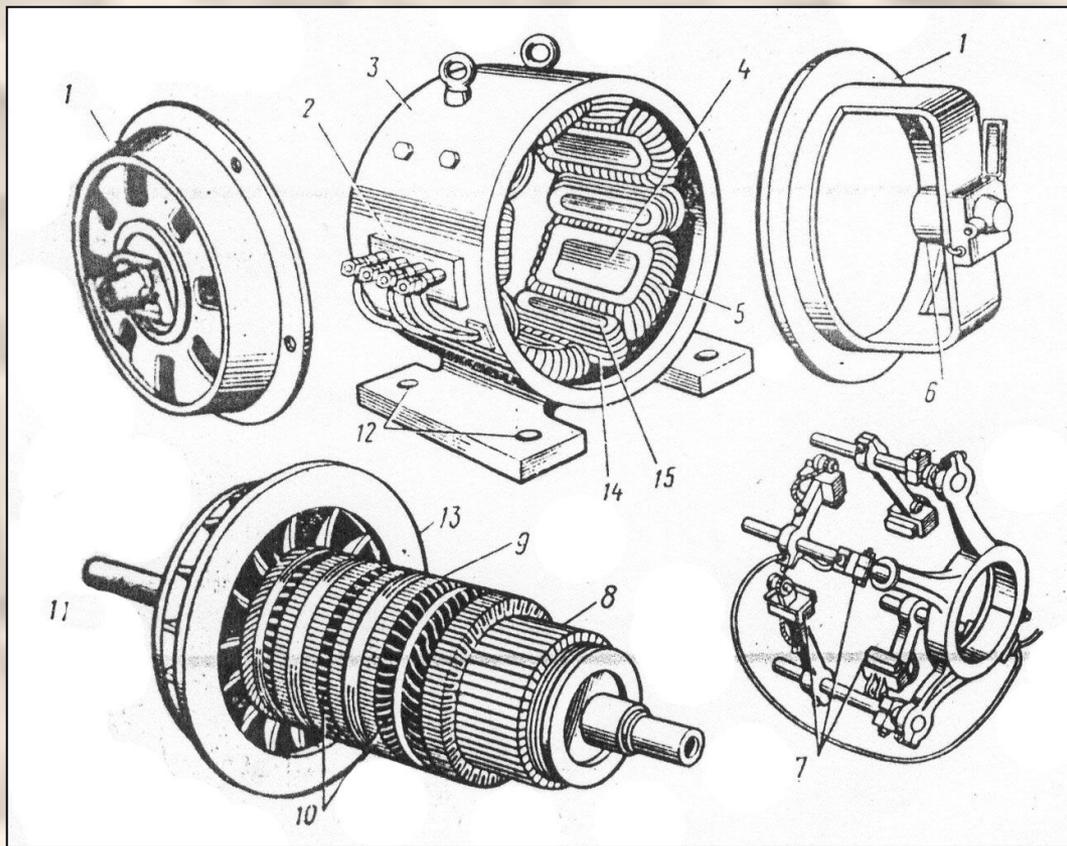
- ▶ **силовые;**
- ▶ **тахогенераторы.**

Двигатель постоянного тока (ДПТ) – для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую энергию:

- ▶ **силовые** (*независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения*);
- ▶ **микродвигатели** (*обычной конструкции, магнитоэлектрические, с полым якорем, с печатной обмоткой якоря*);
- ▶ **исполнительные.**

Свойства МПТ:

- ▶ хорошие регулировочные характеристики;
- ▶ хорошие пусковые характеристики;
- ▶ возможность получения как «мягких», так и «жестких» характеристик.



Устройство машины
постоянного тока

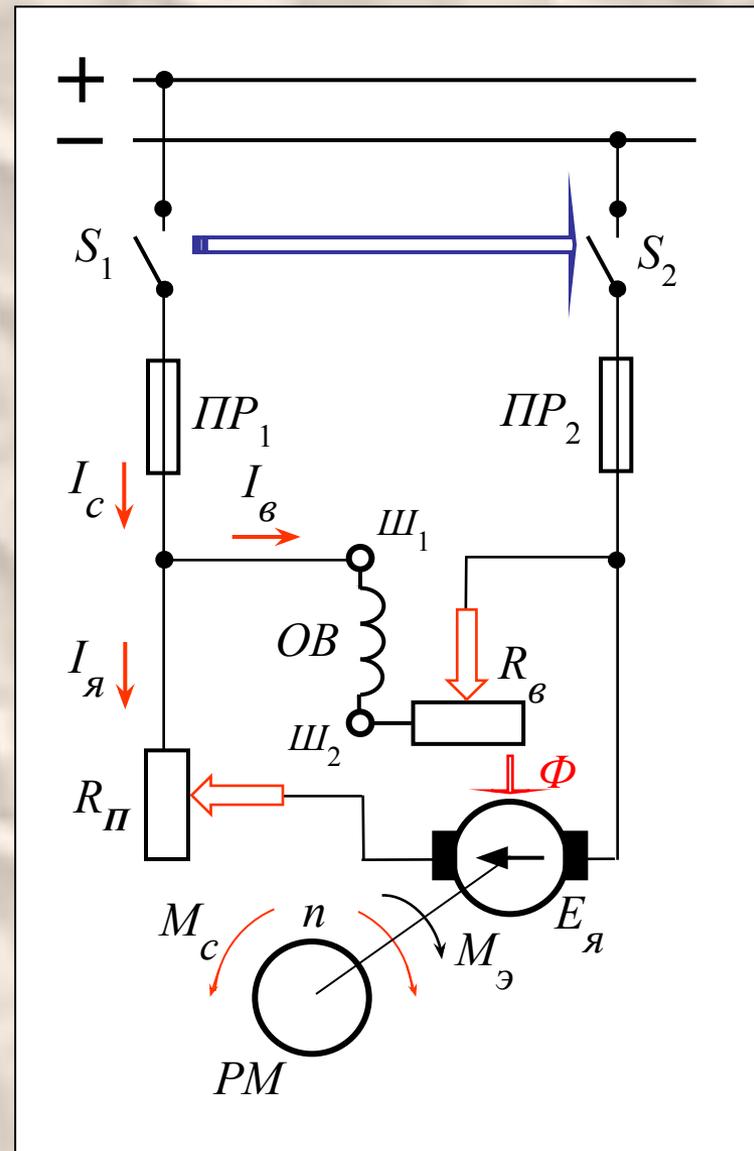


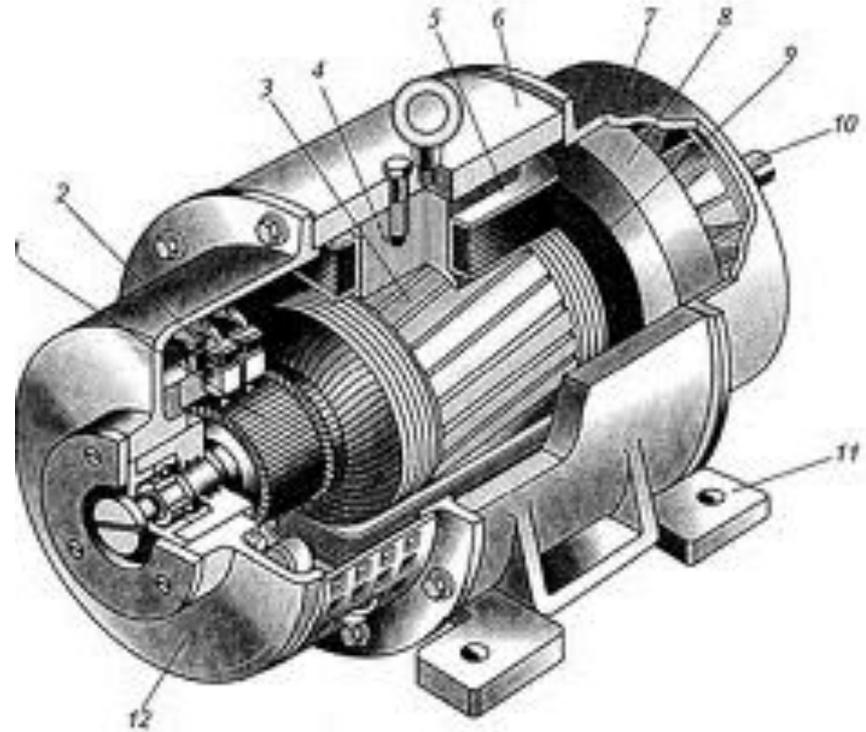
Схема двигателя постоянного
тока параллельного возбуждения

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные элементы конструкции:

1. коллектор;
2. щеточный узел;
3. сердечник якоря;
4. главные полюса (пара);
5. обмотка возбуждения (ОВ);
6. сердечник статора;
7. передний щит корпуса;
8. вентилятор;
9. обмотка якоря (ОЯ);
10. вал;
11. станина;
12. задний щит корпуса.



МПТ по способу возбуждения:

- ▶ **электромагнитные** (есть обмотка возбуждения);
- ▶ **магнитоэлектрические** (с возбуждением от постоянных магнитов).

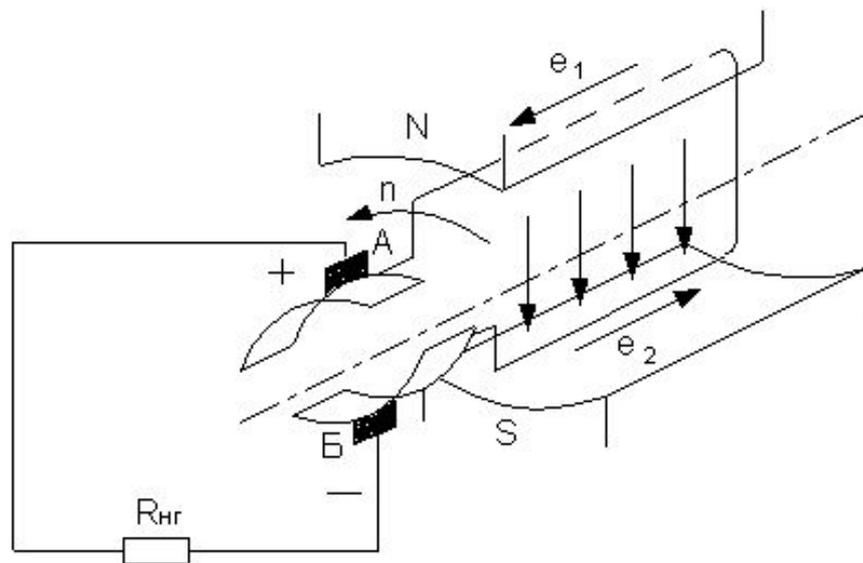
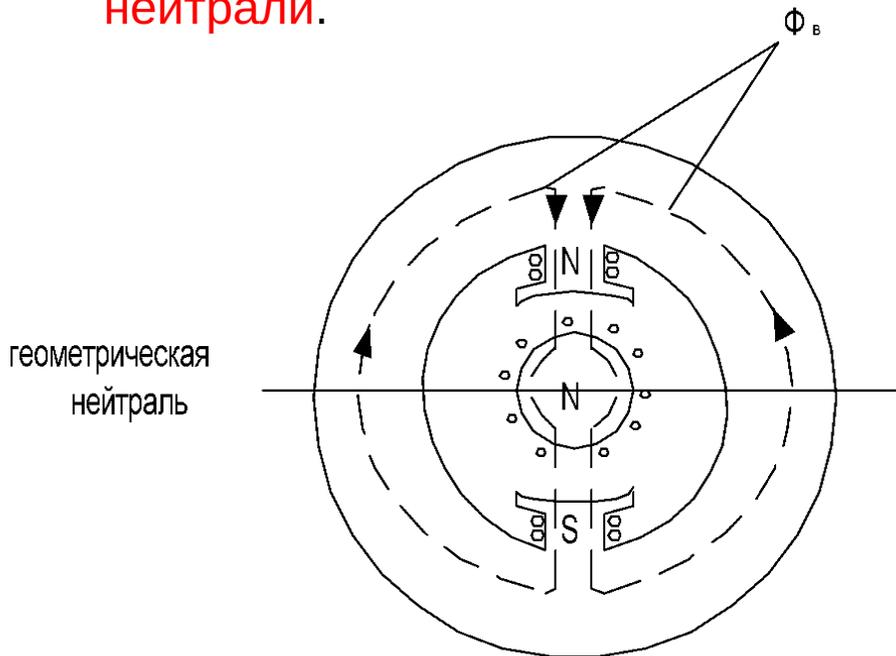
Коллектор – цилиндрический узел, состоящий из медных пластин (*ламелей*), соединенных с секциями обмотки якоря. В *генераторном режиме* является «механическим» выпрямителем между якорной обмоткой, в которой протекают переменные токи и ЭДС, и нагрузкой, а в *двигательном режиме* - преобразователем частоты источника питания постоянного тока.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Принцип действия ГПТ:

- ▶ при протекании в обмотке возбуждения постоянного тока в воздушном зазоре между главными полюсами создается **поток возбуждения**, который пересекает сердечник и обмотку якоря;
- ▶ при вращении якоря в проводниках его обмотки наводится ЭДС, направление которой зависит только от того, под каким главным полюсом находится данный проводник, направление ЭДС определяется по *правилу правой ладони*;
- ▶ при вращении якоря ЭДС в проводниках меняет знак, поэтому для преобразования ее в постоянную ЭДС для питания нагрузки применяется **коллектор и щетки**, которые устанавливаются на **геометрической нейтрали**.

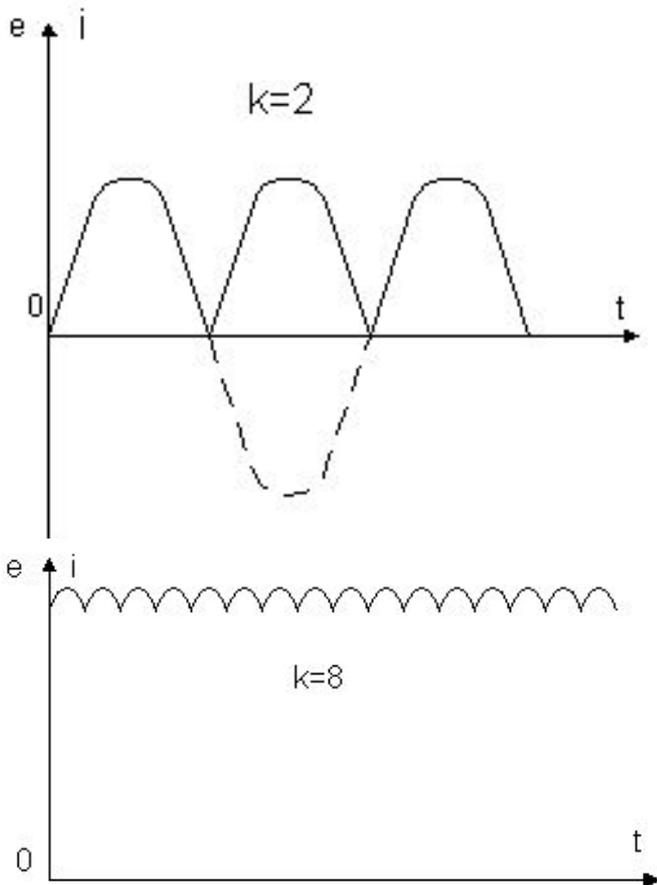


Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В каждой секции якорной обмотки наводится синусоидальная ЭДС, которая достигается специальной формой полюсных наконечников главных полюсов ($k=2$).

Если обмотка якоря многосекционная ($k=4,6,8\dots$), то ЭДС обмоток «перекрываются», и результирующая ЭДС на выходе щеточно-коллекторного узла имеет все меньшие пульсации.



Принцип действия ДПТ – при питании якоря от источника постоянного тока через секции якорной обмотки протекает ток, который взаимодействует с постоянным потоком возбуждения, при этом возникает **сила Лоренца**, под действием которой активная пара проводников перемещается в противоположных направлениях.

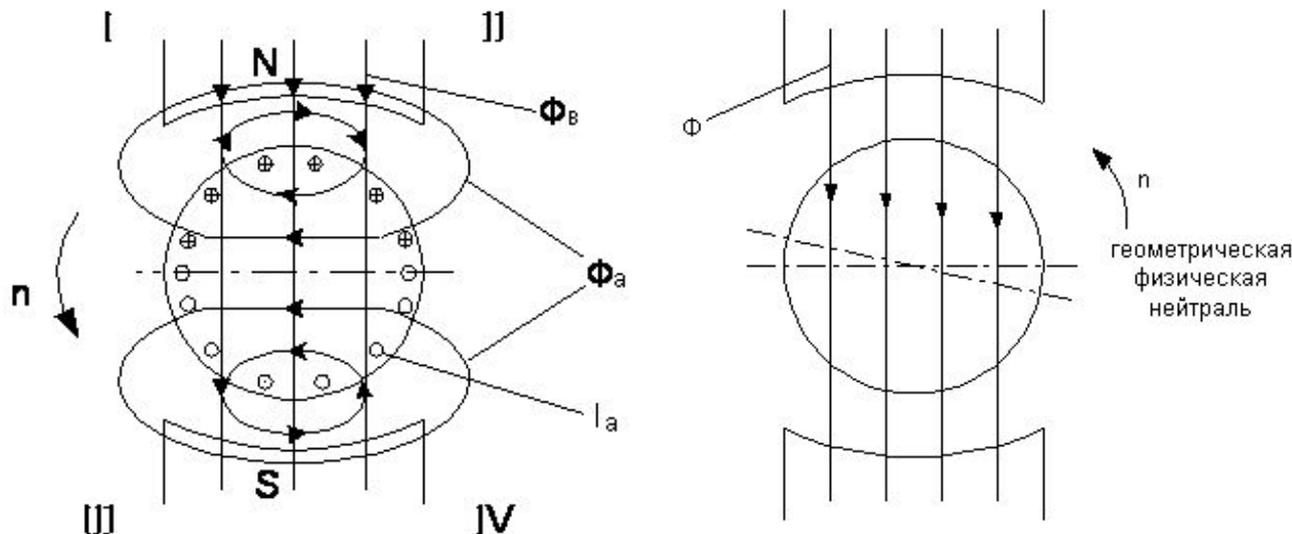
Щеточно-коллекторный узел осуществляет переключение секций якорной обмотки, чтобы к источнику питания была подключена пара проводников, находящихся в данный момент времени под главными полюсами.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

8.2 Реакция якоря, коммутация.

Реакция якоря – это влияние магнитного поля, создаваемого МДС якорной обмотки, на общее магнитное поле МПТ.

В линейном режиме вместо влияния МДС можно рассмотреть влияние **магнитного потока якоря Φ_a** .



В МПТ с нагрузкой поток якоря направлен по поперечной оси машины (**геометрической нейтрали**), поэтому направление результирующего потока смещается к противоположным краям главных полюсов.

Для уменьшения влияния поля реакции якоря щетки смещают с **геометрической нейтрали** на **физическую нейтраль**, чтобы переключение секций якоря происходило при нулевой ЭДС. В машинах мощностью 1 кВт и более применяют **добавочные полюса** для компенсации реакции якоря.

8.3 Основные уравнения.

Мгновенная ЭДС проводника обмотки якоря:

$$e = Blv,$$

где B – индукция магнитного поля;
 l – длина проводника;
 v – скорость перемещения проводника.

Суммарная ЭДС активных проводников:

$$\sum_1^{N/2a} Blv = \frac{N}{2a} \cdot \frac{2pn}{60} \Phi = \frac{pN}{60a} n\Phi,$$

где N – полное число активных проводников обмотки;
 a – число параллельных ветвей обмотки;
 $N/2a$ – число проводников, входящих в одну ветвь.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЭДС обмотки якоря:

$$E_a = \sum_1^{N/2a} e = C_E n \Phi; \quad C_E = \frac{pN}{60a}.$$

Электромагнитная мощность двигателя:

$$P_{эм} = E_a I_a,$$

где I_a – ток якоря.

Уравнение электромагнитного момента МПТ:

$$M = \frac{P_{эм}}{\omega_a} = \frac{C_E \Phi n I_a}{\omega_a} = \frac{30}{\pi} C_E \Phi I_a = C_M \Phi I_a,$$

$$C_M = \frac{pN}{2\pi a} = \frac{30C_E}{\pi}.$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Уравнение электрического равновесия ДПТ:

$$U = E_a + I_a R_{ac}, \quad (U > E_a).$$

Ток якоря ДПТ:

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_{ac}}.$$

Уравнение электрического равновесия ГПТ:

$$U = E_a - I_a R_{ac}, \quad (U < E_a).$$

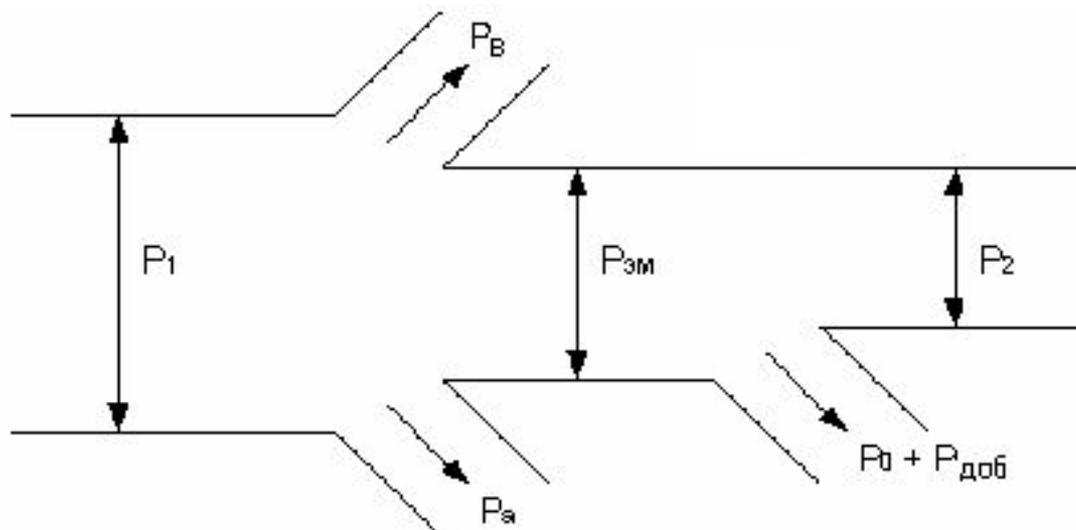
Ток якоря ГПТ:

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_{ac}}.$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

8.4 КПД.

Энергетическая диаграмма МПТ:



$$P_1 = UI_a + UI_\epsilon$$

$$P_a = I_a^2 R_{ac}$$

$$P_\epsilon = UI_\epsilon$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 8. ЭЛЕКТРОМАШИННЫЕ УСТРОЙСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА

$$P_{эм} = P_1 - P_a - P_v = E_a I_a$$

$$P_0 = P_{ст} + P_{мех}$$

$$P_{ст} = P_{вихр} + P_{зист}$$

$$\sum P = P_a + P_v + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб}$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum P}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$$

$$P_2 = P_1 - \sum P$$

$$\eta_{ном} = 0,15 \dots 0,4$$

$$\eta_{ном} = 0,5 \dots 0,8$$

Лекция 9
ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

- 9.1 Способы возбуждения ДПТ.**
- 9.2 Пуск и регулирование ДПТ.**
- 9.3 Якорное регулирование ДПТ.**
- 9.4 Полюсное регулирование ДПТ.**
- 9.5 Импульсное регулирование ДПТ.**

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 9. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

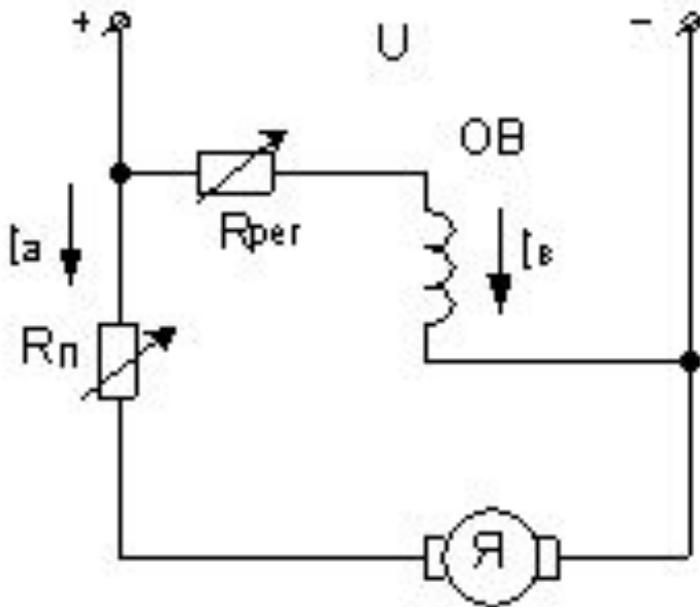
9.1 Способы возбуждения ДПТ.

Применяются для получения определенных выходных характеристик ДПТ.

- ▶ **ДПТ с независимым возбуждением** (обмотка возбуждения электрически не связана с обмоткой якоря):

$$U_{\text{в}} \neq U_{\text{я}}.$$

- ▶ **ДПТ с параллельным возбуждением** (обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря):

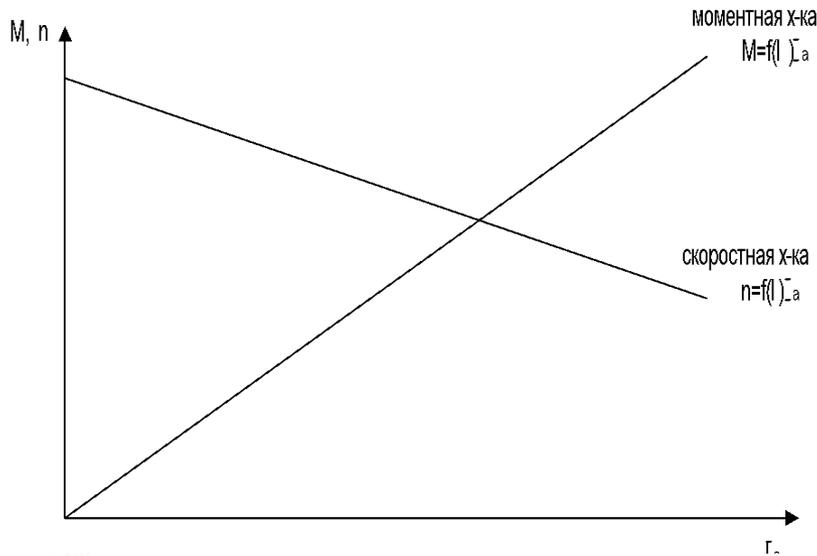


$$U_{\text{в}} = U_{\text{я}};$$

$$\Phi \approx const.$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 9. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА.

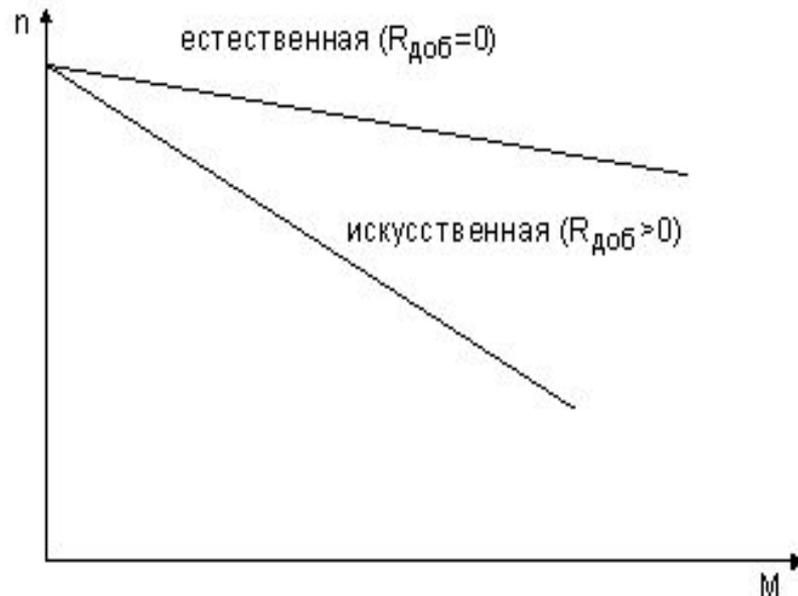


Моментная характеристика ДПТ:

$$M = C_M \Phi I_a.$$

Скоростная характеристика ДПТ:

$$n = \frac{E}{C_E \Phi} = \frac{U - I_a R_{ac}}{C_E \Phi}.$$



Механическая характеристика ДПТ:

$$n = \frac{U - I_a R_{ac}}{C_E \Phi} = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{M R_{ac}}{C_E C_M \Phi^2}.$$

- **ДПТ с последовательным возбуждением** (обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря):

$$I_e = I_a.$$

В линейном режиме при $I_a < I_{ном}$:

$$\Phi = k_{\Phi} I_a,$$

$$k_{\Phi} = const.$$

Моментная характеристика ДПТ (парабола):

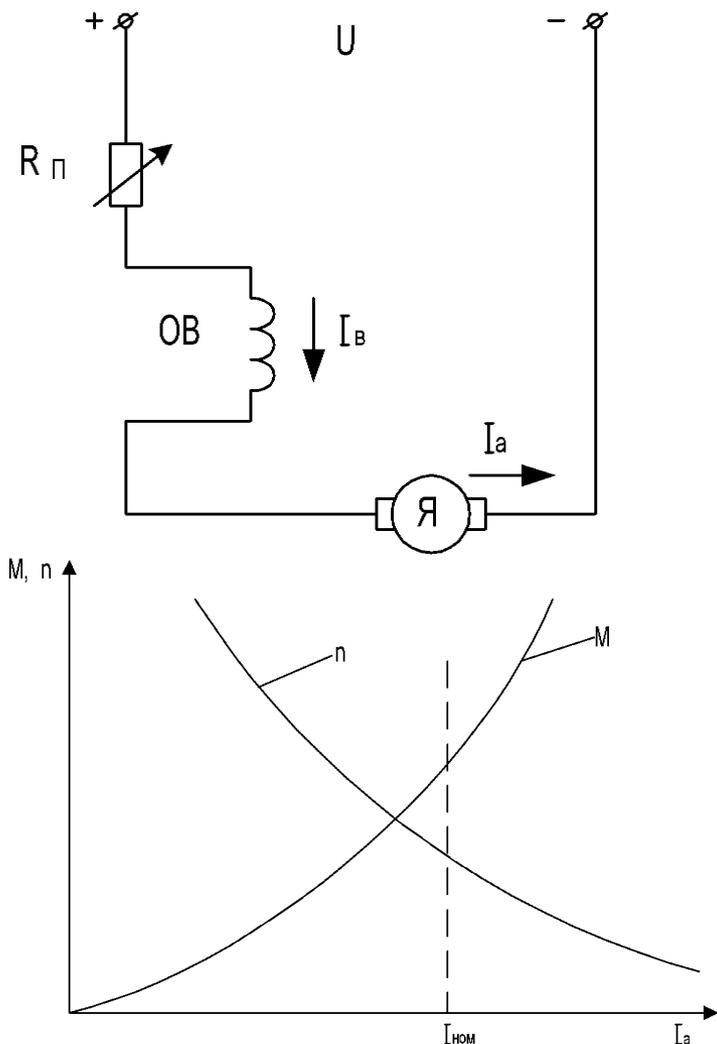
$$M = C_M \Phi I_a = C_M k_{\Phi} I_a^2.$$

Скоростная характеристика ДПТ (гипербола):

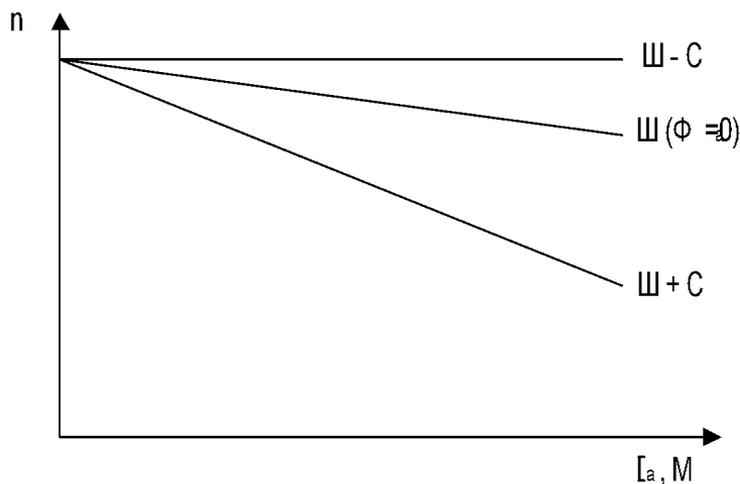
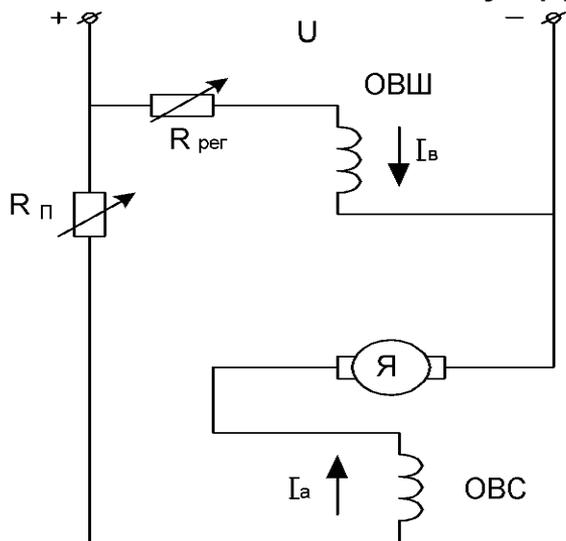
$$n^{\uparrow} = \frac{U - I_a R_{ac}}{C_E \Phi} = \frac{U - I_a R_{ac}}{C_E k_{\Phi} I_a} = k_1 \frac{U}{I_a^{\downarrow}} - k_2.$$

В насыщенном режиме при $I_a > I_{ном}$:
характеристики переходят в линейный вид.

В режиме, близком к ХХ, ДПТ идет «вразнос», поэтому режим ХХ допустим только при мощностях до 100 Вт.



- **ДПТ со смешанным возбуждением** (параллельная и последовательная части обмотки возбуждения включены соответственно с обмоткой якоря):



$$\Phi = \Phi_{Ш} \pm \Phi_{С}.$$

При согласном включении частей ОВ:

$$\Phi = \Phi_{Ш} + \Phi_{С}.$$

Скоростная характеристика ДПТ:

$$n_{\downarrow} = \frac{U - I_a^{\uparrow} R_{ac}}{C_E (\Phi_{Ш} + \Phi_{С}^{\uparrow})}.$$

При встречном включении частей ОВ:

$$\Phi = \Phi_{Ш} - \Phi_{С}.$$

Скоростная характеристика ДПТ:

$$n^{\uparrow\downarrow} = \frac{U - I_a^{\uparrow} R_{ac}}{C_E (\Phi_{Ш} - \Phi_{С}^{\uparrow})}.$$

9.2 Пуск и регулирование ДПТ.

Пуск – совокупность электрических, электромагнитных и механических переходных процессов, протекающих при подключении электрической машины к источнику питания до выхода на номинальный режим.

При пуске ДПТ изменяется ток якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_a}{R_{ac}},$$

$$E_a = C_E n \Phi.$$

Пусковой ток ДПТ:

$$I_n = \frac{U}{R_{ac}} = (3 \dots 15) I_{ан}.$$



$$I_n = \frac{U}{(R_{ac} + R_n)} = (2 \dots 3) I_{ан}.$$

ДПТ малой мощности пускают **непосредственным включением** в сеть, т.к. сопротивление якоря велико, пуск кратковременный.

ДПТ средней и большой мощности имеют большую кратность пускового тока и длительный пуск, поэтому используют **пусковой реостат** последовательно с якорной обмоткой, который по мере разгона якоря выводят от максимума до нуля.

Регулирование частоты вращения электрической машины – процесс изменения частоты вращения путем изменения управляющих воздействий и (или) параметров.

Частота вращения ДПТ:

$$n = \frac{U - I_a(R_{ac} + R_{\Pi})}{C_E \Phi}.$$

В соответствии с этим возможно регулирование частоты вращения ДПТ:

- ▶ включением добавочного реостата R_{Π} в цепь обмотки якоря;
- ▶ изменением питающего напряжения U ;
- ▶ изменением магнитного потока возбуждения Φ .

9.3 Якорное регулирование ДПТ.

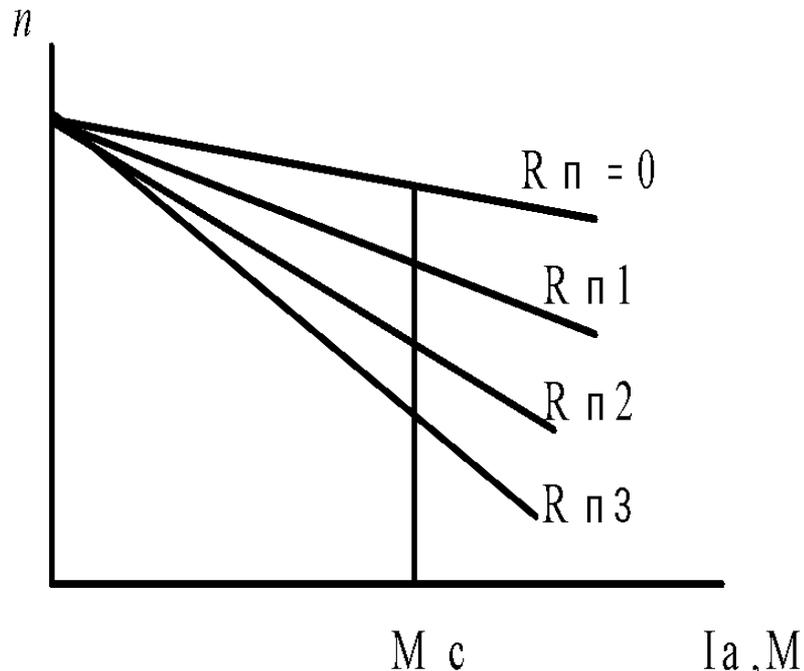
Якорное регулирование – реализуется при воздействии на ток якоря ДПТ.

При якорном регулировании включением добавочного реостата R_{Π} :

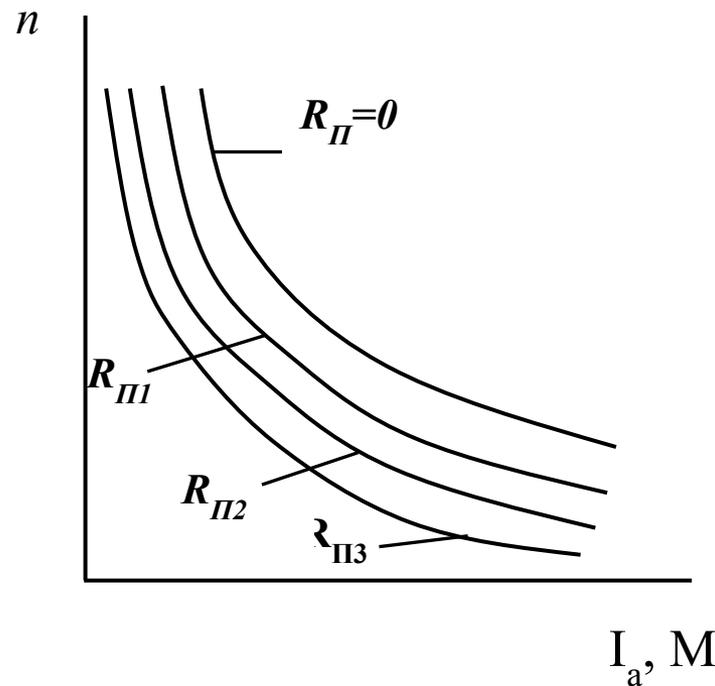
$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{I_a(R_{ac} + R_{\Pi})}{C_E \Phi} = n_o - \Delta n,$$

где n_o – частота вращения ХХ; Δn – изменение частоты вращения вследствие падения напряжения в якоре.

Скоростные и механические характеристики ДПТ:



с параллельным возбуждением



с последовательным возбуждением

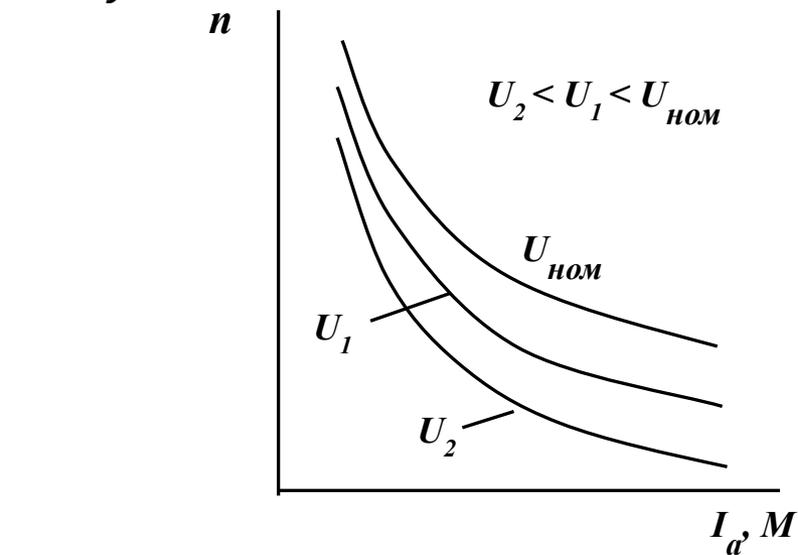
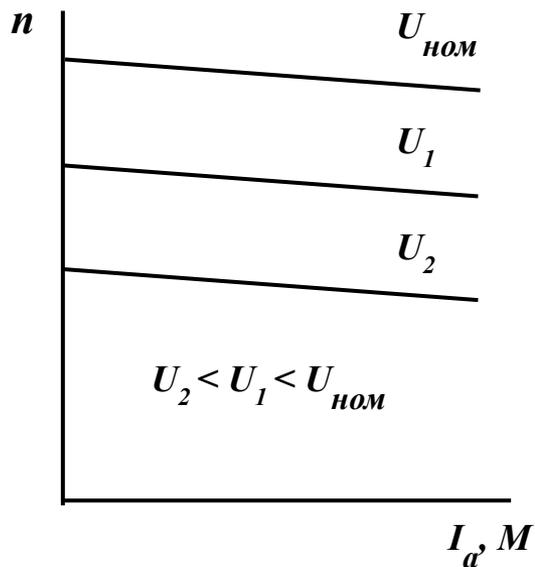
Недостатки якорного регулирования включением добавочного реостата $R_{п}$:

- ▶ **большие потери в добавочном реостате;**
- ▶ **регулировка только в сторону уменьшения частоты вращения.**

Применяется для получения «мягких» характеристик.

При якорном регулировании изменением питающего напряжения ДПТ происходит параллельное смещение характеристик за счет изменения частоты вращения ХХ, а изменение частоты остается const.

Скоростные и механические характеристики ДПТ с параллельным возбуждением :



с параллельным возбуждением

с последовательным возбуждением

Недостатки якорного регулирования изменением питающего напряжения ДПТ:

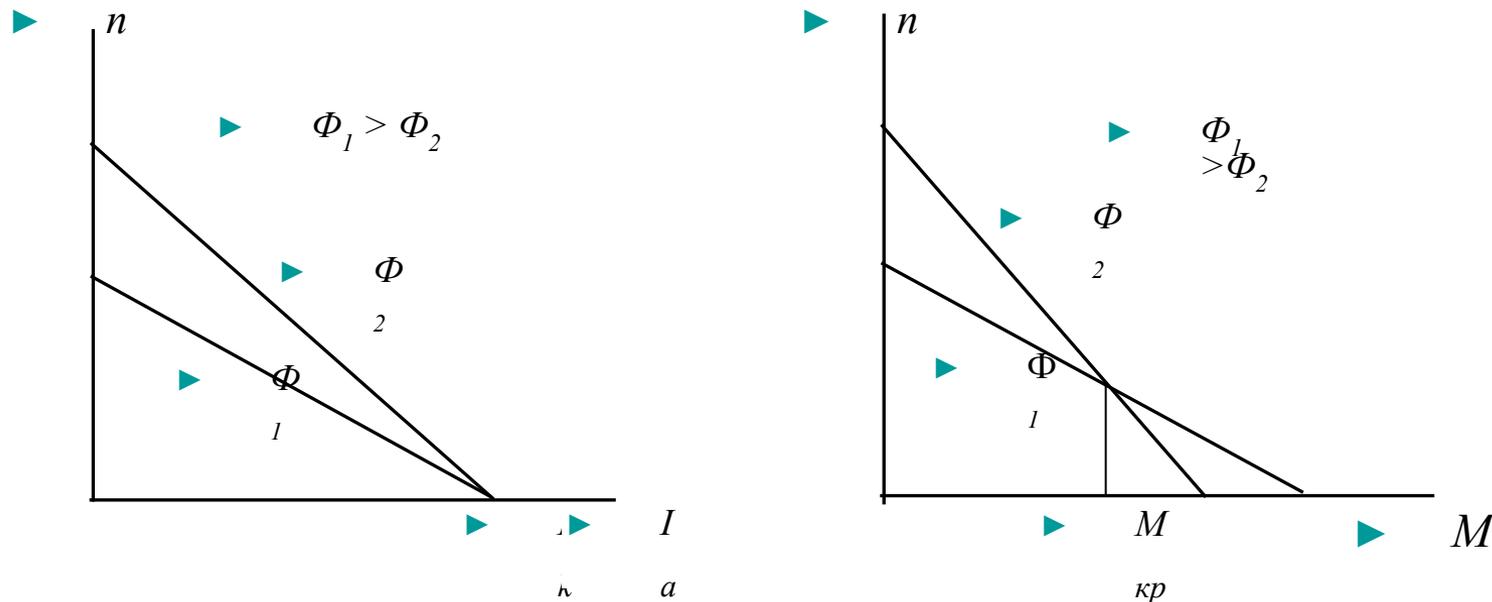
- ▶ регулировка только в сторону уменьшения частоты вращения.

Применяется в исполнительных двигателях для устройств автоматики.

9.4 Полюсное регулирование ДПТ.

Полюсное управление – реализуется при воздействии на поток возбуждения, частоту вращения можно изменять как в сторону уменьшения, так и увеличения относительно частоты вращения ХХ.

Скоростные и механические характеристики ДПТ с параллельным возбуждением:



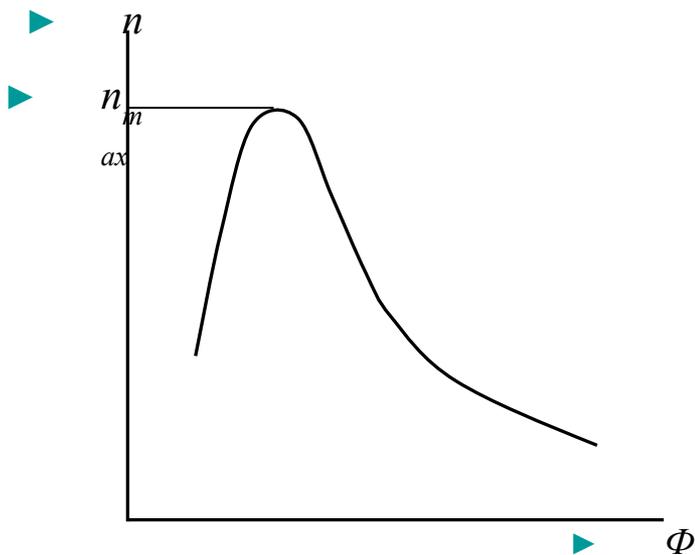
Преимущества полюсного регулирования ДПТ с параллельным возбуждением:

► **простота, экономичность.**

Применяется в силовых двигателях.

Полюсное управление – реализуется при воздействии на поток возбуждения, частоту вращения можно изменять как в сторону уменьшения, так и увеличения относительно частоты вращения ХХ.

Регулировочная характеристика ДПТ с последовательным возбуждением:

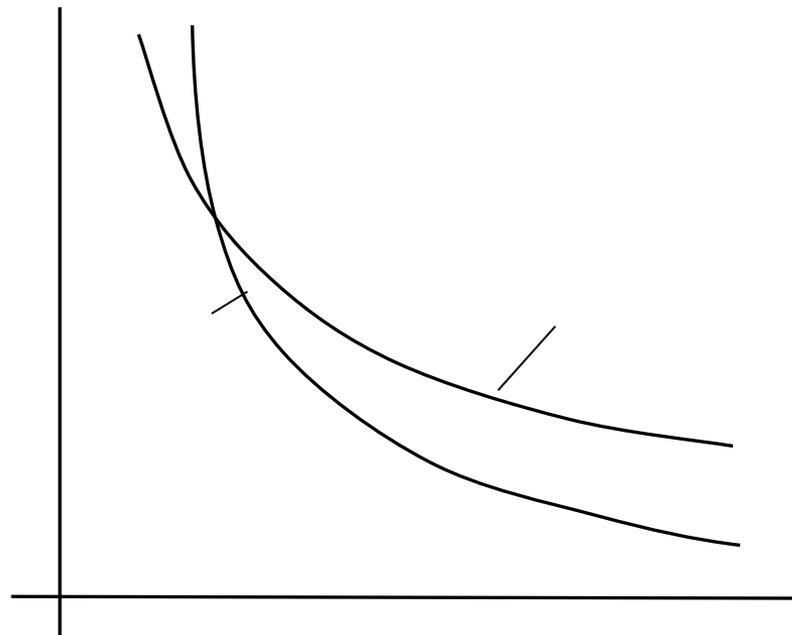
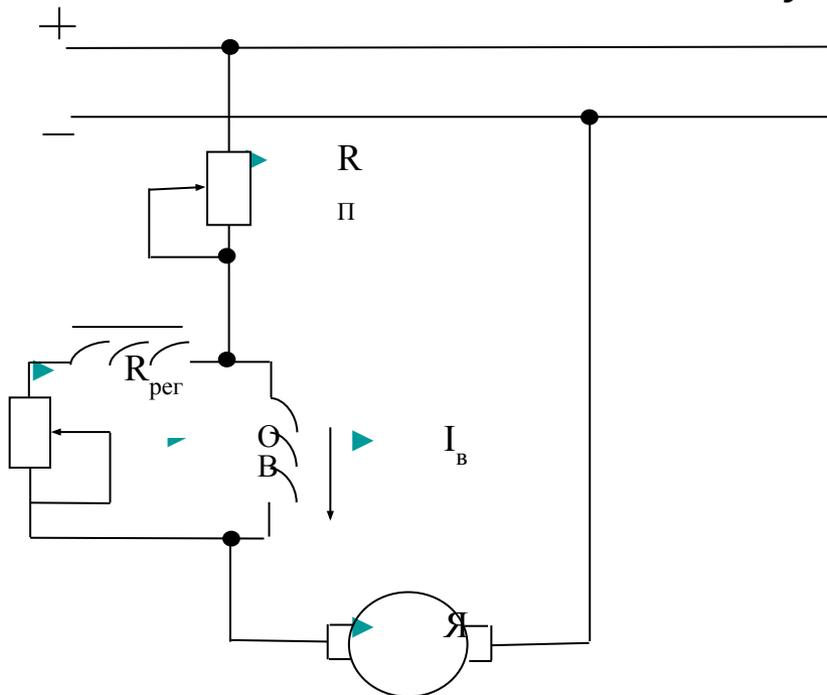


Преимущества полюсного регулирования ДПТ с параллельным возбуждением:

- ▶ **простота, экономичность.**

Применяется в силовых двигателях.

Схема и механические характеристики ДПТ с последовательным возбуждением:



$$I_{\text{в}} = \frac{I_a R_{\text{пер}}}{R_{\text{в}} + R_{\text{пер}}} = \beta I_a$$

$$n_{\text{max}} / n_{\text{min}} = 2 \dots 5$$

Лекция 10
ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА
(продолжение).

- 10.1 Микродвигатели постоянного тока.**
- 10.2 Универсальные коллекторные двигатели.**
- 10.3 Исполнительные ДПТ.**
- 10.4 Тахогенераторы.**

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

10.1 Микродвигатели постоянного тока.

Микродвигатели – маломощные малогабаритные двигатели для систем автоматики и управления.

Микродвигатели:

- ▶ *обычной конструкции;*
- ▶ *с полым якорем;*
- ▶ *с печатной обмоткой якоря (дисковый или цилиндрический якорь).*

Достоинства: малый момент инерции, высокое быстродействие и момент, при печатной обмотке якоря – повышенная перегрузочная способность.

Недостатки: высокая МДС якоря, повышенные потери, малый КПД.

10.2 Универсальные коллекторные двигатели.

Универсальные коллекторные двигатели – работают на постоянном и переменном токе при использовании **последовательного возбуждения**.

При изменении направления тока одновременно изменяется знак потока возбуждения и потока якоря, в результате **направление вращения якоря не изменяется**.

$$i(t) = I_m \sin \omega t;$$

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \psi).$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

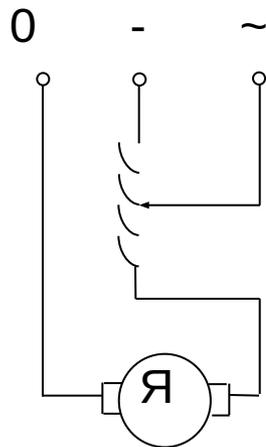
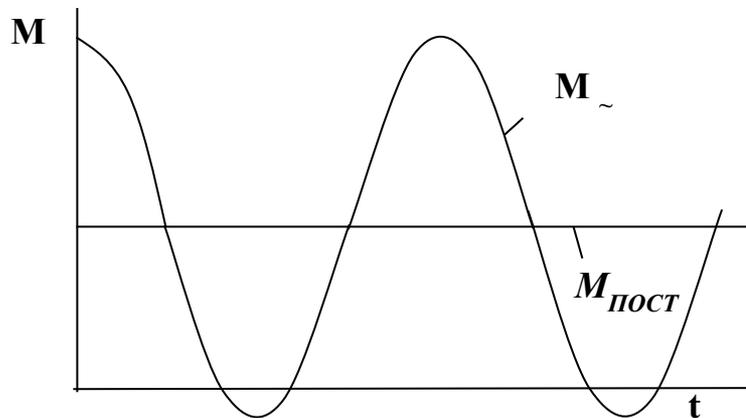
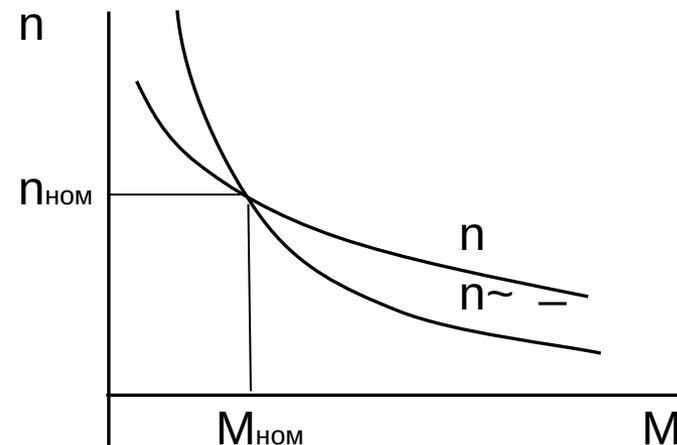


схема питания



момент



механические характеристики

$$m(t) = C_M \Phi i(t) = \frac{1}{2} C_M I_m \Phi_m (\cos \psi - \sin(2\omega t - \psi)) = M_{пост} - M_{пер}(t).$$

Фазовый сдвиг ψ обусловлен магнитными потерями и приводит к появлению тормозных моментов, поэтому вся магнитная система должна быть шихтованной.

При работе **на постоянном токе** включается вся обмотка возбуждения, **на переменном токе** – только ее часть для получения одинаковой **номинальной частоты вращения**.

Недостатки: низкий КПД, «плохая» коммутация из-за трансформаторной ЭДС, вибрация и шум.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

10.3 Исполнительные ДПТ.

В качестве **исполнительных** используют двигатели **независимого возбуждения** *обычной конструкции*, или (для повышения быстродействия) с *полым или дисковым якорем*.

Достоинства исполнительных ДПТ:

- ▶ прямолинейные механические и регулировочные характеристики;
- ▶ простые способы управления;
- ▶ широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- ▶ отсутствие самохода;
- ▶ большой пусковой момент;
- ▶ малая мощность управления;
- ▶ быстродействие;
- ▶ малые габариты.

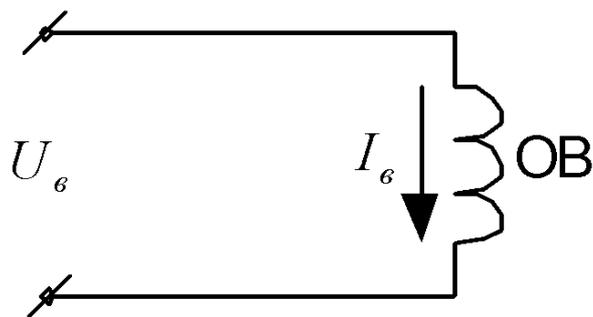
Недостатки:

- ▶ наличие скользящего контакта между щётками и коллектором;
- ▶ малый срок службы коллекторно-щёточного устройства.

Управление исполнительными ДПТ: **якорное** и **полюсное**.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

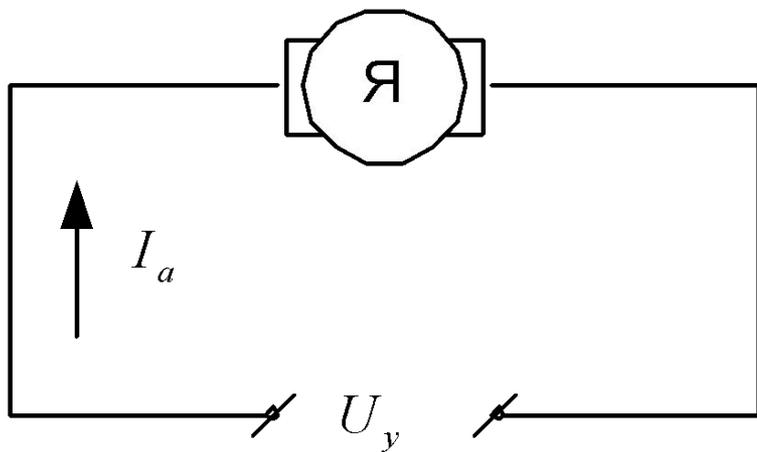
Исполнительные ДПТ с якорным управлением.



$$U_{\text{в}} = U_{\text{НОМ}} = \text{const};$$
$$\Phi = \text{const};$$
$$U_{\text{у}} = \text{var}.$$

Коэффициент сигнала:

$$\alpha = \frac{U_{\text{у}}}{U_{\text{в}}} = \frac{U_{\text{у}}}{U_{\text{НОМ}}}.$$



Самоход – вращение якоря при нулевом коэффициенте сигнала.

$$U_{\text{у}} = 0; I_{\text{а}} = 0 \Rightarrow M = C_M \Phi I_{\text{а}} = 0,$$

т.е. при якорном управлении самоход не возникает.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

Основные характеристики исполнительного двигателя – **механические** и **регулируемые** – приводят в относительных величинах.

Относительные величины - **коэффициент сигнала, частота вращения, момент:**

$$\alpha = \frac{U_y}{U_{уном}};$$

$$\nu = \frac{n}{n_0};$$

$$m = \frac{M}{M_{кном}},$$

где $M_{кном}$ – номинальный пусковой момент при $n=0$;
 n_0 - частота вращения ХХ.

$$M_{кном} = \frac{U_{ном} C_M \Phi}{R_{ac}};$$

$$n_0 = \frac{U_{ном}}{C_E \Phi}.$$

Уравнение для расчета характеристик двигателя независимого возбуждения:

$$n = \frac{U_y - I_a R_{ac}}{C_E \Phi} = \frac{U_y}{C_E \Phi} - \frac{R_{ac}}{C_E C_M \Phi^2} M;$$

$$\nu = \alpha - m.$$

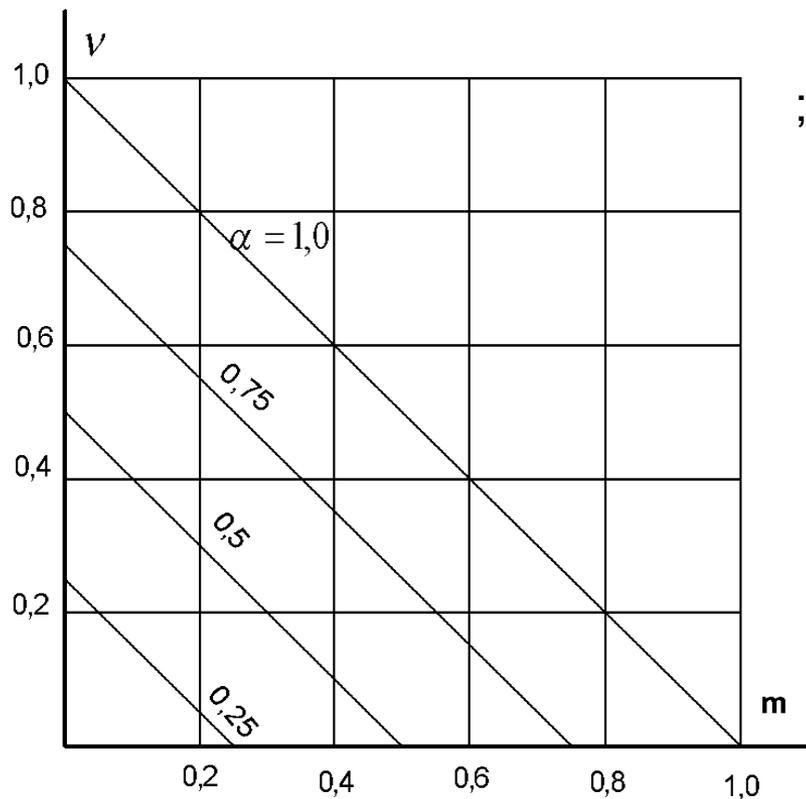
Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

Характеристики исполнительного ДПТ с якорным управлением:

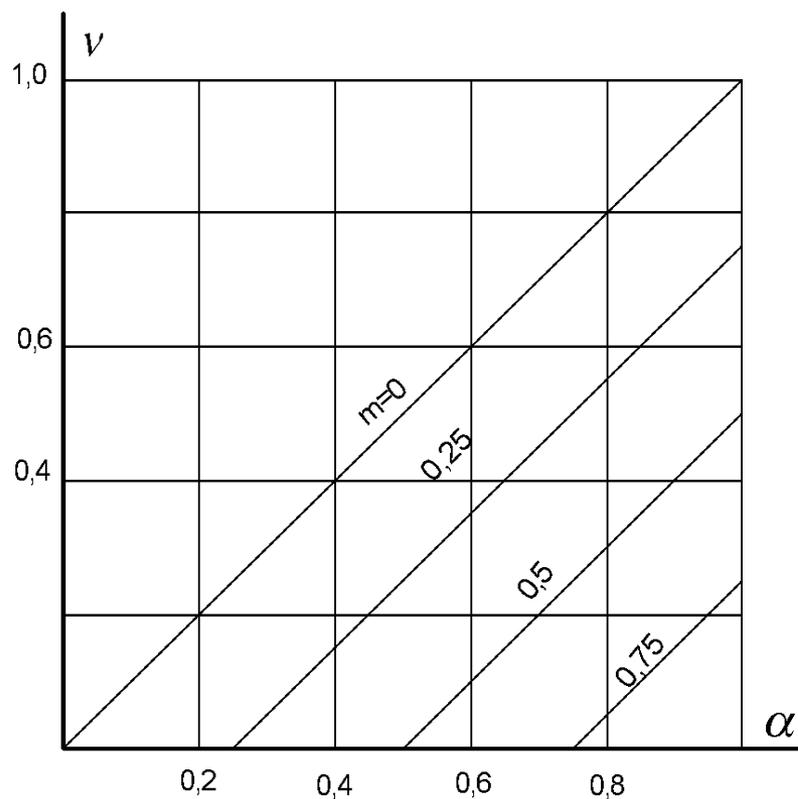
$$v = f(\alpha), \quad m = const.$$

$$v = f(m), \quad \alpha = const.$$

Механическая



Регулировочная



Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 10. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА (продолжение).

Особенности характеристик при якорном управлении:

- ▶ Механическая и регулировочная характеристики линейны;
- ▶ При пуске ($v = 0$) $m = m_{\max}$;
- ▶ $m_k = \alpha$ (т.е. $M_p \sim U_y$);
- ▶ Напряжение трогания ($v = 0$) $U_{tr} \sim M_c$, т.к. $\alpha_{tr} = m$;
- ▶ $v_0 = \alpha$ (т.е. $n \sim U_y$);
- ▶ При $\alpha = 1$ $v = m_{\max}$.

;

Лекция 11

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

11.1 Общие сведения.

11.2 Магнитное поле машины переменного тока.

11.3 Асинхронные машины переменного тока.

11.4 Конструкция и принцип действия.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

11.1 Общие сведения.

Электрические машины переменного тока осуществляют прямое и обратное преобразование электрической энергии переменного тока и механической энергии посредством вращающегося электромагнитного поля.

Электрические машины переменного тока

Асинхронные

Синхронные

Соотношение частот вращения магнитного поля статора n_1 и ротора n_2

Область применения

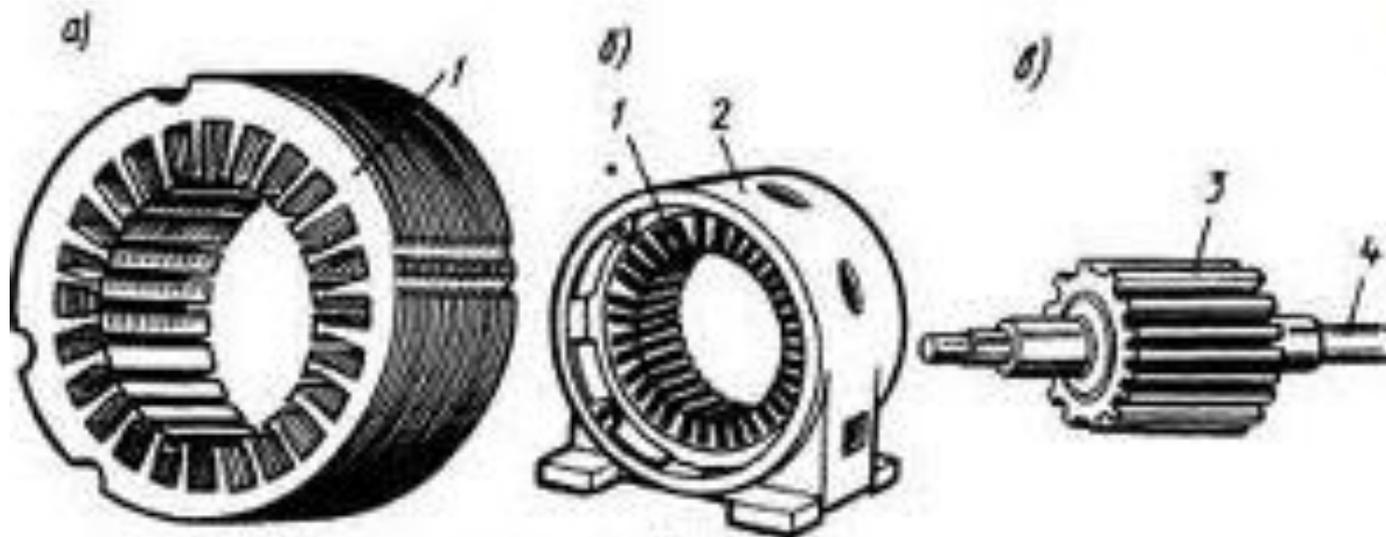
Конструкция статора:

Конструкция ротора

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Основные элементы конструкции:

1. Сердечник статора;
2. Корпус;
3. Сердечник ротора;
4. Вал;
5. Обмотки статора и ротора (на рисунке не показаны).



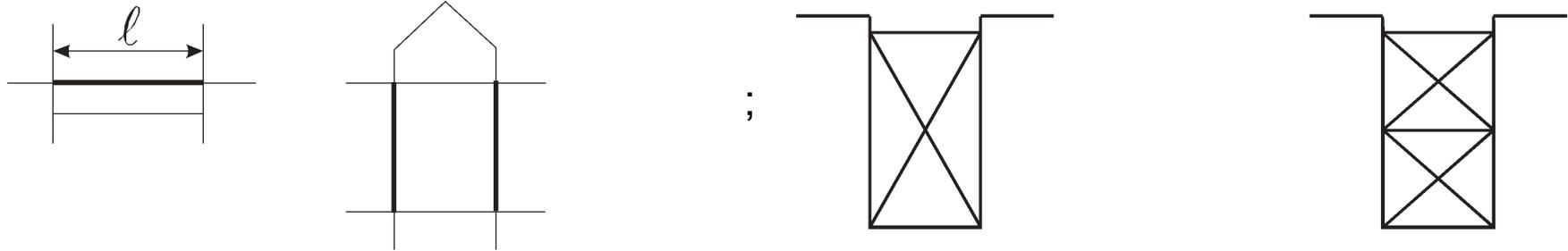
Исторически первыми машинами переменного тока были генераторы Фарадея и др. ученых, относящиеся к концу 18-го века.

Долгое время машины постоянного тока имели более высокие характеристики и совершенную конструкцию, пока в конце 19-го века не была изобретена трехфазная система питания, совершившая революцию в области электрических машин. С ее появлением были созданы трехфазные машины переменного тока, которые получили широкое распространение.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

11.2 Магнитное поле машины переменного тока.

Обмотка статора представляет собой распределенную по окружности обмотку, уложенную в пазах статора, витки которой состоят из **активных проводников** и соединяющих их **лобовых частей**.



**Активные проводники
и лобовая часть витка**

**однослойная
обмотки**

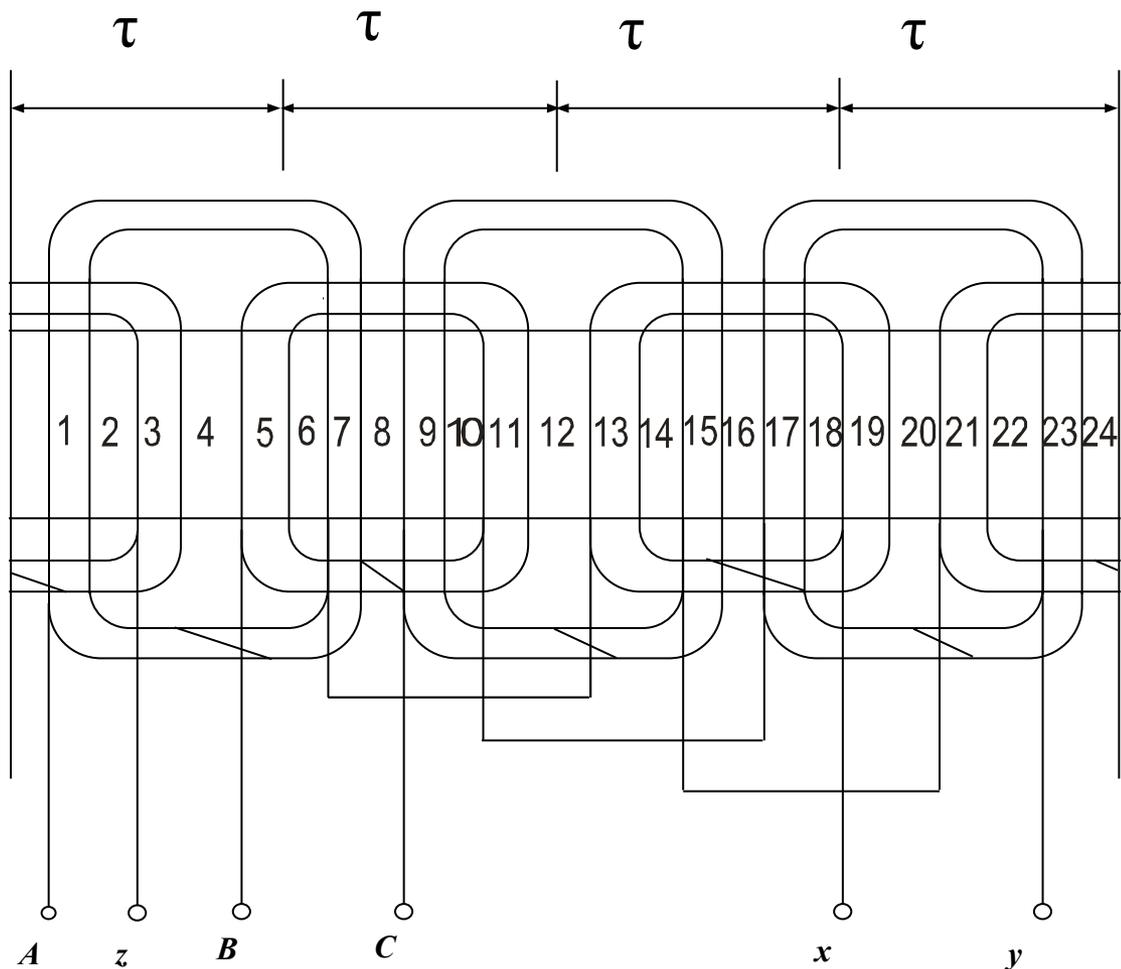
двухслойная

В зависимости от способа заполнения паза обмотки статора бывают **однослойные** и **двухслойные**.

Проводники обмотки соединяются в секции, а секции – в катушки. Катушки разбиваются на одинаковые группы по числу фаз и располагаются симметрично по окружности статора, образуя многофазную обмотку.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Пример трехфазной однослойной concentricкой двухплоскостной обмотки:



Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

Полюсное деление статора:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}; \quad \tau_Z = \frac{Z}{2p},$$

где D – диаметр расточки статора;
 p – число пар полюсов статора;
 Z – общее число пазов статора.

Распределенность обмотки по пазам определяется **числом пазов**,
приходящихся на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z}{2pm},$$

$q=1$ – сосредоточенная обмотка,
 $q>1$ – распределенная обмотка.

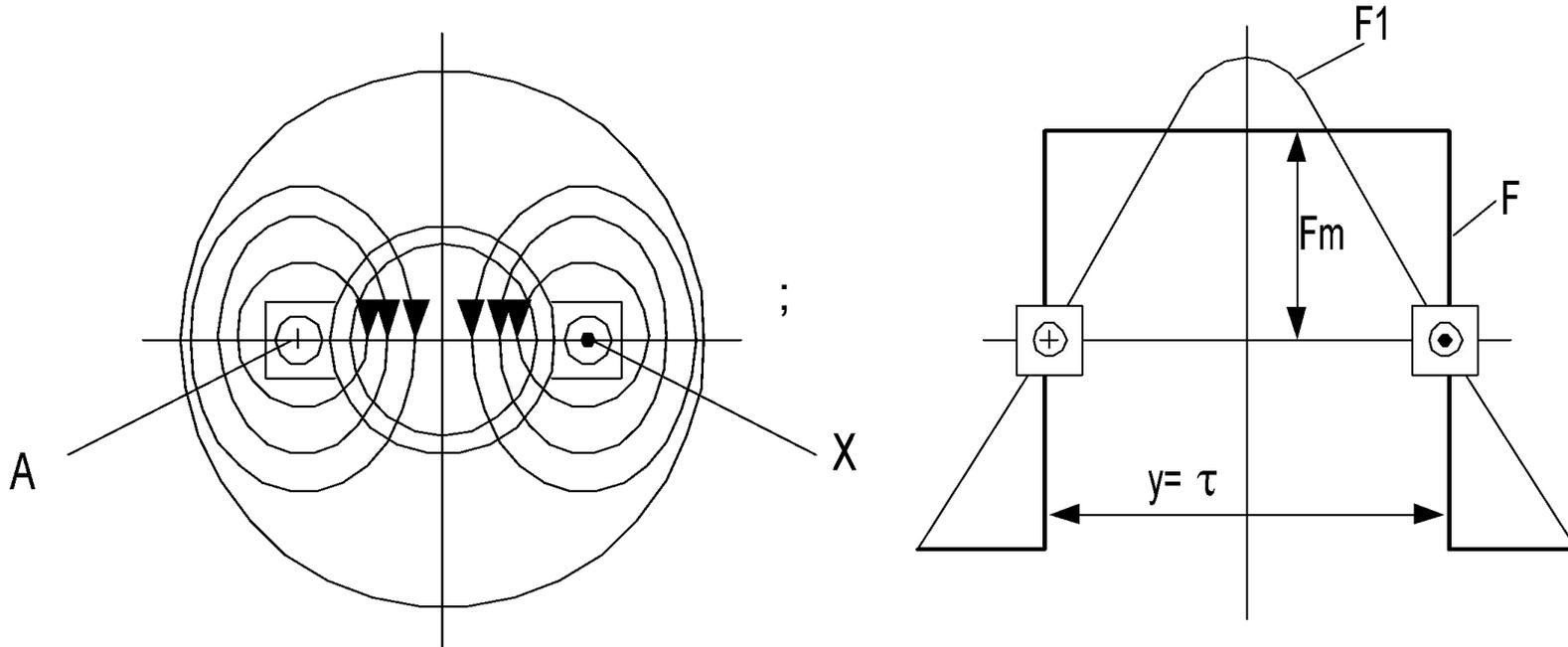
где m – число фаз машины.

Простейший элемент обмотки статора – виток, проводники которого уложены в пазах статора, расположенных на расстоянии y , равном полюсному делению τ .

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

МДС однофазной обмотки.

Простейшая двухполюсная машина с сосредоточенной обмоткой.



МДС обмотки при питании синусоидальным током:

$$F_K = \sqrt{2} I w = I_m w;$$

$$F_m = \frac{F_K}{2}.$$

I_m, F_m мгновенные значения тока и МДС.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.

МДС и магнитное поле однофазной обмотки - **пульсируют**, так как МДС имеет постоянное основание τ и переменную высоту F_m , пропорциональную мгновенному значению синусоидального тока.

Амплитуда основной гармоники МДС:

$$F_{1m} = \frac{4}{\pi} F_m = \frac{4\sqrt{2}}{2\pi} I_w = 0,9 I_w.$$

Основная пространственная гармоника МДС изменяется как во времени, так и в пространстве:

$$F_1(t, x) = 0,9 I_w \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \sin(\omega t).$$

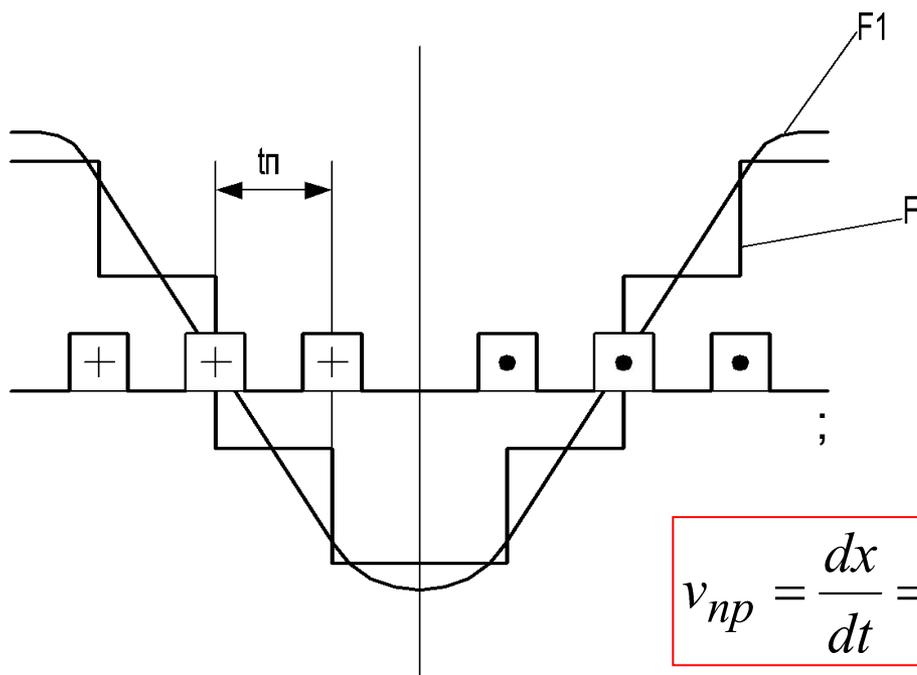
$$F_1(t, x) = \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right) = F_{np} + F_{обр};$$

Прямо и обратно бегущие волны МДС:

$$F_{np} = \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right);$$

$$F_{обр} = \frac{1}{2} F_{1m} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right).$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 11. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.



МДС распределенной однофазной обмотки:

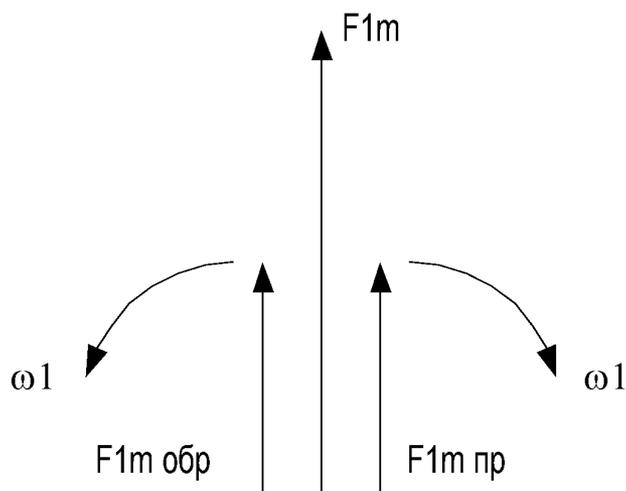
$$F_{1m} = 0,9 I w k_{об},$$

где $k_{об}$ – обмоточный коэффициент для 1-й гармоники.

Скорость и частота прямо бегущей волны:

$$v_{пр} = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega \tau}{\pi} = \frac{2\pi f_1 \tau}{\pi} = 2\tau f_1;$$

$$n_1 = \frac{60 v_{пр}}{\pi D} = \frac{60 \cdot 2\tau f_1}{2p\tau} = \frac{60 f_1}{p}.$$



МДС распределенной однофазной обмотки создает пульсирующую синусоидально во времени и пространственно распределенную МДС в виде геометрической суммы двух векторов половинной амплитуды и вращающихся в противоположных направлениях с угловой частотой ω_1

Лекция 12

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ.

12.1 Основные уравнения, схема замещения АД.

12.2 Энергетическая диаграмма и вращающий момент.

12.3 Основные характеристики АД.

Лекция 13

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2).

13.1 Конструкции АД.

13.2 Пуск и устойчивость работы АД.

13.3 Регулирование АД.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

13.1 Конструкции АД.

Однофазные асинхронные двигатели.

Однофазные АД – двигатели малой мощности для систем автоматики и бытовой техники.

Конструкция: статор с однофазной распределенной обмоткой, уложенной в пазах и занимающей 2/3 окружности; ротор с КЗ обмоткой.

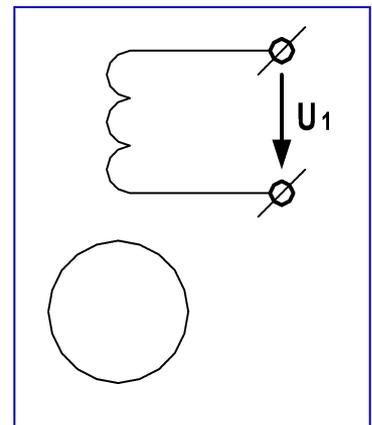
Магнитное поле: пульсирует с частотой сети и имеет распределение индукции, близкое к синусоидальному.

Скольжение ротора относительно прямо бегущего поля:

$$s_{np} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = s.$$

Скольжение ротора относительно обратно бегущего поля:

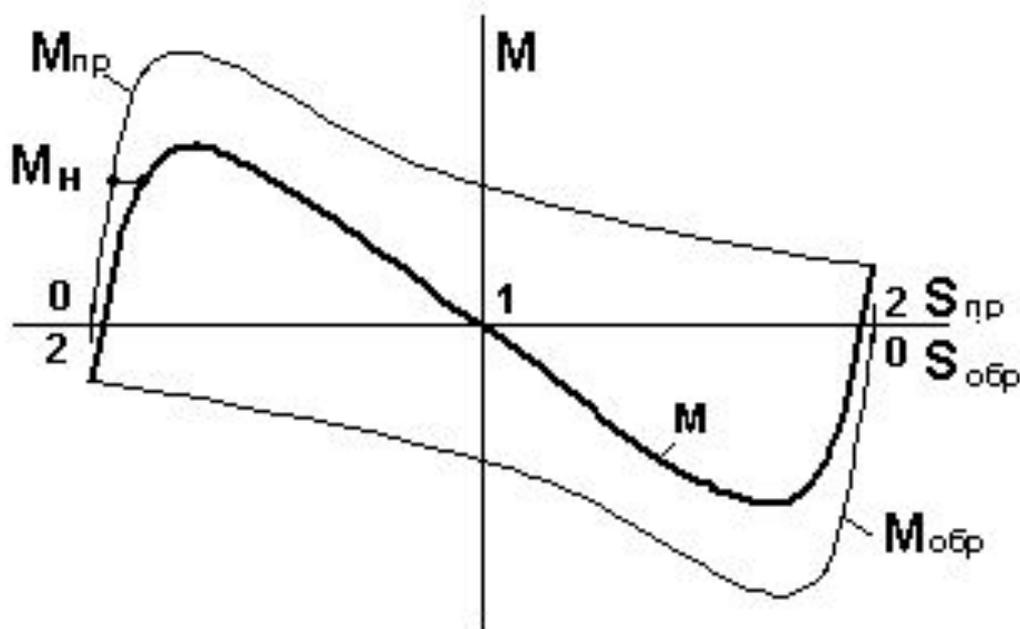
$$s_{обр} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_2}{n_1} = 2 - s$$



Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Электромагнитный момент определяется как результирующий, создаваемый прямо и обратно бегущими полями:

$$M = M_{пр} - M_{обр}$$



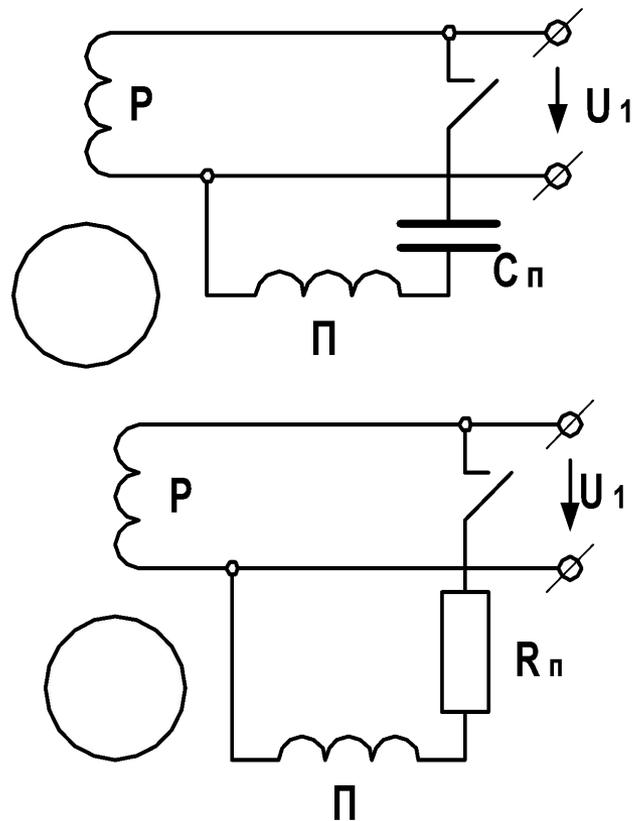
Особенности однофазного АД:

- ▶ не имеет пускового момента (при $s=1$);
- ▶ частота вращения ХХ меньше, чем у трехфазного двигателя;
- ▶ худшие рабочие характеристики из-за повышенного скольжения;
- ▶ почти в два раза меньшая мощность.

Для создания пускового момента в однофазных АД применяют *пусковую обмотку*, расположенную с пространственным сдвигом 90 эл. градусов, питаемую только во время пуска током, сдвинутым по фазе относительно тока основной обмотки статора с помощью R, C .

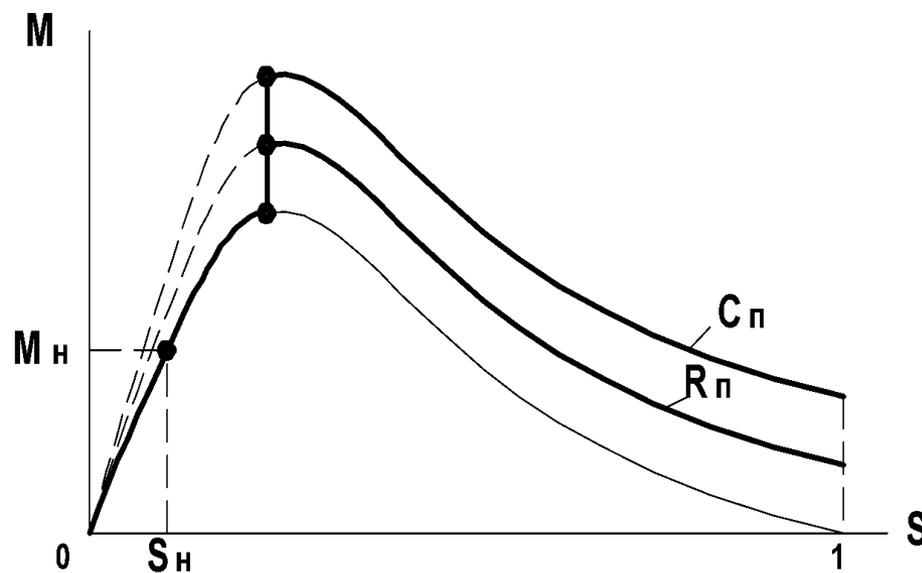
Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Схемы включения и характеристики однофазного АД.



При пуске с R поле эллиптическое, применяется для малых пусковых моментов.

При пуске с C можно получить и круговое поле.



Достоинства:

- ▶ простота конструкции;
- ▶ надежность.

Недостатки:

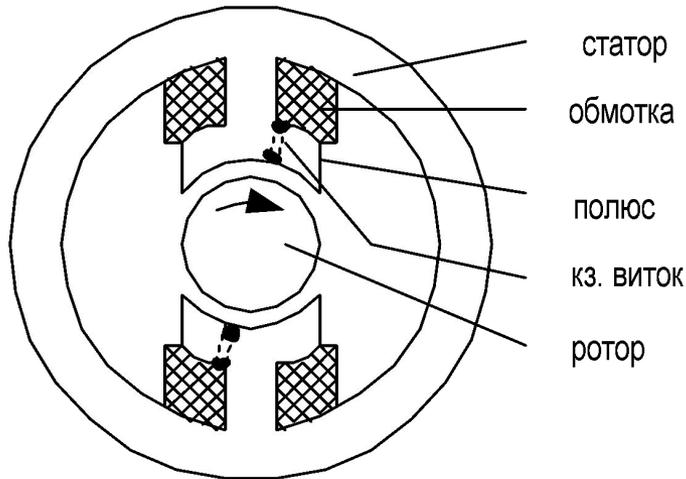
- ▶ большая емкость и габариты фазосдвигающего конденсатора (20...30 мкФ);
- ▶ худшие характеристики из-за обратно бегущего поля.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

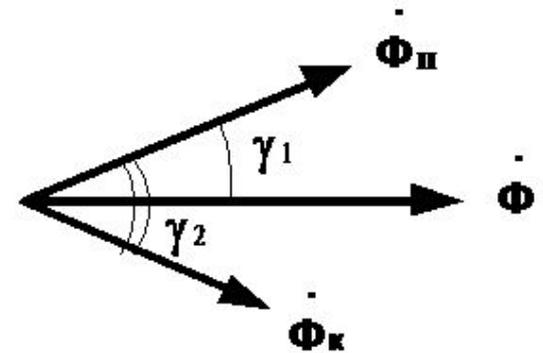
Однофазный АД с экранированными полюсами.

Конструкция: статор с явновыраженными полюсами, имеющими продольные пазы с КЗ витками (экранами) и сосредоточенной обмоткой; КЗ ротор.

Магнитное поле: эллиптическое, состоит из двух составляющих, смещенных в пространстве и по фазе.



$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_П + \dot{\Phi}_К$$



Достоинства:

- ▶ простота конструкции;
- ▶ меньшие шумы в работе;
- ▶ надежность.

Недостатки:

- ▶ невысокие характеристики;
- ▶ малая мощность и пусковой момент.
- ▶ нереверсивность;

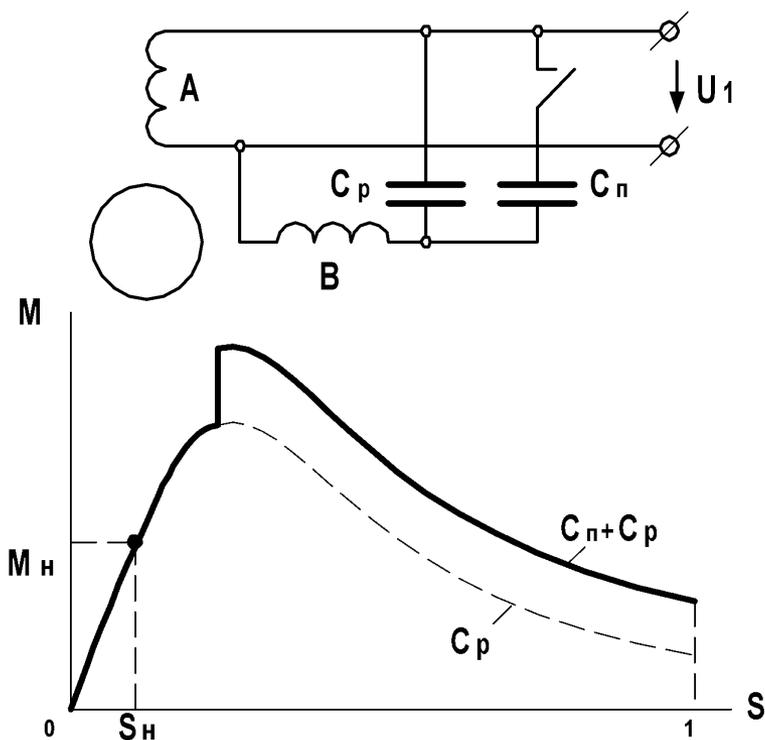
Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Конденсаторный АД.

Конструкция: статор с двумя равноценными обмотками, занимающими одинаковое число пазов, сдвинутыми в пространстве на 90 эл. градусов; КЗ ротор.

Магнитное поле: вращающееся во всех режимах работы, круговое при пуске и в номинальном режиме.

Питание: от однофазной сети, обмотка А – непосредственно, В – через C_p или C_p+C_n ($C_n = (5...7)C_p$).



$$C_p = \frac{I_A \cos \varphi_A}{U_1 f_1 k}; \quad k = \frac{U_B}{U_A} = \frac{w_B k_{обB}}{w_A k_{обA}}$$

Напряжение на конденсаторе:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = U_1 \sqrt{1 + k^2}$$

Достоинства:

▶ повышенный пусковой момент.

Недостатки:

▶ габариты конденсаторов.

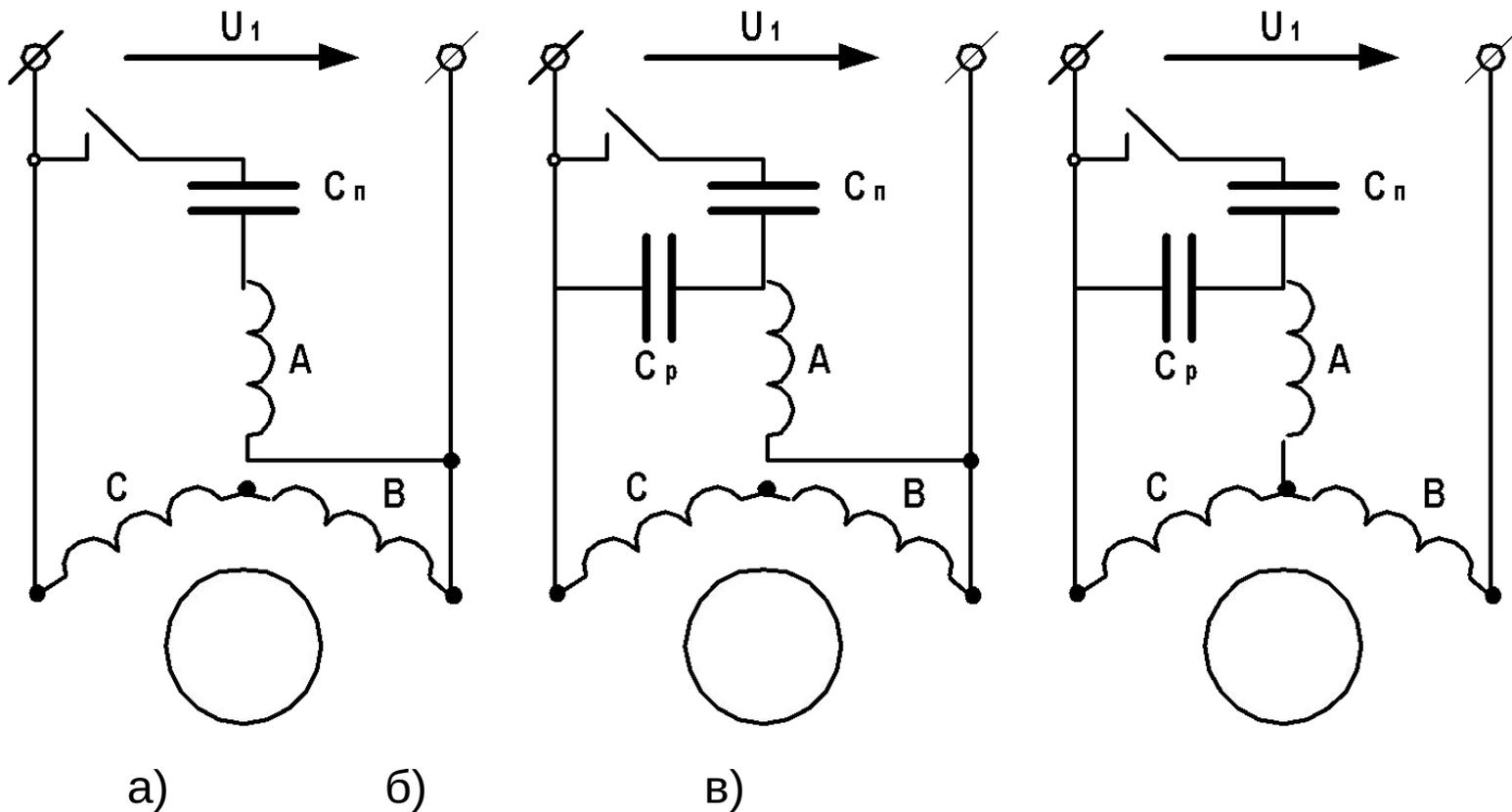
Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Универсальный АД.

Конструкция: статор с трехфазной распределенной обмоткой; КЗ ротор.

Магнитное поле: соответствующее режиму однофазному, конденсаторному, трехфазному режиму работы двигателя.

Питание: от однофазной, трехфазной сети.



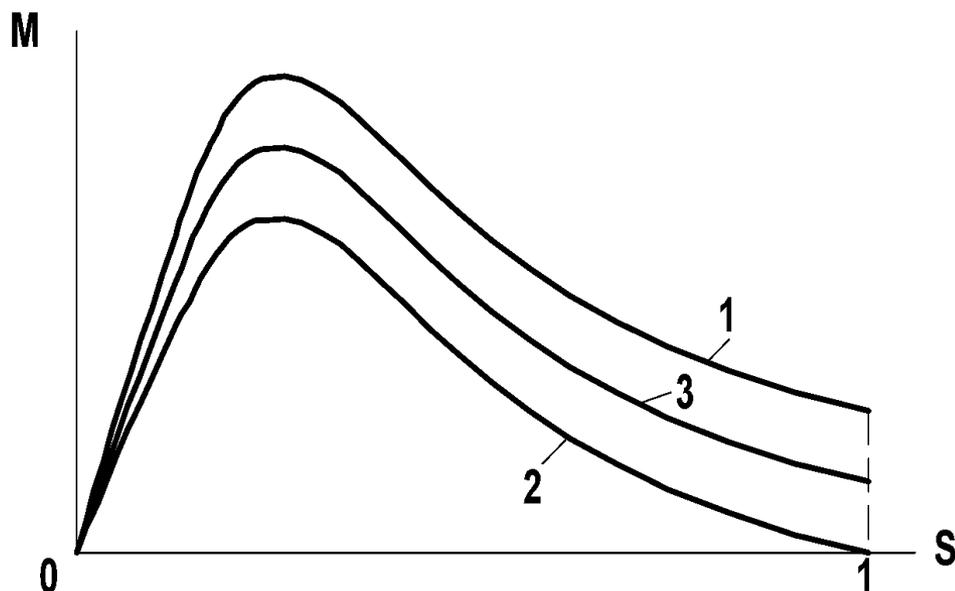
Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Емкость рабочего конденсатора:

б)
$$C_p = \frac{10^6}{2\omega_1 Z_\phi};$$

в)
$$C_p = \frac{10^6}{\sqrt{3}\omega_1 Z_\phi}.$$

Механические характеристики универсального АД:



- 1 – работа от трехфазной сети;
- 2 – работа от однофазной сети без конденсаторов (40...50% мощности);
- 3 – работа от однофазной сети с рабочим конденсатором (70...80% мощности).

Достоинства:

- ▶ универсальное питание;
- ▶ широкое применение.

Недостатки:

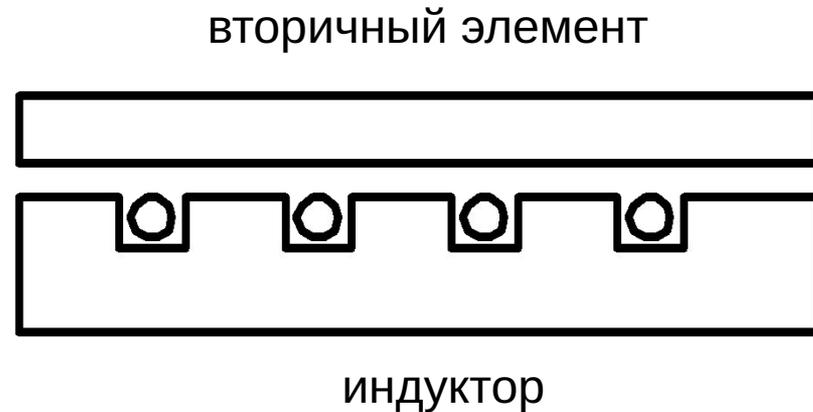
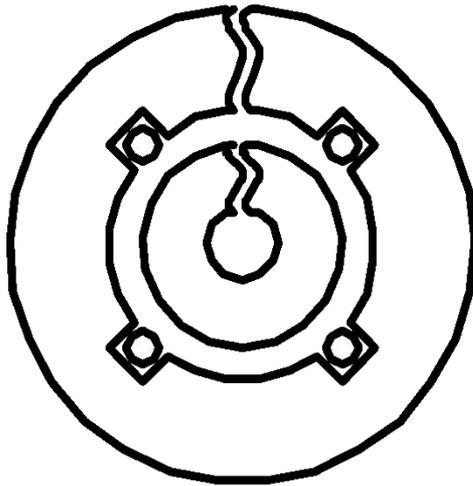
- ▶ габариты конденсаторов;
- ▶ малая мощность и пусковой момент.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Линейный АД (ЛАД).

Линейный АД – двигатель с неподвижным *индуктором* (статором), и подвижным *вторичным элементом*, который перемещается прямолинейно.

ЛАД получается из ротационного двигателя, если представить статор и ротор развернутыми в линию:



Индуктор создает бегущее магнитное поле со скоростью:

$$v_1 = 2\tau f_1.$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

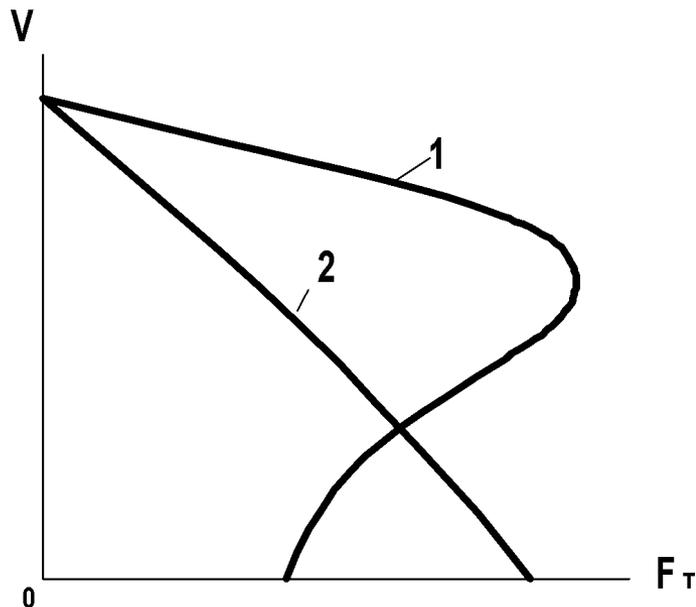
Тяговое усилие ЛАД:

$$F_T = \frac{B_\delta^2 v_1 s \Pi_1}{2 \rho_r (1 + \operatorname{tg}^2 \psi_2)},$$

где B_δ – магнитная индукция в зазоре;
 Π_1 – площадь активной поверхности индуктора;
 ρ_r – эффективное поверхностное сопротивление вторичного элемента;
 ψ_2 – фазовый сдвиг во вторичном элементе.

Тяговые характеристики ЛАД:

Скорость вторичного элемента:

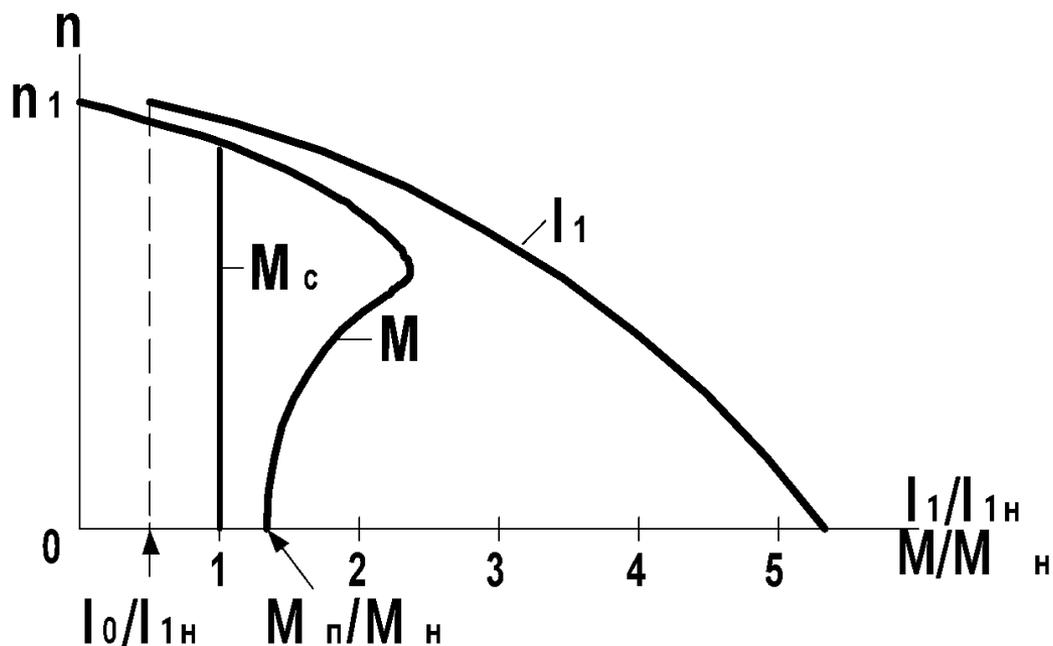


$$v_2 = v_1 (1 - s).$$

1 – короткозамкнутый вторичный элемент;
2 – ферромагнитный массивный вторичный элемент.

13.2 Пуск и устойчивость работы АД.

Прямой пуск (для АД мощностью до 100 кВт).



Пусковой момент:

$$M_n = \frac{m_1 U_1^2 R_2'}{\omega_1 (R_k^2 + X_k^2)}$$

$$k_{пм} = \frac{M_п}{M_H}$$

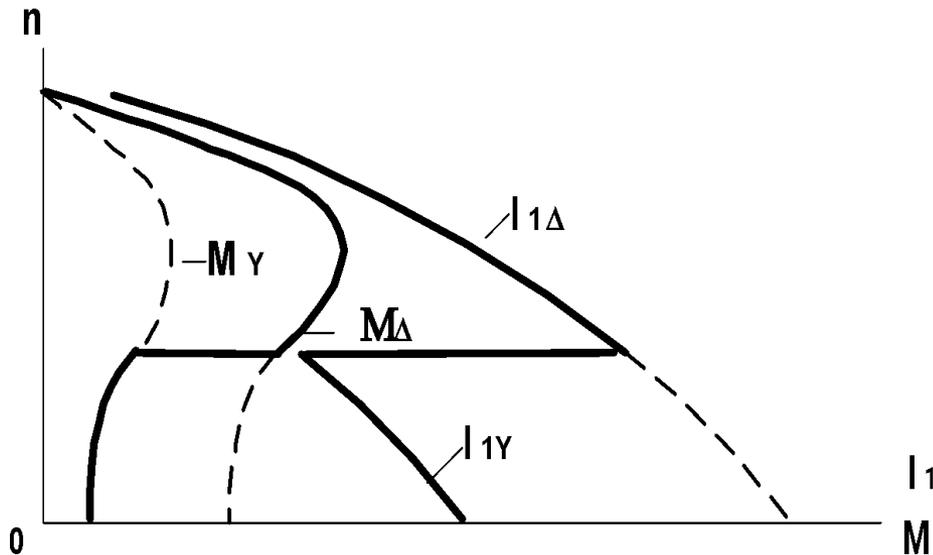
$$k_{пм} = 1,0...2,0$$

$$\frac{I_п}{I_H} = 5,0...7,0$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 13. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ (часть 2)

Пуск при пониженном напряжении:

- а) переключением схемы «треугольник» на пусковую схему «звезда»;
- б) включением в цепь статора на период пуска добавочных активных или индуктивных сопротивлений.



Лекция 14

ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. АСИНХРОННЫЕ ТАХОГЕНЕРАТОРЫ.

- 14.1 Общие сведения и конструкция.
- 14.2 Способы регулирования.
- 14.3 Характеристики.
- 14.4 Асинхронные тахогенераторы.

Лекция 15 СЕЛЬСИНЫ.

- 15.1 Общие сведения и конструкция.
- 15.2 Индикаторный режим сельсинов.
- 14.3 Трансформаторный режим сельсинов.
- 14.4 Дифференциальный сельсин.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ

15.1 Общие сведения и конструкция.

Сельсины – электрические машины переменного тока, относящиеся к устройствам синхронной связи, которые используются для измерения или передачи на расстояние угловых перемещений двух или нескольких валов, механически не связанных друг с другом.

Сельсин-датчик (СД) – один из сельсинов, механически соединенный с ведущей осью и преобразующий угол поворота в электрический сигнал.

Сельсин-приемник (СП) – другой сельсин, соединенный с ведомой осью (непосредственно или с помощью промежуточного исполнительного двигателя) и преобразующий электрический сигнал в угловое перемещение.

Конструкция сельсинов: двухполюсные статор и ротор с **обмотками возбуждения** (однофазная или *трехфазная*) и **синхронизации** (всегда *трехфазная*).

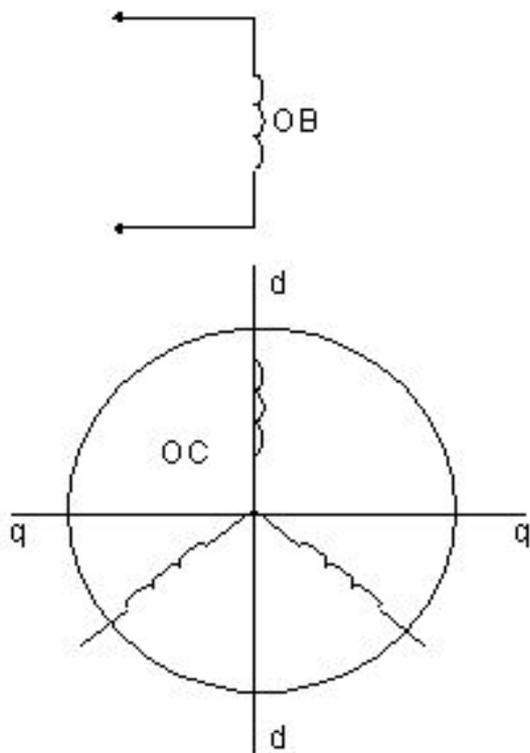


Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ

При значительных мощностях в системах «электрического вала» применяют **трехфазные сельсины**, по конструкции аналогичные АД с фазным ротором.

В системах автоматики обычно используют маломощные **однофазные сельсины**.



Расположение ОВ и ОС на статоре или роторе не является принципиальным вопросом.

Явнополюсные сельсины с *сосредоточенной* ОВ на явновыраженных полюсах, имеют неравномерный воздушный зазор для более синусоидального распределения индукции.

Неявнополюсные сельсины – с *распределенной* ОВ, уложенной в полужакрытых пазах.

Обмотка синхронизации выполняется только распределенной, схема соединения – «звезда».

В **контактных сельсинах** токоподвод к ротору обеспечивается через посеребренные контактные кольца и щетки, которые снижают точность отработки угла и надежность.

В системах связи с частотой сети 400 Гц и выше используются **бесконтактные сельсины** с *кольцевым трансформатором* на статоре.

ОВ – обмотка возбуждения;
ОС – обмотка синхронизации

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ

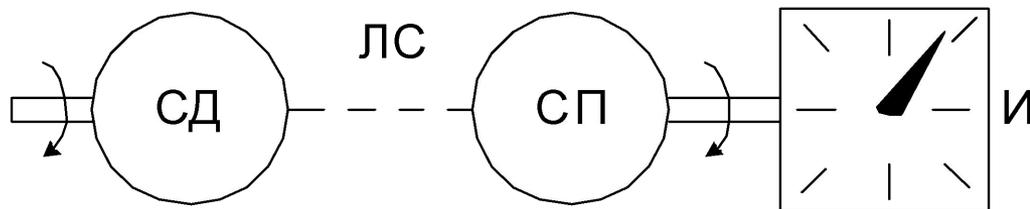
Принцип действия системы связи с сельсинами состоит в повороте ротора СП на такой же угол α_n , как и угол поворота СД α_d , который задается ведущим валом.

Следовательно, система синхронной связи из нескольких сельсинов стремится устранить угол рассогласования СД и СП:

$$\theta = \alpha_d - \alpha_n \rightarrow 0.$$

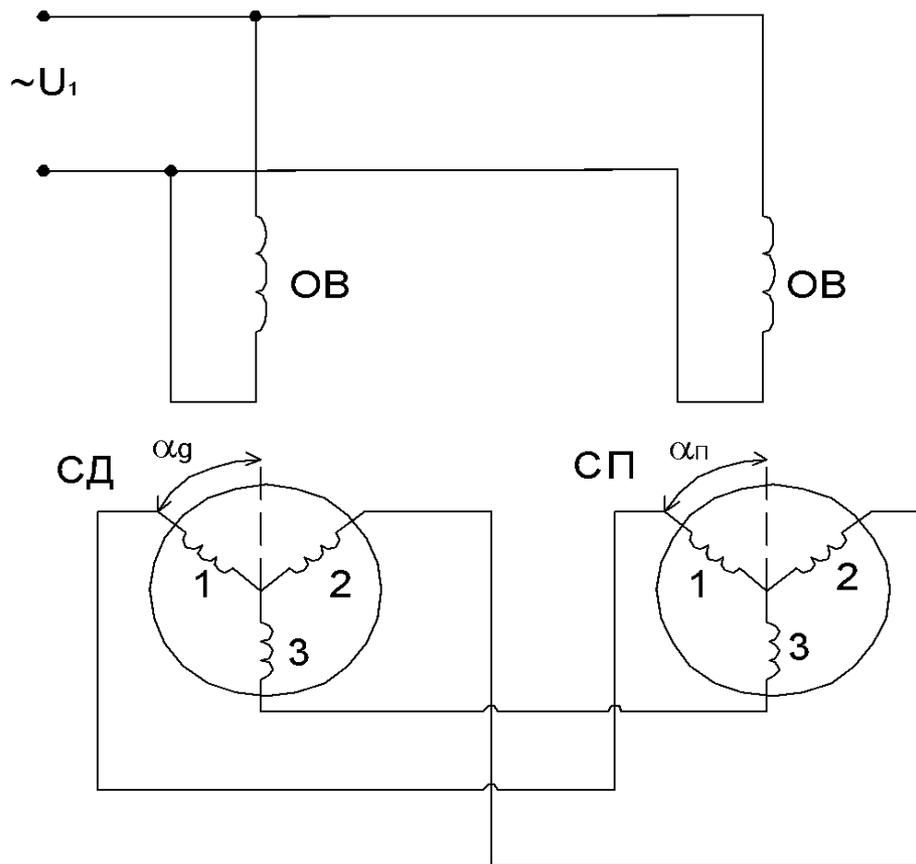
15.2 Индикаторный режим сельсинов.

Индикаторный режим сельсинов – СП самостоятельно обрабатывает угол поворота ротора СД, соединенного с ведущим валом, и индицирует его с помощью стрелки и шкалы. Применяется для дистанционного измерения углового перемещения ведущего вала при малом моменте сопротивления на ведомом валу.



Структурная схема дистанционного измерения углового перемещения вала с индикаторным режимом сельсинов.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ
Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ



Принципиальная схема дистанционного измерения углового перемещения вала с индикаторным режимом работы.

В индикаторной системе применяются *явнополюсные* сельсины, которые обеспечивают большой статический момент.

Пространственное положение роторов сельсинов относительно осей ОВ определяется углами α_d и α_p .

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ

Пульсирующее магнитное поле ОВ наводит в ОС ЭДС:

$$E_1 = E_m \cos \alpha; \quad E_2 = E_m \cos(\alpha - 120^\circ); \quad E_3 = E_m \cos(\alpha - 240^\circ).$$

Так как ОС сельсинов включены встречно, то в контуре каждой фазы действует **разностная ЭДС**:

$$\begin{aligned} \Delta E_1 &= E_{1\partial} - E_{1n} = E_m [\cos \alpha_\partial - \cos \alpha_n]; \\ \Delta E_2 &= E_{2\partial} - E_{2n} = E_m [\cos(\alpha_\partial - 120^\circ) - \cos(\alpha_n - 120^\circ)]; \\ \Delta E_3 &= E_{3\partial} - E_{3n} = E_m [\cos(\alpha_\partial - 240^\circ) - \cos(\alpha_n - 240^\circ)]. \end{aligned}$$

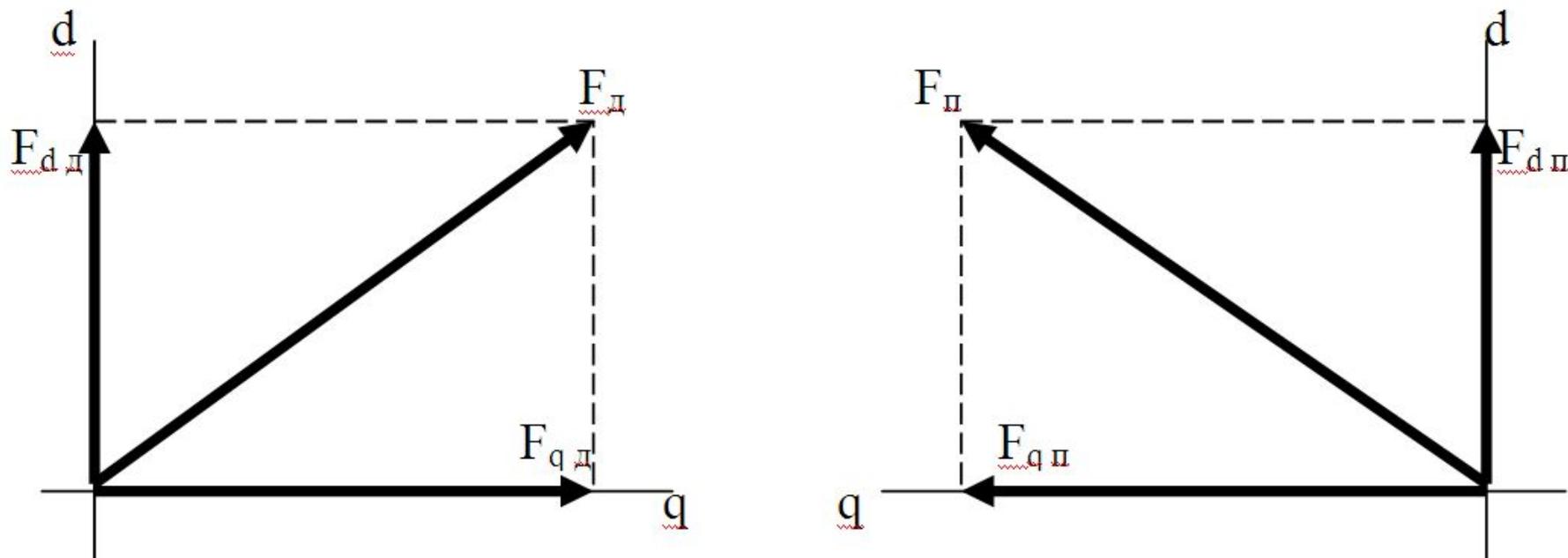
Под действием разностных ЭДС в контурах фаз появляются **синхронизирующие токи и МДС** (встречного направления в СД и СП):

$$\begin{aligned} F_{1\partial} &= -F_{1n} = I_1 w = F_m [\cos \alpha_\partial - \cos \alpha_n]; \\ F_{2\partial} &= -F_{2n} = I_2 w = F_m [\cos(\alpha_\partial - 120^\circ) - \cos(\alpha_n - 120^\circ)]; \\ F_{3\partial} &= -F_{3n} = I_3 w = F_m [\cos(\alpha_\partial - 240^\circ) - \cos(\alpha_n - 240^\circ)]. \end{aligned}$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ

Результирующая МДС определяется как геометрическая сумма составляющих МДС всех фаз и имеет продольную и поперечную составляющие:



$$F_{d\partial} = F_{d n} = 1,5F_m(1 - \cos \theta); \quad F_{q\partial} = -F_{q n} = 1,5F_m \sin \theta,$$

$$F_m = \frac{E_m w}{Z_\phi}.$$

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ

Взаимодействие потока, создаваемого *поперечной составляющей результирующей МДС* с потоком возбуждения, действующим по продольной оси, создает **синхронизирующий момент сельсина**:

$$M_c = M_m \sin \theta; \quad M_m = c\Phi_v F_q \sin \psi ,$$

где ψ - угол фазового сдвига между F_q и E .

Продольная составляющая МДС момент не создает, т.к. оказывает размагничивающее действие на поток возбуждения.

Синхронизирующий момент действует на роторы СД и СП в противоположных направлениях, поэтому если роторы обоих сельсинов растормозить, то будут поворачиваться оба ротора до полного устранения рассогласования угловых положений.

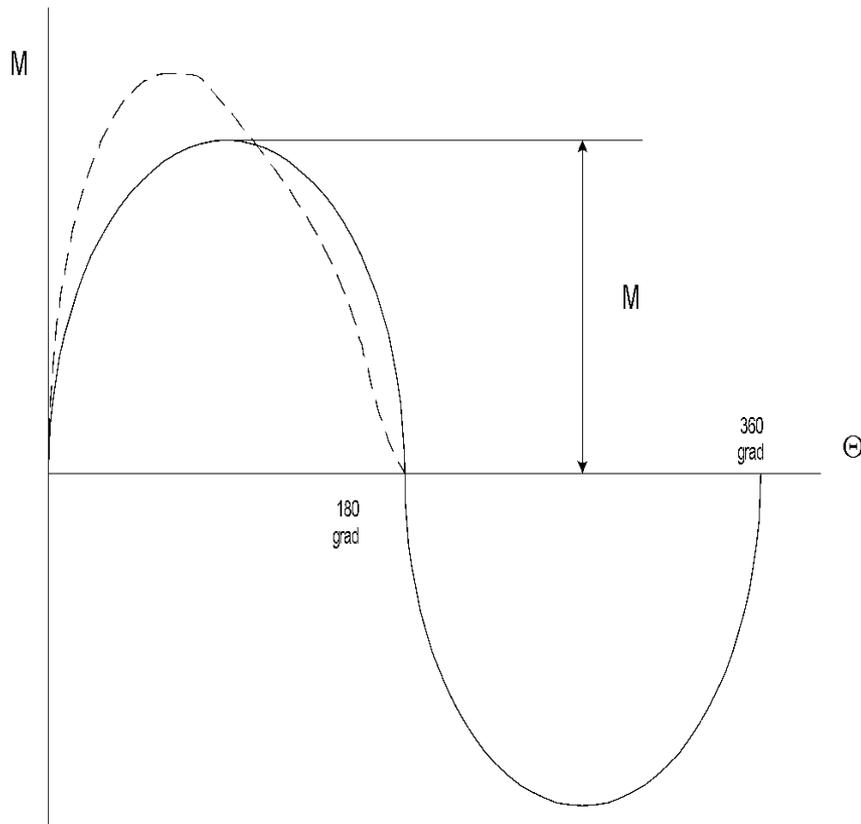
Если ротор СД жестко связан с валом, то поворачивается только ротор СП до согласованного положения.

Для синхронизации в пределах одного оборота ротора сельсины изготавливают *двухполюсными*.

Статический синхронизирующий момент – момент, действующий на валу неподвижного ротора сельсина.

Раздел 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И МИКРОМАШИНЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

Лекция 15. СЕЛЬСИНЫ



Динамический момент сельсина –
возникает в режиме
вращающегося ротора:

$$M_{дин} = M_m \sin \theta \cos(\omega / 4f).$$

Удельный синхронизирующий
момент сельсина:

$$M_{уд} = M_m \sin 1^\circ = 0,0175M_m = \\ = (0,1...5) Нм / град.$$