

Пән: Заманауи электр энергетикасы

№ 7-дәріс

Тақырыбы: Заманауи электр машинлар. Қозғалтқыштар

Лектор: Сарсенбаев Е.А.

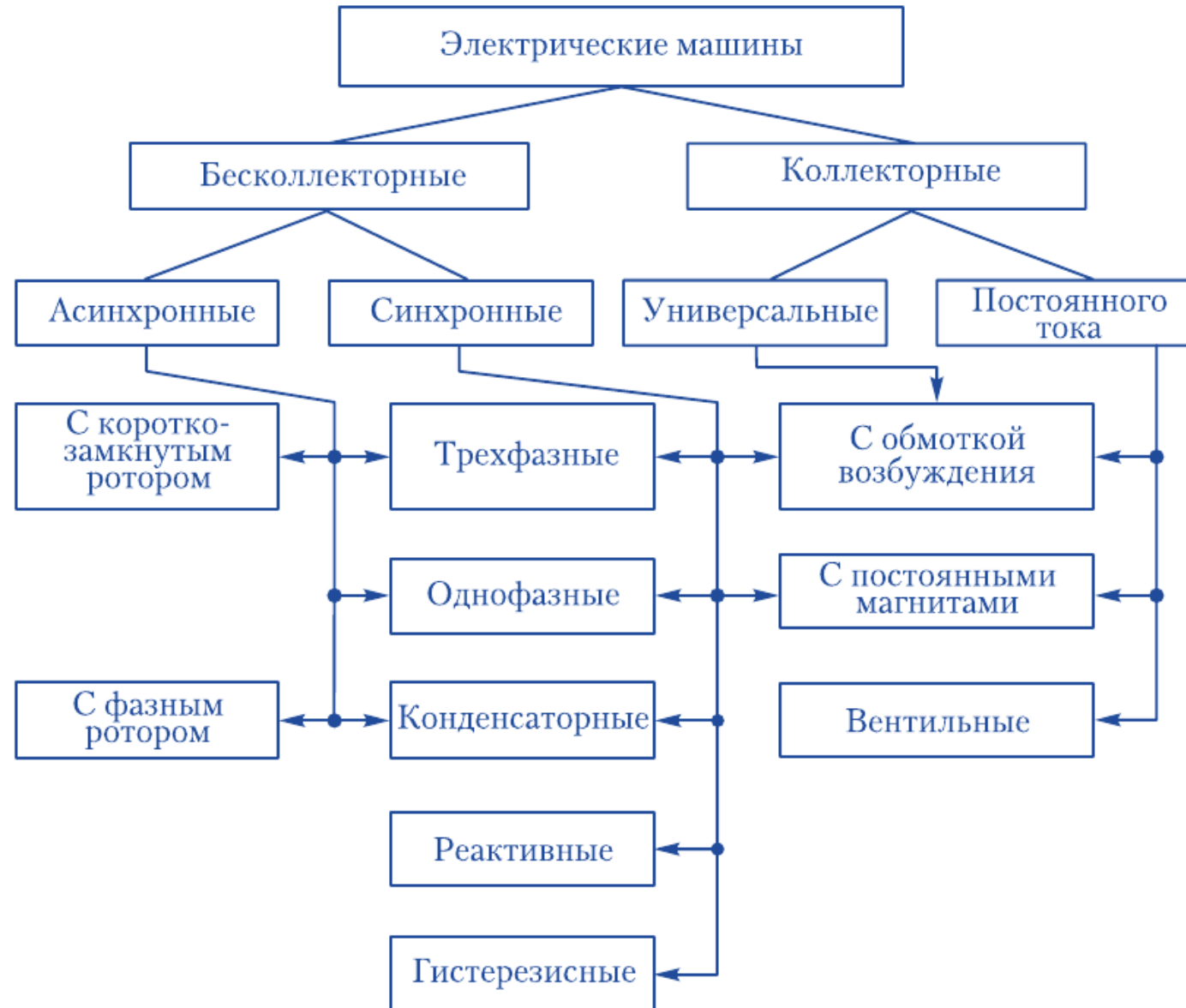
«Энергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры

E-mail: y.sarsenbayev@satbayev.university

ДӘРІС ЖОСПАРЫ

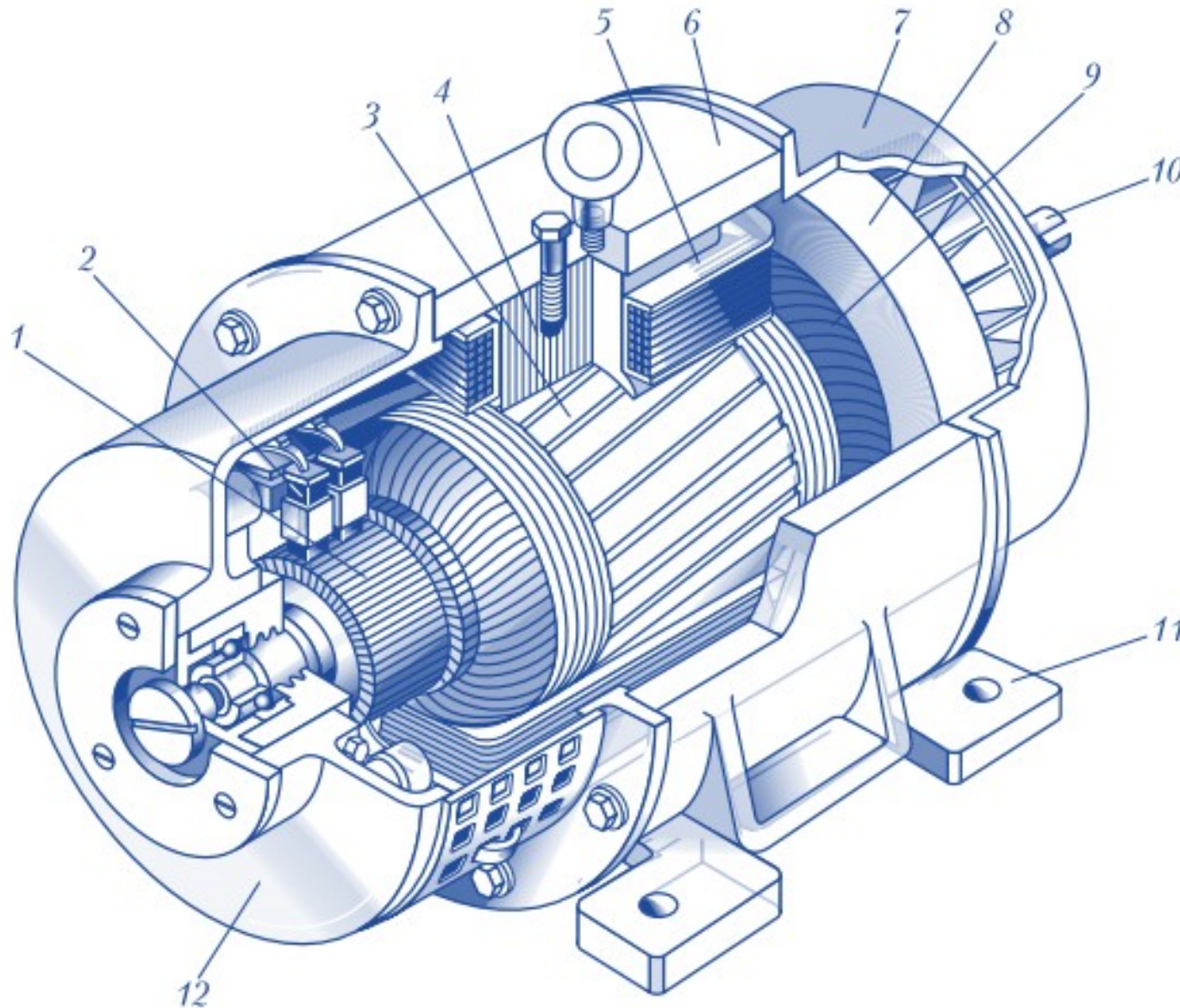
1. Электр машиналардың классификациясы;
2. Тұрақты ток қозғалтқыштары;
3. Синхронды қозғалтқыштар;
4. Асинхронды қозғалтқыштар;
5. Бақылау сұрақтары.

1. Электр машиналардың классификациясы



1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

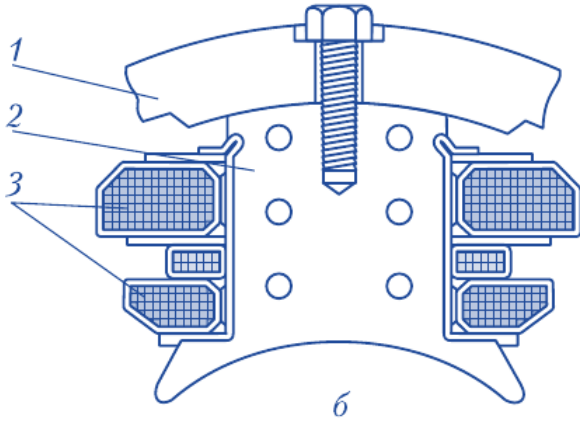
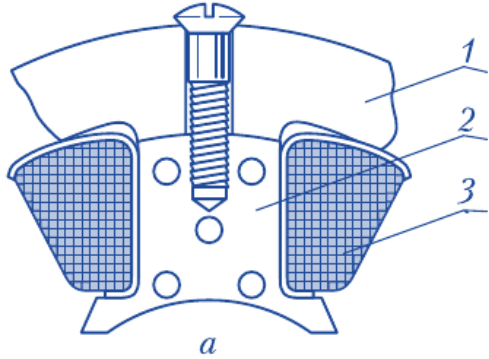
Устройство двигателя постоянного тока (ДПТ)



- 1 – коллектор
- 2 – щетки
- 3 – якорь өзекшесі
- 4 – полюсь өзекшесі
- 5 – қоздыру катушкасы
- 6 – станина
- 7, 12 - подшипникті щиттер
- 8 – вентилятор
- 9 – якоря орамасы
- 10 – вал
- 11 - лапалар

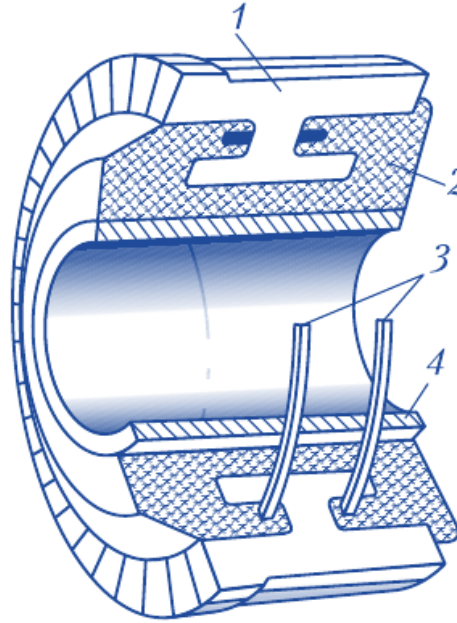
1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

Тұрақты ток қозғалтқышының (ТТҚ) құрылысы



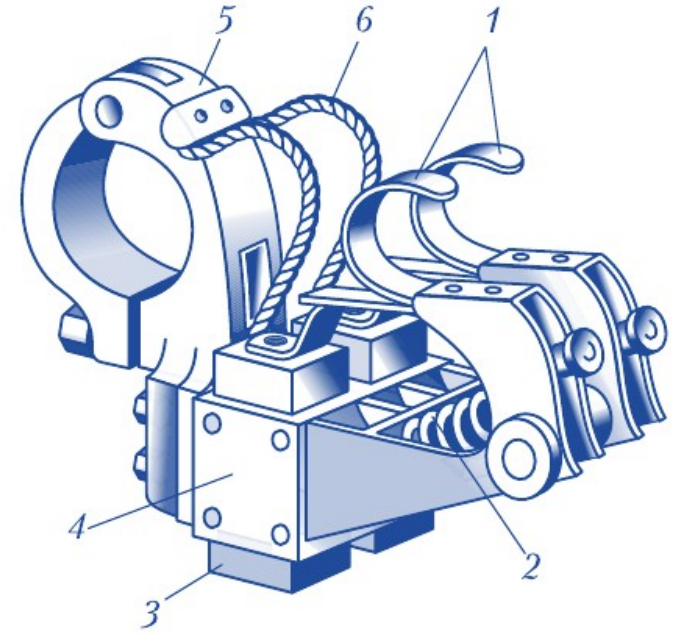
Главные полюсы с бескаркасной (а) и каркасной (б) полюсными катушками:

1 — станина; 2 — сердечник полюса; 3 — полюсная катушка



Устройство коллектора на пластмассе:

- 1 - медные пластины;
- 2 - пластмасса;
- 3 – стальные кольца;
- 4 - стальная втулка.

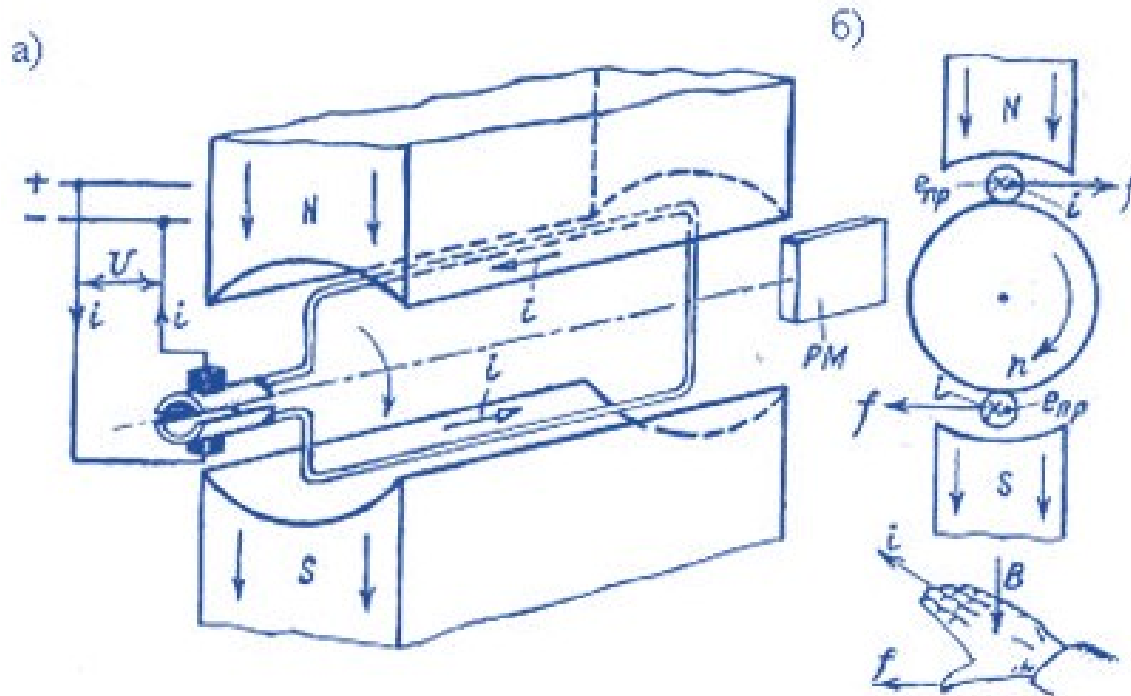


Щеткодержатель (сдвоенный) машины постоянного тока:

- 1 – курок;
- 2 – пружины;
- 3 – щетки;
- 4 – обойма;
- 5 – зажим;
- 6 – гибкий трос.

1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

ТТҚ-ның жұмыс істеу принципі



Электромагнитная сила действующая на обмотки якоря

$$F_{\text{пр}} = B l I_a,$$

Электромагнитный момент действующий на якорь

$$M_{\text{эм}} = F_{\text{пр}} D_a = B l D_a I_a$$

Приложенное напряжение на якорь двигателя

$$U_a = E_a + I_a r_a.$$

В двигателе

$$U_a > E_a$$

1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

Айналдыру моменттерінің теңдеулері

$$M_{\text{эм}} = P_{\text{эм}} / \Omega, \quad - \text{Электромагнитный момент двигателя}$$

$$M_{\text{эм}} = M_0 + M_{\text{в}} + M_{\text{дин}}$$

$$M_0 = M_{\text{тр}} + M_{\text{с. д}} = \frac{P_{\text{мх}}}{\Omega} + \frac{P_{\text{мг}} + P_{\text{д}}}{\Omega} \quad - \text{тормозящий момент}$$

$$M_{\text{в}} \quad - \text{момент нагрузки на валу}; \quad M_{\text{в}} = P_2 / \Omega_{\text{с}}$$

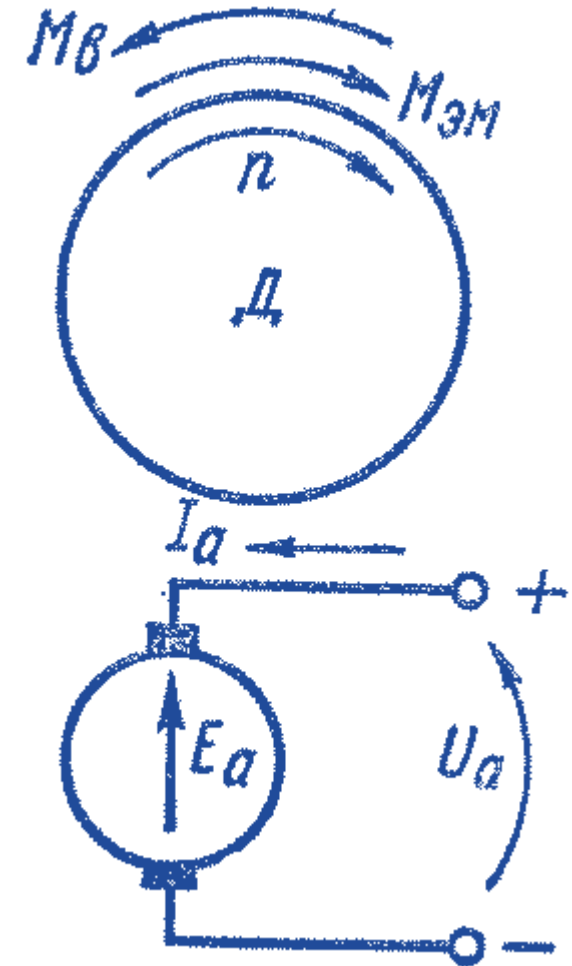
$$M_{\text{дин}} = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad - \text{динамический момент.}$$

$$\Omega = 2\pi n \quad - \text{угловая скорость вращения.}$$

При $n = \text{const}$ $M_{\text{дин}} = 0$, тогда

$$M_{\text{эм}} = M_{\text{ст.}}$$

$$M_{\text{ст}} = M_0 + M_{\text{в}} \quad - \text{статический момент сопротивления;}$$



1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

Кернеу және ток теңдеулері

Напряжение в цепи якоря

$$U = E_a + R_a I_a.$$

$R_a = r_a + R_{\text{щ}}$ - полное сопротивление цепи

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a},$$

$E_a = c_e \Phi_{\delta} n$, - Э.Д.С. якоря;

$c_e = pN/a$ - постоянная для каждой машины величина.

Айналу жиілігі және механикалық сипаттамалары

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi_{\delta}}.$$

$$n = \frac{U}{c_e \Phi_{\delta}} - \frac{R_a M}{c_e c_m \Phi_{\delta}^2},$$

$$M = c_m \Phi_{\delta} I_a.$$

1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

ТТҚ-да қуат шығындары

- 1) Механикалық шығындар: $p_{мх} = p_{подш} + p_{вент} + p_{тр. щ.}$

Потери в подшипниках – $p_{подш}$

Потер на трение щеток – $p_{тр. щ.}$

Потери на вентиляцию – $p_{вент} = 1,75 Qv^2$

- 2) Магниттік шығындар: $p_{мг} = p_{мга} + p_{мгз} + p_{пов} + p_{пульс.}$

Магнитные потери в сердечнике якоря – $p_{мга}$

Магнитные потери в зубцах якоря – $p_{мгз}$

Поверхностные потери в полюсных наконечниках – $p_{пов}$

Пульсационные потери в зубцах – $p_{пульс}$

- 3) Электрлік шығындар:

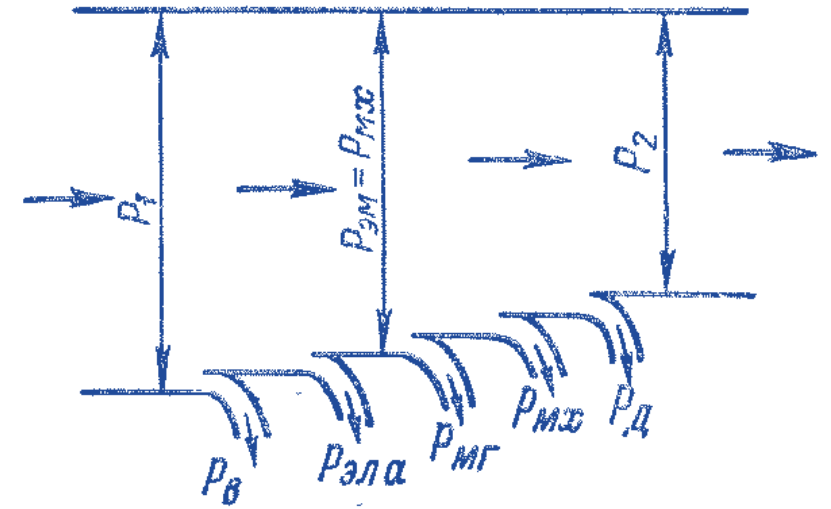
Потери в обмотках – $p_{эл. об} = I^2 r = \frac{\rho}{\gamma} j^2 G$. $G = ls\gamma$.

Потери в щеточных контактах – $p_{эл. щ} = \Delta U_{щ} I$

- 4) Қосымша шығындар:

Потери, зависящие от режимов работы

Потери при коммутациях и т.д.

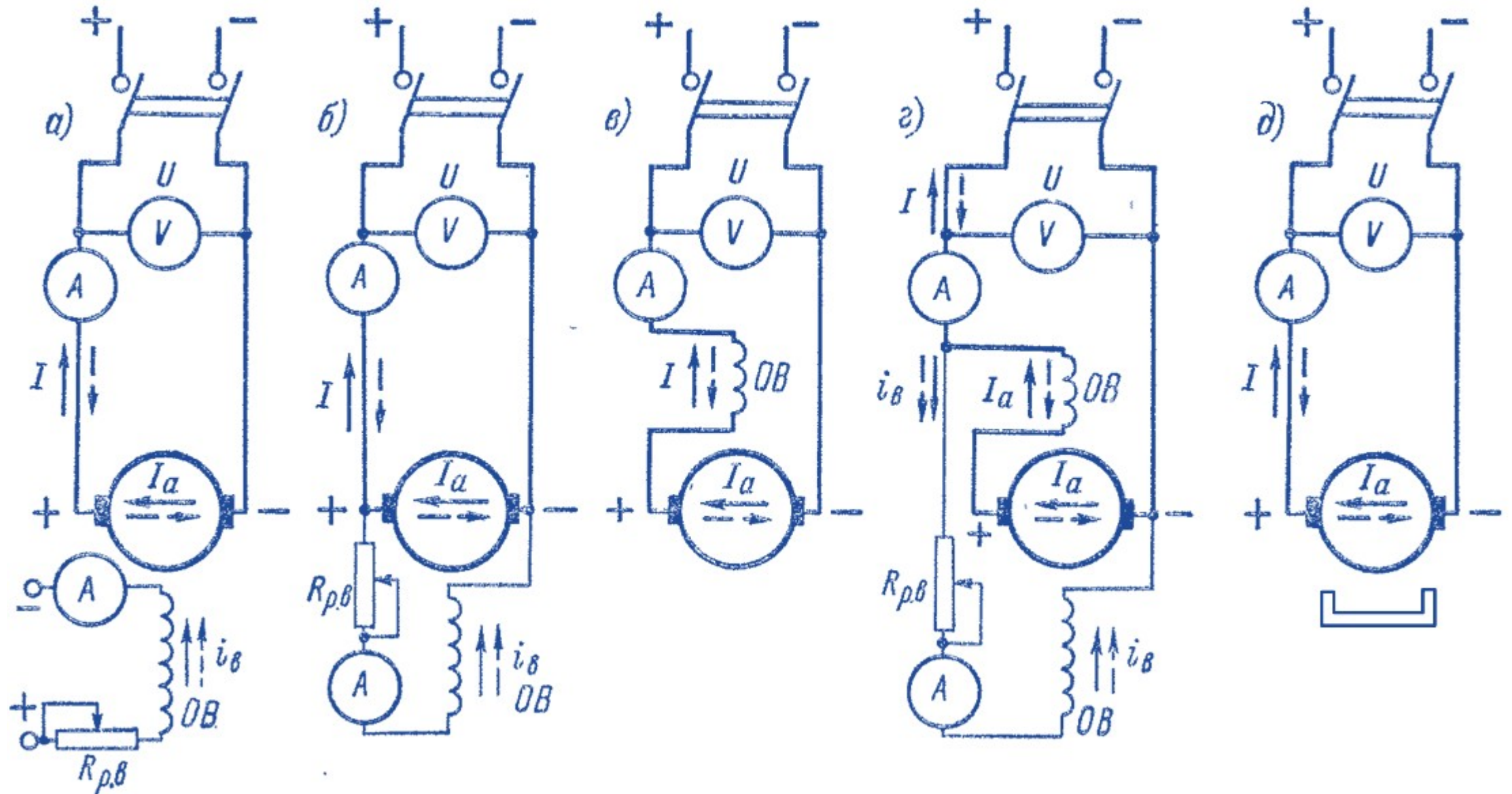


Жалпы шығындар

$$p_{\Sigma} = p_{мх} + p_{мг} + p_{эл} + p_{д.}$$

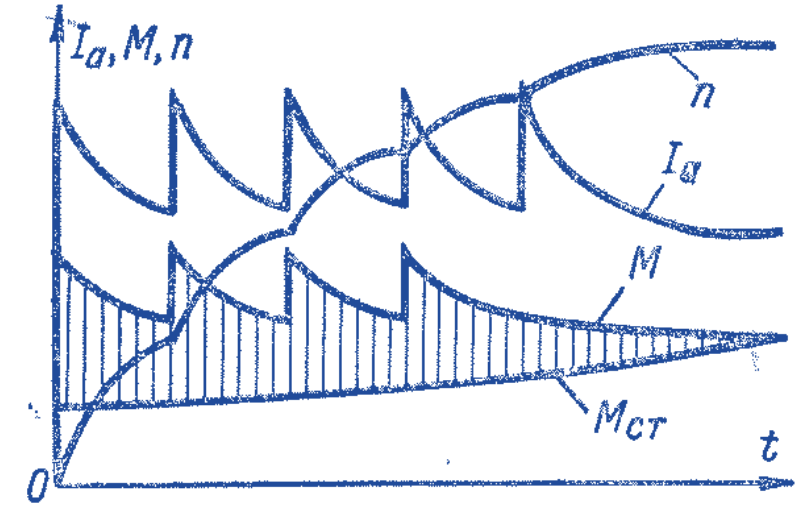
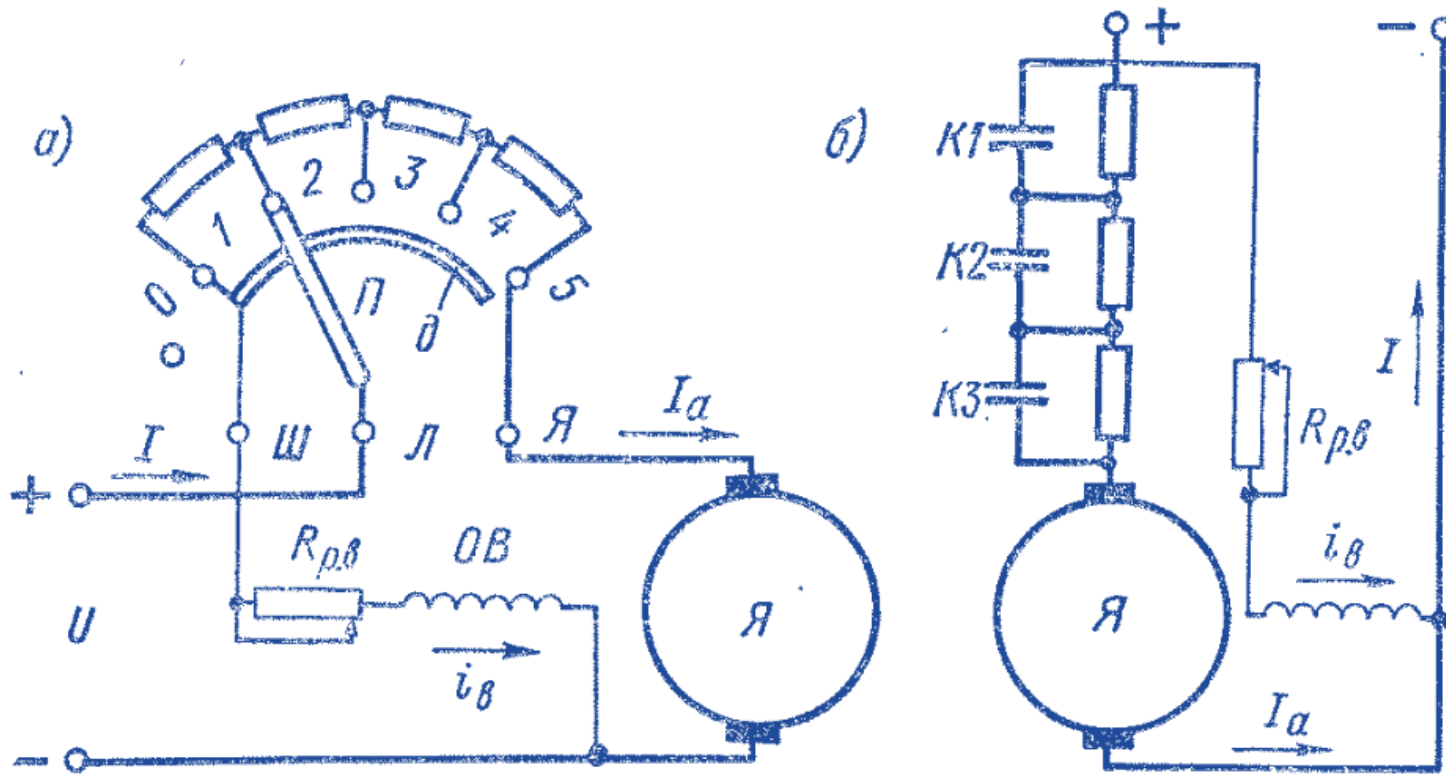
1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

ТТҚ-ын қоздыру әдістері



1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

ТТҚ-ын іске қосу



$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_{п}}, \quad \text{при } n = 0, \quad I_a = \frac{U}{R_a + R_{п}},$$

1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

ТТҚ-ның айналу жиілігін реттеу

$$1) \quad n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi_\delta}.$$

Изменением потока Φ_δ , т.е. тока возбуждения i_B .

$$2) \quad n = \frac{U - (R_a + R_{pa}) I_a}{c_e \Phi_\delta}$$

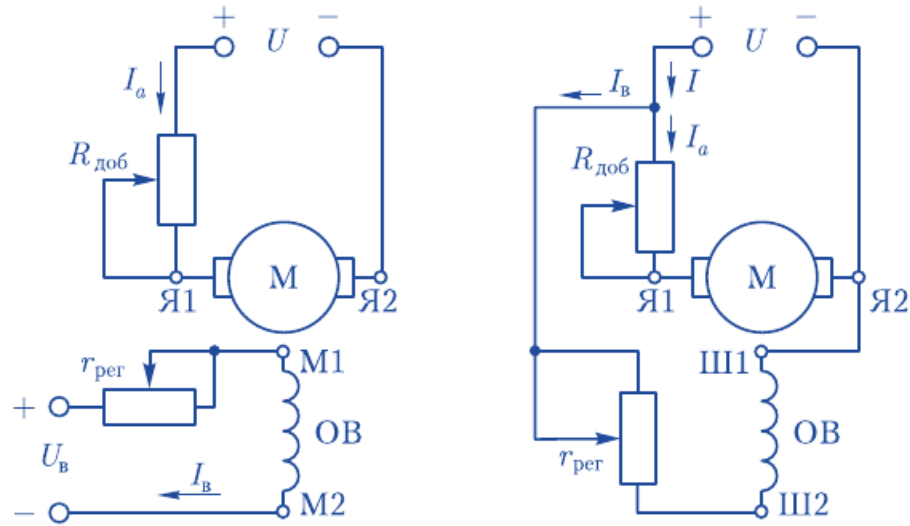
Последовательно включая в цепь якоря реостат R_{pa} .

$$3) \quad U$$

Применяя источник с регулируемым напряжением.

1. Тұрақты ток қозғалтқыштары

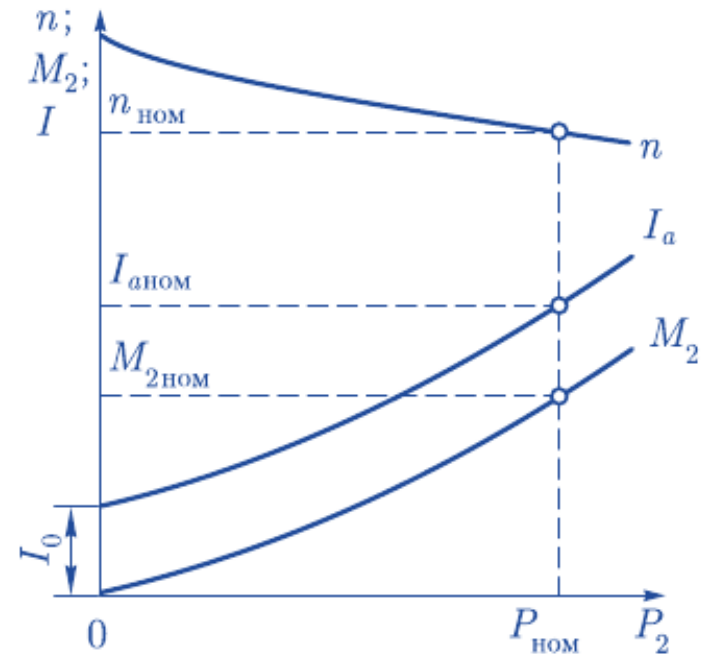
ТТҚ-ның сипаттамалары.



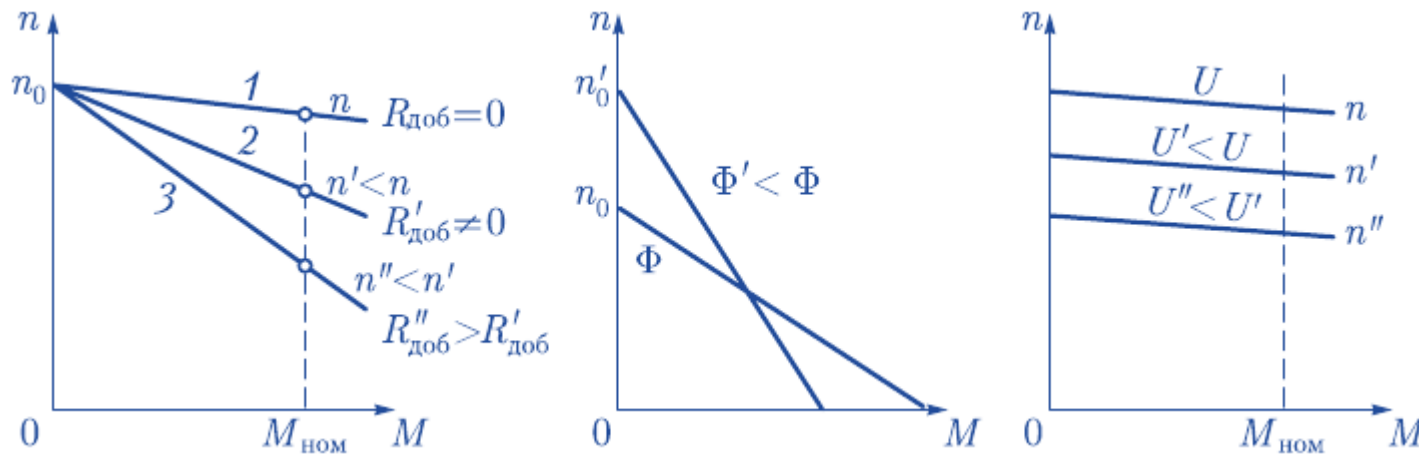
Характеристика $n = f(P_2)$

Характеристика момента $M_2 = f(P_2)$

Характеристика тока якоря $I_a = f(P_2)$



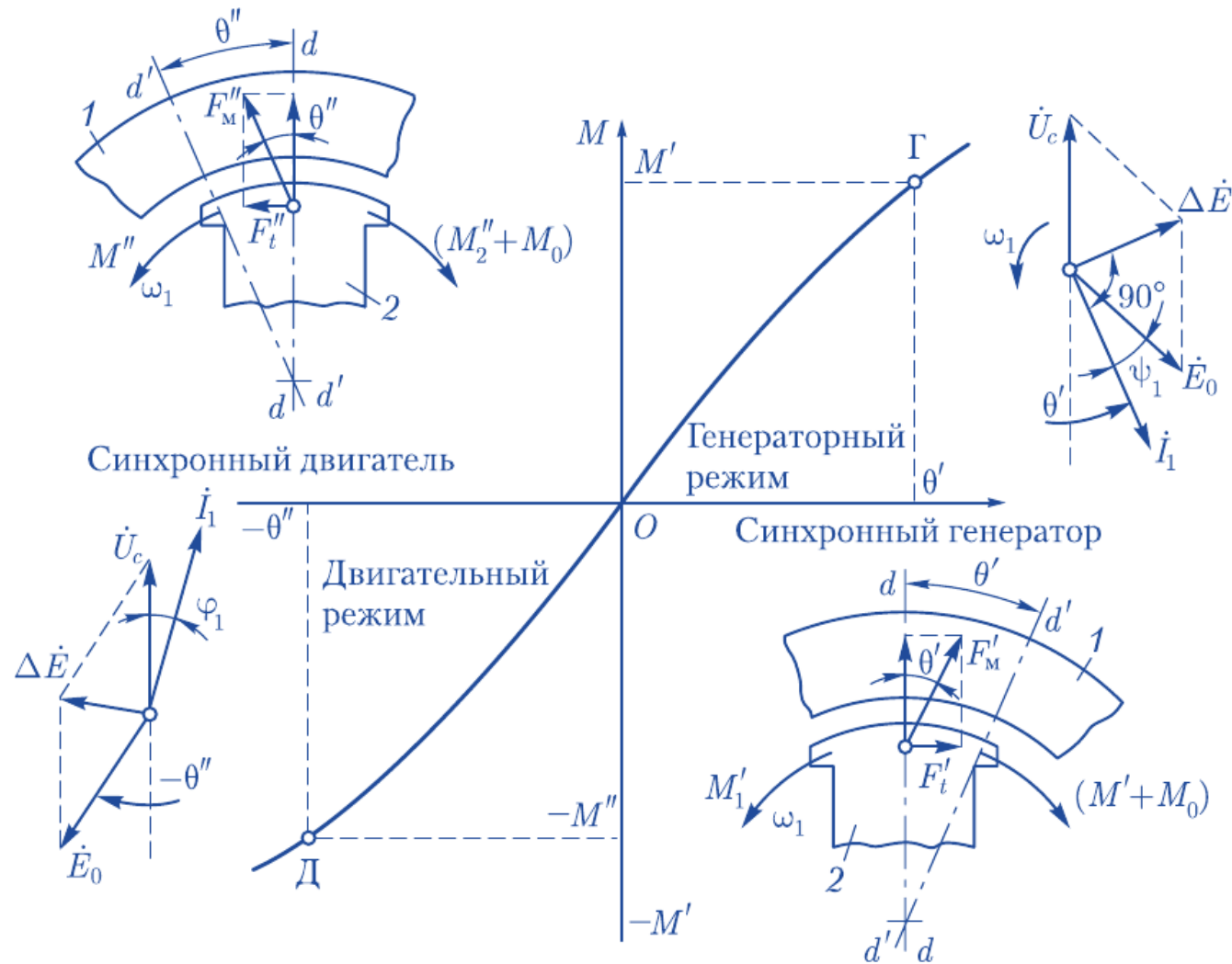
Механическая характеристика.



1 – естественная; 2,3 – искусственная

3. Синхронды қозғалтқыштар

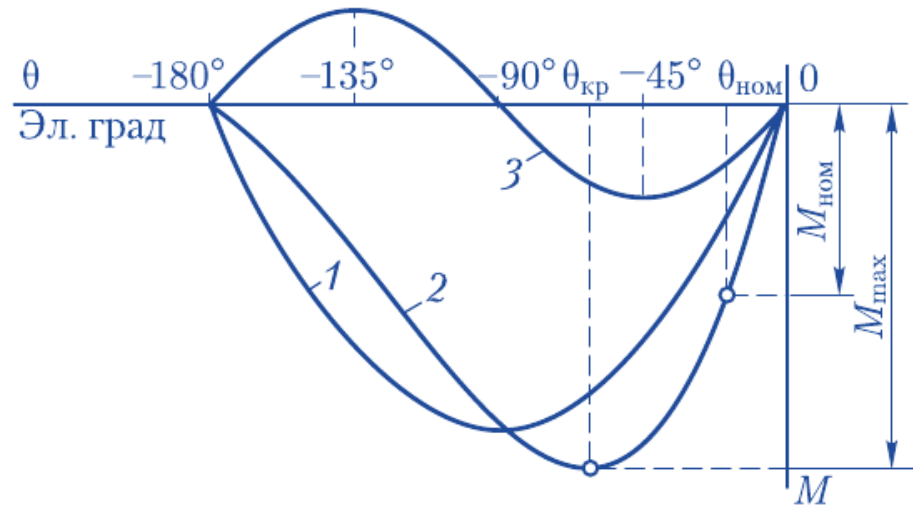
Синхронды қозғалтқыш



Переход синхронной машины из генераторного режима в двигательный

3. Синхронды қозғалтқыштар

Синхронды қозғалтқыш



Угловая характеристика СД

$$P_{\text{эм.н}} = (m_1 U_1 E_0 \sin \theta) / x_c$$

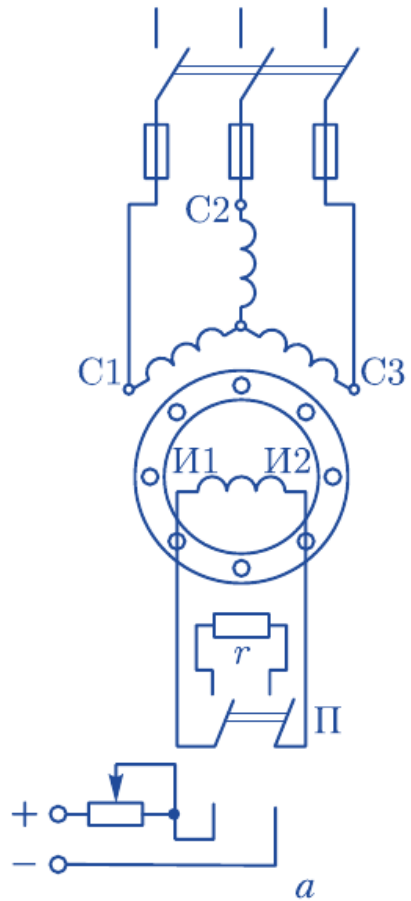
$$P_{\text{эм.я}} = \frac{m_1 U_1 E_0}{x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

$$M_{\text{н}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_c} \sin \theta$$

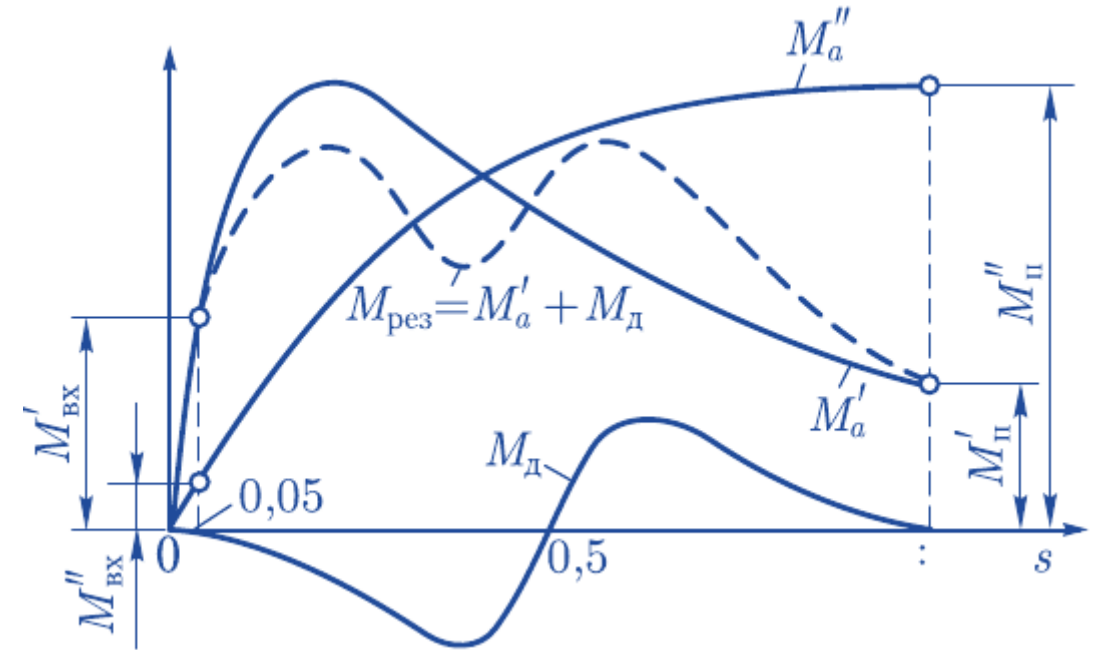
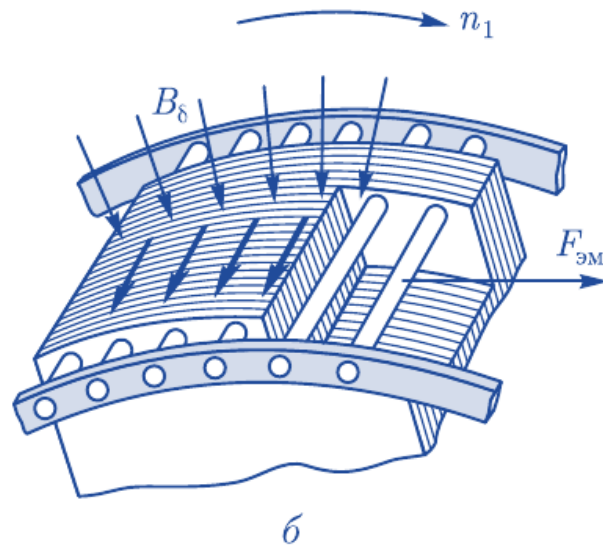
$$M_{\text{я}} = \frac{P_{\text{эм}}}{\omega_1} = \frac{m_1 U_1 E_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta$$

3. Синхронды қозғалтқыштар

СҚ-ты іске қосу



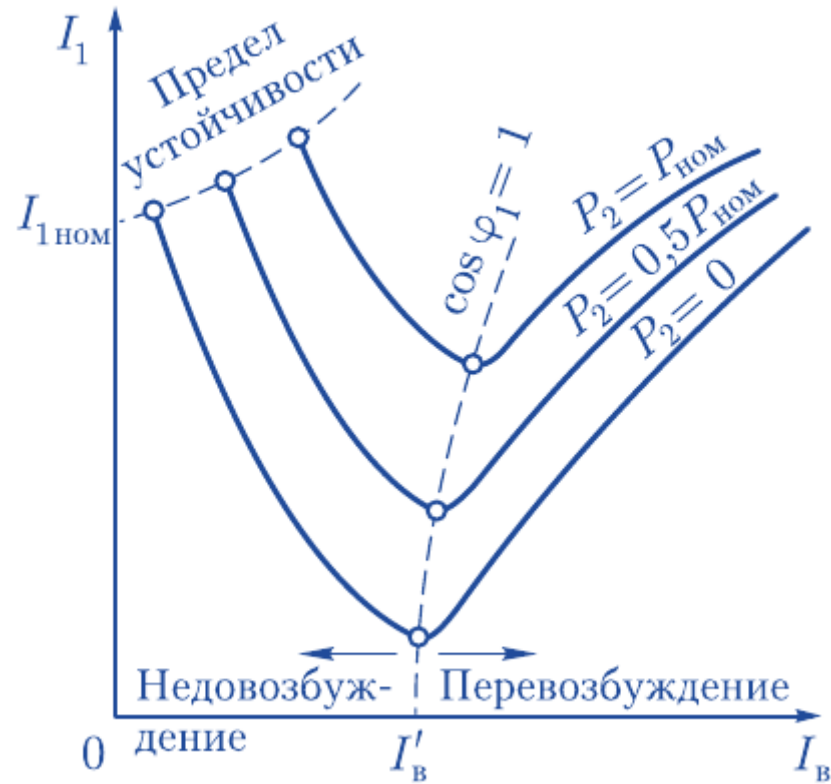
Асинхронный пуск СД



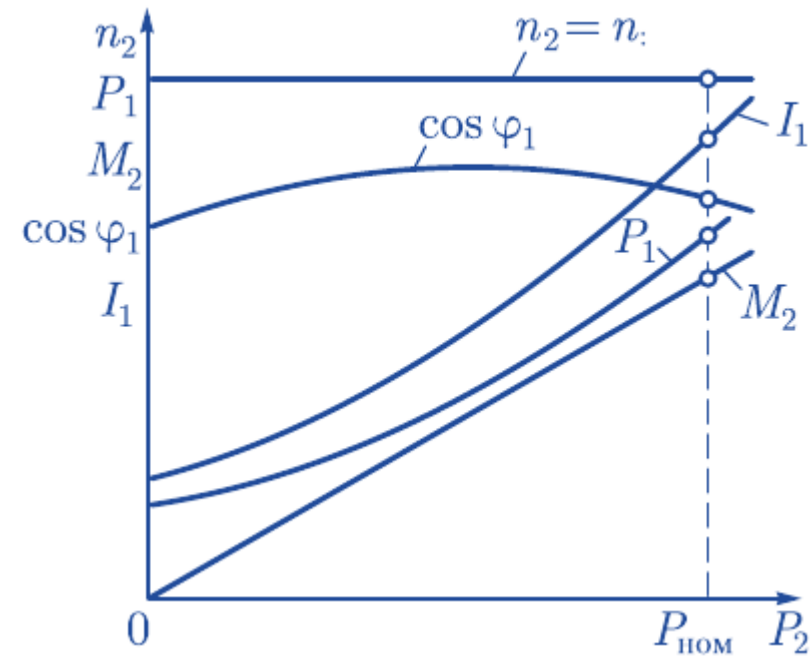
Графики асинхронных моментов при пуске СД

3. Синхронды қозғалтқыштар

СҚ-тың сипаттамалары



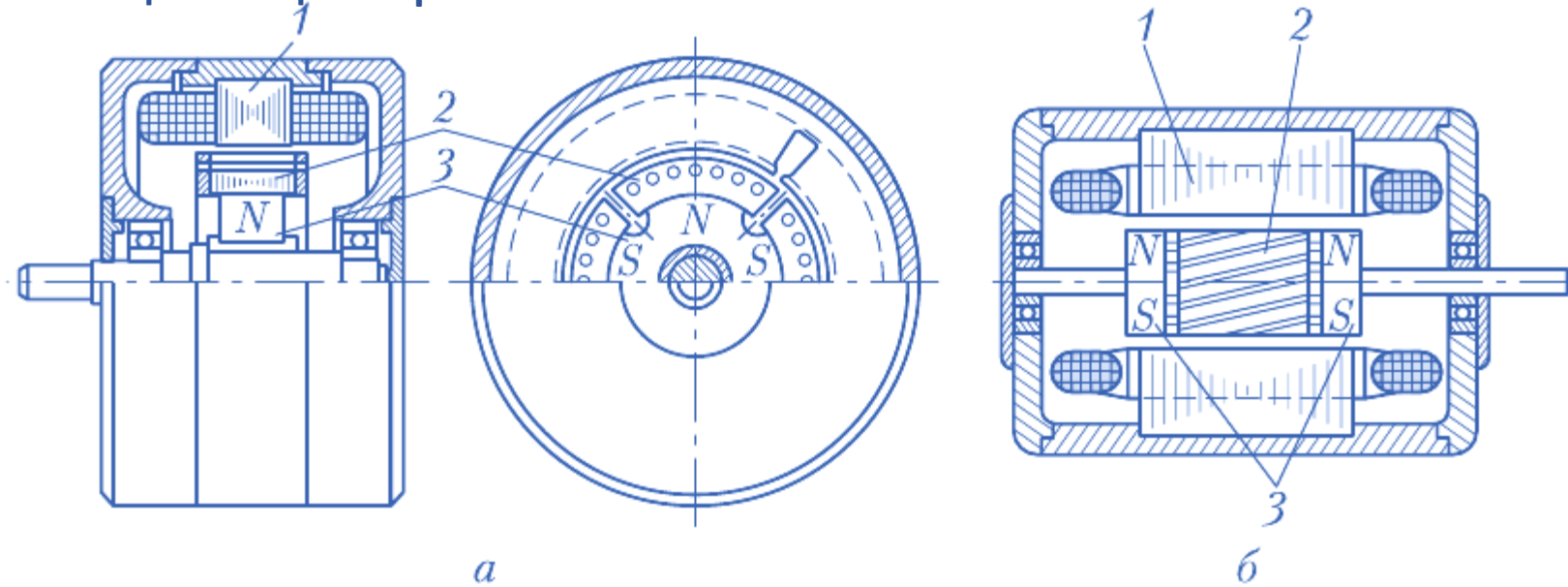
U-образные характеристики СД



Рабочие характеристики СД

3. Синхронды қозғалтқыштар

Тұрақты магнитті қозғалтқыштар



Магнитоэлектрические синхронные двигатели с радиальным (а) и аксиальным (б) расположением постоянных магнитов: 1 — статор; 2 — короткозамкнутый ротор; 3 — постоянный магнит

Тұрақты магниттердің радиалды орналасуымен, қуыс цилиндр түрінде жасалған бастапқы торы бар ротордың орамы тұрақты магниттің 3 айқын полюстерінің сыртқы бетіне бекітіледі. осы цилиндрдегі тұрақты магнит ағынының қысқа тұйықталуы.

Магниттердің осьтік орналасуымен ротордың дизайны асинхронды тиін торлы қозғалтқыштың роторының конструкциясына ұқсас. Бұл ротордың ұштарына сақиналы тұрақты магниттер басылады.

3. Синхронды қозғалтқыштар

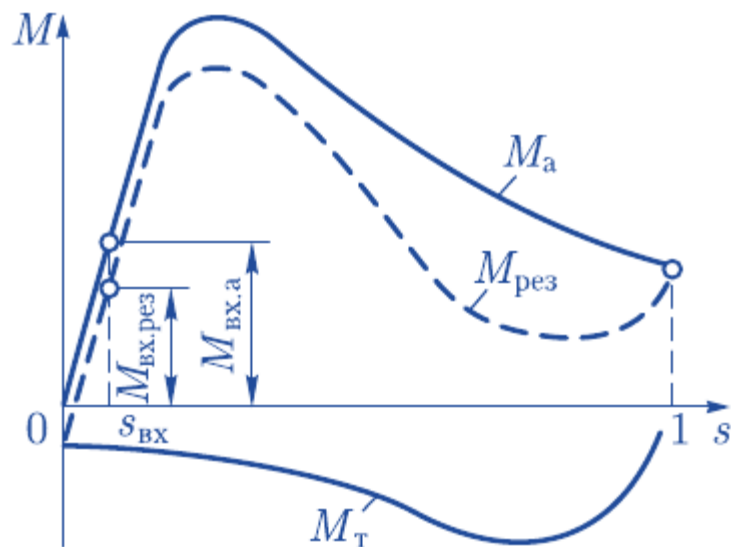
Тұрақты магнитті қозғалтқыштар

Ротордың үдеуіндегі тұрақты магнит өрісі статор орамында E_{1p} эмф индукциясын тудырады, оның жиілігі ротордың айналу жылдамдығына пропорционалды түрде артады. Бұл ЭҚК статор орамында тұрақты магниттер өрісімен әрекеттесетін ток жасайды және ротордың айналуына қарсы бағытталған M_t тежеу моментін жасайды.

Осылайша, тұрақты магниттері бар қозғалтқышты үдеткенде оның роторына екі асинхронды момент әсер етеді: айналу моменті M_a (статор орамасына желіден түсетін I_1 токтан) және тежеу моменті M_t (статор орамында индукцияланған I_{1p} токтан тұрақты магнит өрісі).

Дегенмен, бұл моменттердің ротордың айналу жылдамдығына (сырғануына) тәуелділігі әртүрлі: максималды момент M_a маңызды жиілікке (кіші сырғанау), ал максималды тежеу моменті M_t төмен айналу жылдамдығына (үлкен сырғанау) сәйкес келеді. Ротор төмен айналу жылдамдығы аймағында айтарлықтай «шөгу» бар алынған моменттің әсерінен жылдамдайды.

$$M_{\text{рез}} = M_a + M_t,$$



Магнитоэлектрлік синхронды қозғалтқыштың асинхронды моменттерінің графиктері

3. Синхронды қозғалтқыштар

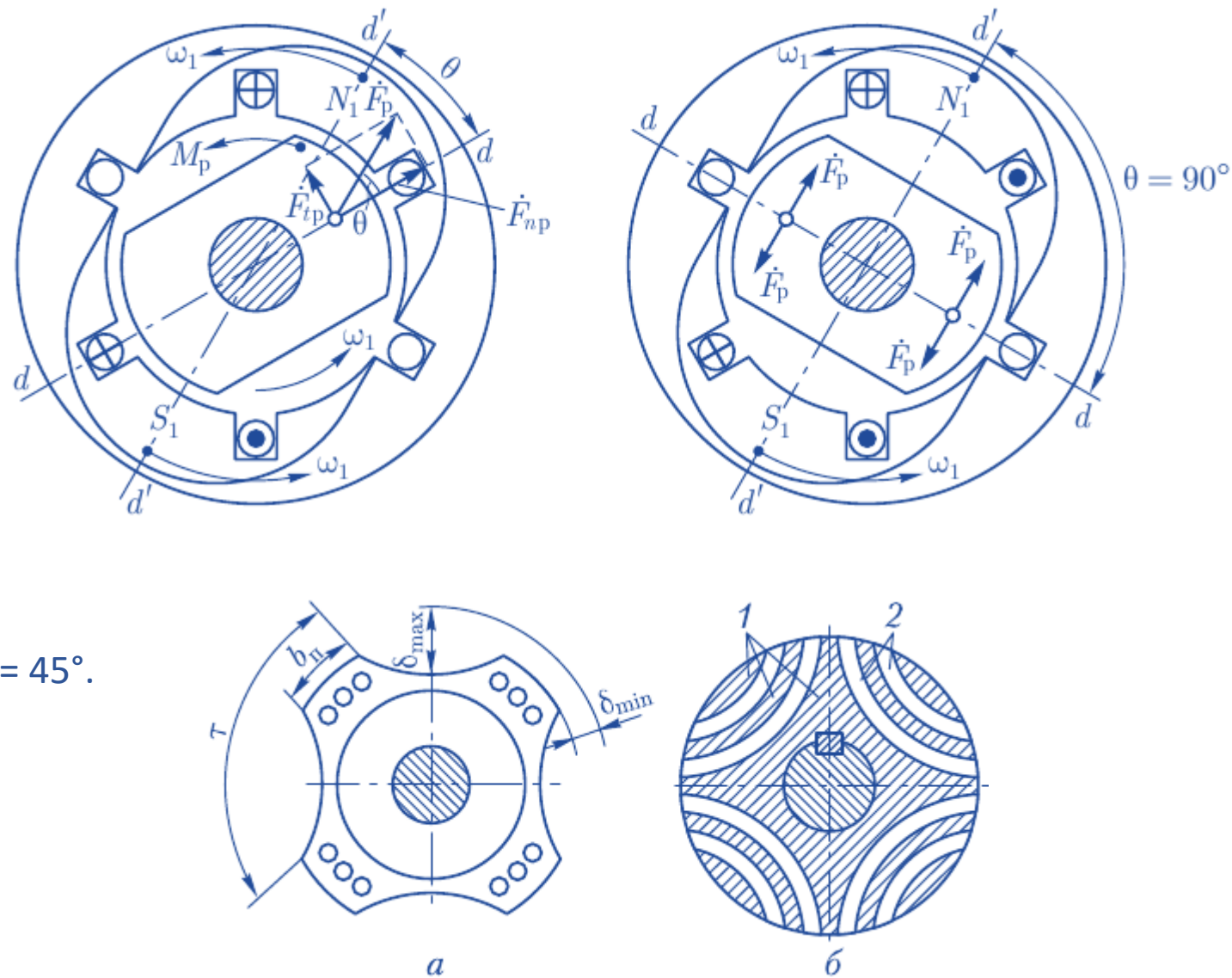
Синхронды реактивті қозғалтқыштар

Синхронды қарсылық қозғалтқыштарының (СРМ) айырықша ерекшелігі олардың ротордан қозуының болмауы болып табылады. Бұл қозғалтқыштағы негізгі магнит ағыны тек статор орамасының MMF арқылы жасалады. Екі және үш фазалы DRM-де бұл MMF айналады.

$$M_p = \frac{m_1 U_1^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Максимальное значение M_p наступает при угле $\theta = 45^\circ$.

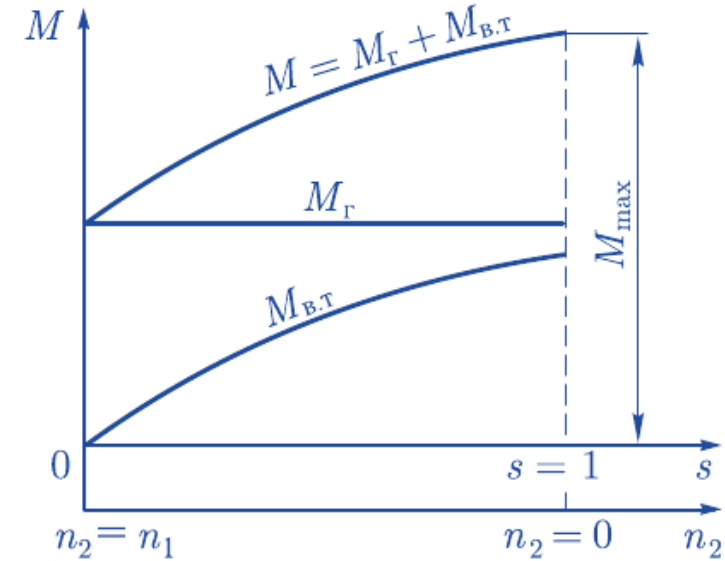
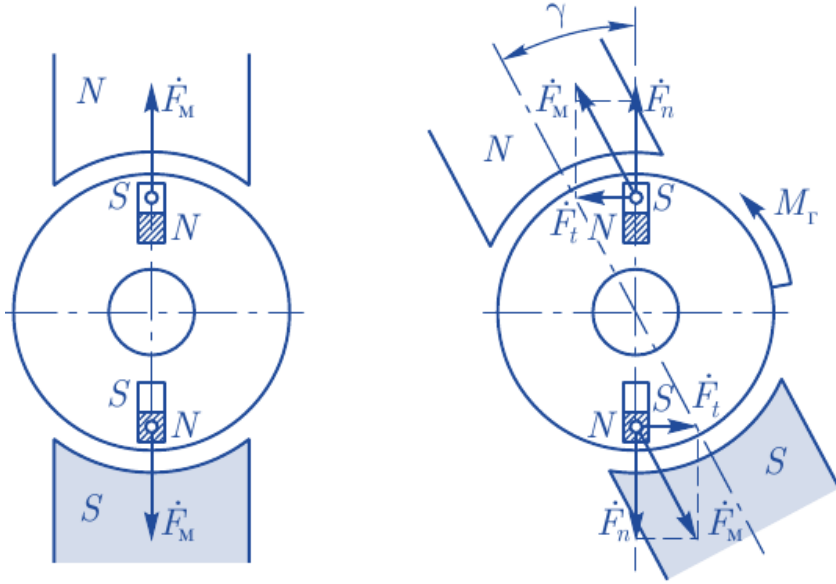
$$M_p = M_{p\max} \sin 2\theta.$$



Конструкция роторов СРД

3. Синхронды қозғалтқыштар

Гистерезисті қозғалтқыштар



Механические характеристики ГД

Потери на гистерезис

$$P_{\Gamma} = sP_{\Gamma.К}$$

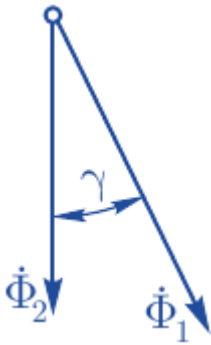
$P_{\Gamma.К}$ – потери на гистерезис при неподвижном роторе

Электромагнитная мощность, передаваемая ротору

$$P_{\text{эм}} = P_{\Gamma}/s = P_{\Gamma.К}$$

Вращающий момент

$$M_{\Gamma} = P_{\text{эм}}/\omega_1 = P_{\Gamma.К}/\omega_1$$



3. Синхронды қозғалтқыштар

Шаговый қозғалтқыштар

Шаг двигателя

$$\alpha_{\text{ш}} = 360^\circ / (2p_2 m_y k)$$

$2p_2$ – число полюсных выступов на роторе;
 m_y – число фазных обмоток управления;
 k – коэффициент, зависящий от включения.

$$\Delta\theta_c = \arcsin(M_{\text{н}}/M_{\text{max}})$$

M_{max} – максимальный статический момент

Электромагнитная постоянная времени (с)

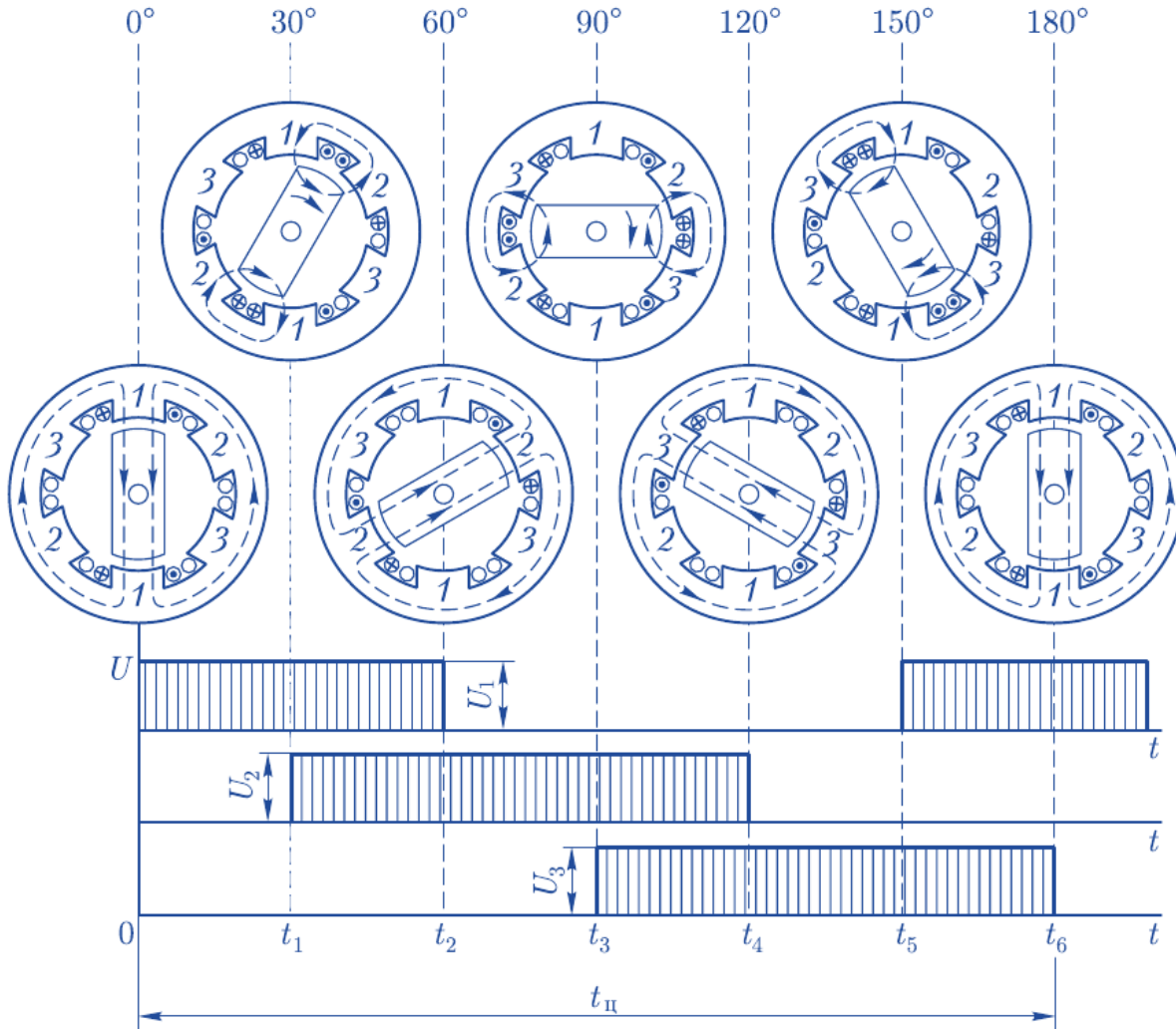
$$T_{\text{э}} = L_{\text{ф}}/r_{\text{ф}},$$

$L_{\text{ф}}$ – индуктивность обмотки одной фазы статора, Гн;

$r_{\text{ф}}$ – активное сопротивление обмотки одной фазы статора, Ом.

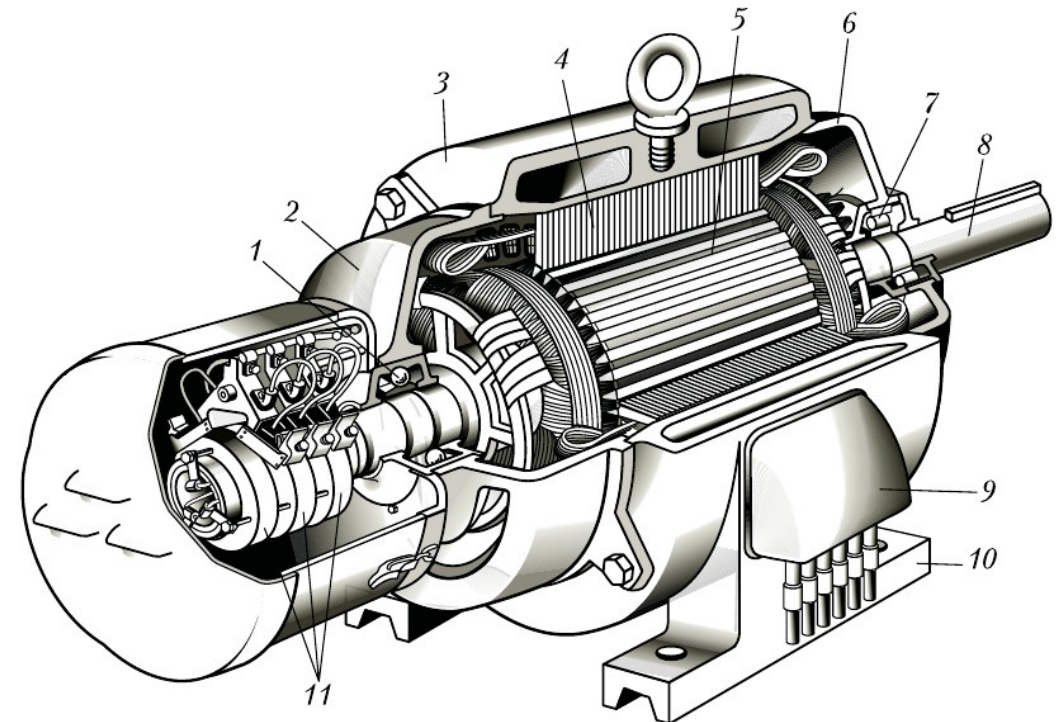
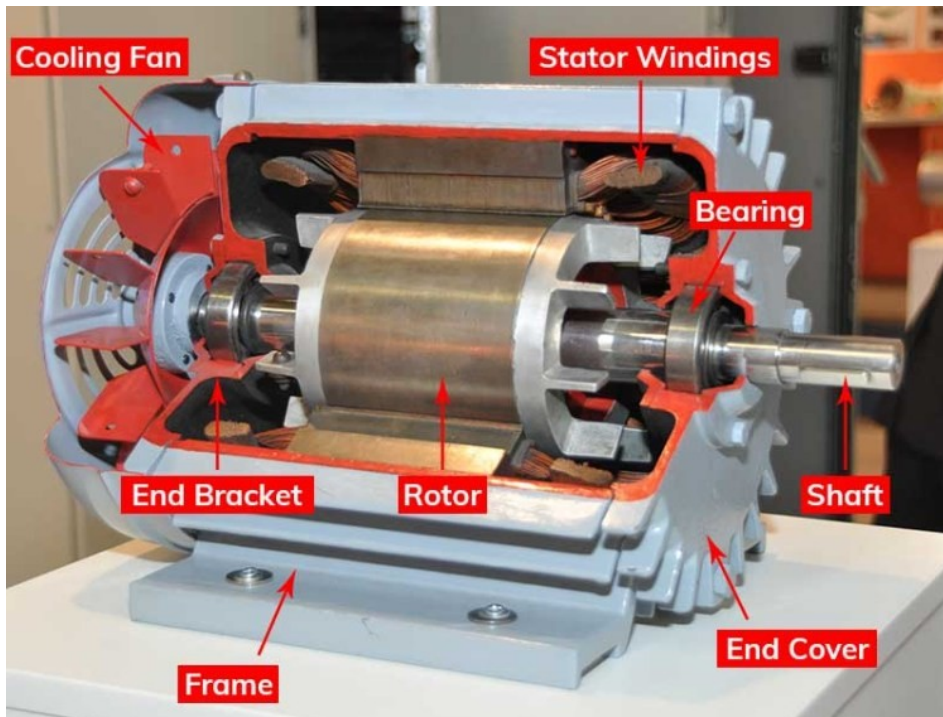
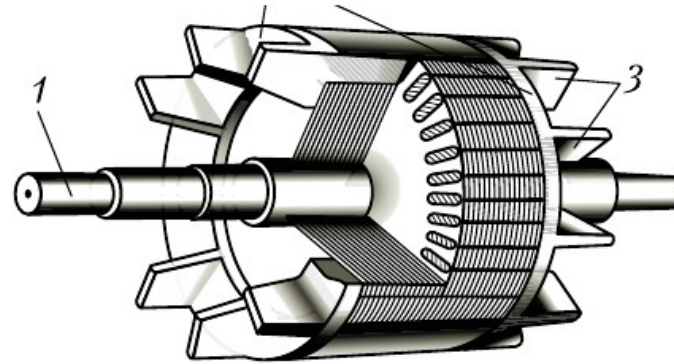
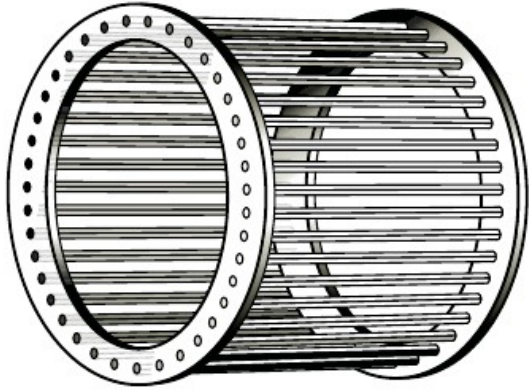
Для повышения быстродействия

$$T_{\text{э}} = L_{\text{ф}}/(r_{\text{ф}} + R_{\text{доб}}).$$



4. Асинхронды қозғалтқыштар

Асинхронды машинаның құрылысы



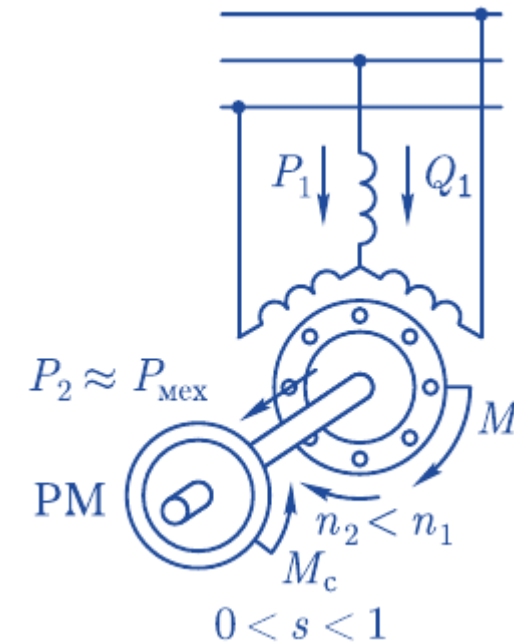
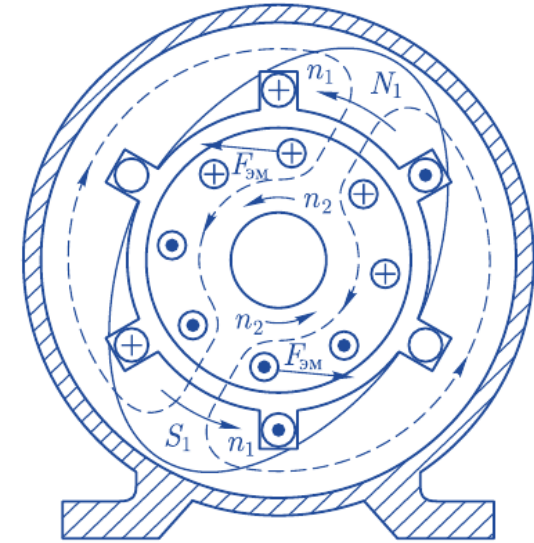
4. Асинхронды қозғалтқыштар

Асинхронды машинаның жұмыс істеу принципі

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

$$n = (1 - s) n_1.$$

$$0 < n < n_1 \text{ и } 1 > s > 0.$$



4. Асинхронды қозғалтқыштар

Асинхронды машинаның жұмыс істеу принципі

Основной магнитный поток Φ , вращающийся с частотой n_1 , наводит в неподвижной обмотке статора ЭДС E_1

$$E_1 = 4,44 f_1 \Phi w_1 k_{o61}.$$

Магнитный поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ наводит в обмотке статора ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 x_1$

Для цепи обмотки статора асинхронного двигателя, включенной в сеть с напряжением U_1 $\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 r_1$

Уравнение напряжений обмотки статора АД

$$\dot{U}_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1.$$

Основной магнитный поток Φ , обгоняя ротор с частотой вращения $n_s = (n_1 - n_2)$, индуцирует в обмотке ротора ЭДС

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \Phi w_2 k_{o62}$$

f_2 — частота ЭДС E_{2s} в роторе, Гц; w_2 — число последовательно соединенных витков одной фазы обмотки ротора; k_{o62} — обмоточный коэффициент обмотки ротора.

Частота ЭДС (тока) в обмотке вращающегося ротора (частота скольжения) $f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s,$

Тогда $E_{2s} = 4,44 f_1 s \Phi w_2 k_{o62} = E_2 s,$

Поток рассеяния ротора $\Phi_{\sigma 2}$ индуцирует в обмотке ротора ЭДС рассеяния $\dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 x_2 s$

Уравнение напряжений для цепи ротора АД $\dot{E}_{2s} + \dot{E}_{\sigma 2} = \dot{I}_2 r_2$

Отсюда, уравнение напряжений для обмотки ротора АД $\dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 / s = 0$

4. Асинхронды қозғалтқыштар

Негізгі энергетикалық қатынастар және ПӘК

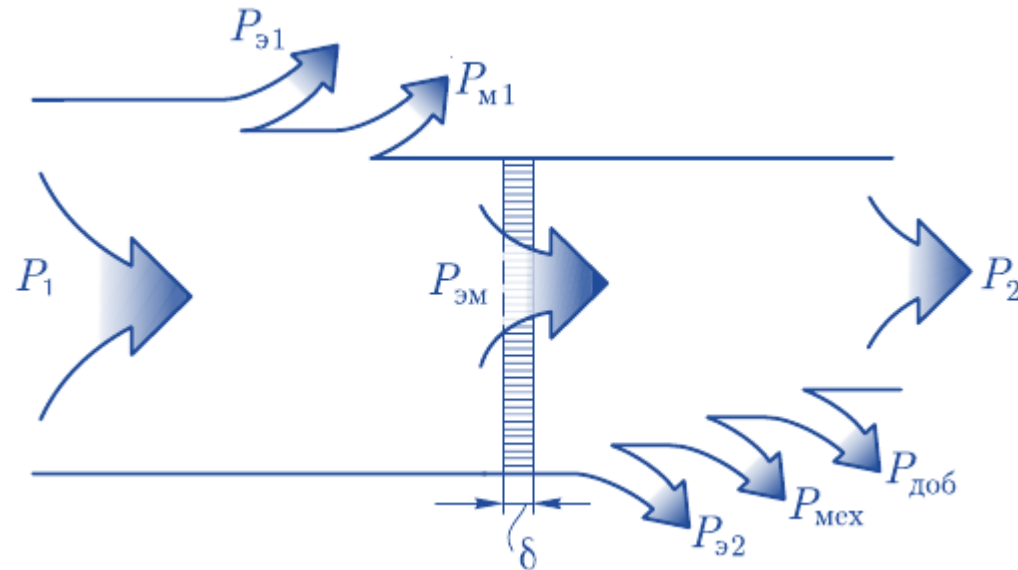
$$P_{\Sigma M} = M\Omega_1.$$

$$P_{MX} = M\Omega_2,$$

$$P_{\Sigma M} = P_{MX} + \Delta P_2.$$

$$\Delta P_2 = P_{\Sigma M} - P_{MX} = M(\Omega_1 - \Omega_2) = M\Omega_1 s = P_{\Sigma M} s,$$

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{\Omega_1 - \Omega_2}{\Omega_1}$$



$$P_1 = \Delta P_1 + P_{\Sigma M} = \Delta P_1 + M\Omega_1.$$

$$P_2 = P_{MX} - \Delta P_{MX} = M\Omega_2 - \Delta P_{MX}.$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{M\Omega_2 - \Delta P_{MX}}{M\Omega_1 + \Delta P_1}.$$

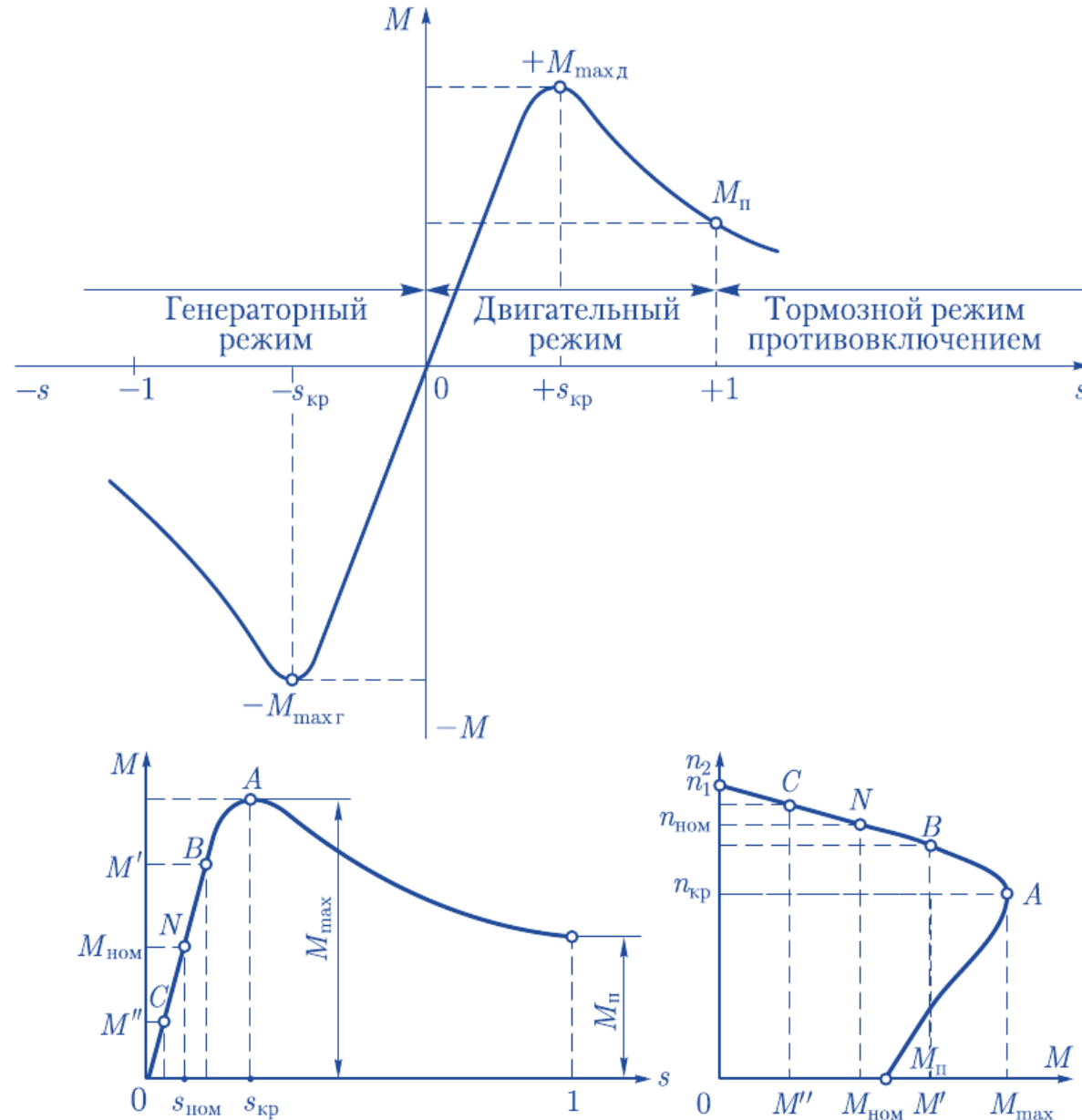
$$\Delta P_{MX} \ll P_{MX} \text{ и } \Delta P_1 \ll P_1.$$

$$\eta \approx \frac{P_{MX}}{P_{\Sigma M}} = \frac{M\Omega_2}{M\Omega_1} = \frac{\Omega_2}{\Omega_1} = 1 - s.$$

от 1 до 20 кВт $\eta_{\text{ном}} = 75 \div 90 \%$,
более 20 кВт $\eta_{\text{ном}} = 90 \div 95\%$.

4. Асинхронды қозғалтқыштар

АҚ-тың мехакникалық сипаттамалары



Механические характеристики
асинхронной машины при $\Phi = \text{const}$

$$M = P_{\text{э2}} / (\omega_1 s) = m_1 I_2'^2 r_2' / (\omega_1 s)$$

$$M = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 s [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]}$$

$$dM / ds = 0.$$

$$s_{\text{кр}} = \pm r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}.$$

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$

$$r_1 \ll (x_1 + x_2')$$

$$s_{\text{кр}} \approx \pm r_2' / (x_1 + x_2')$$

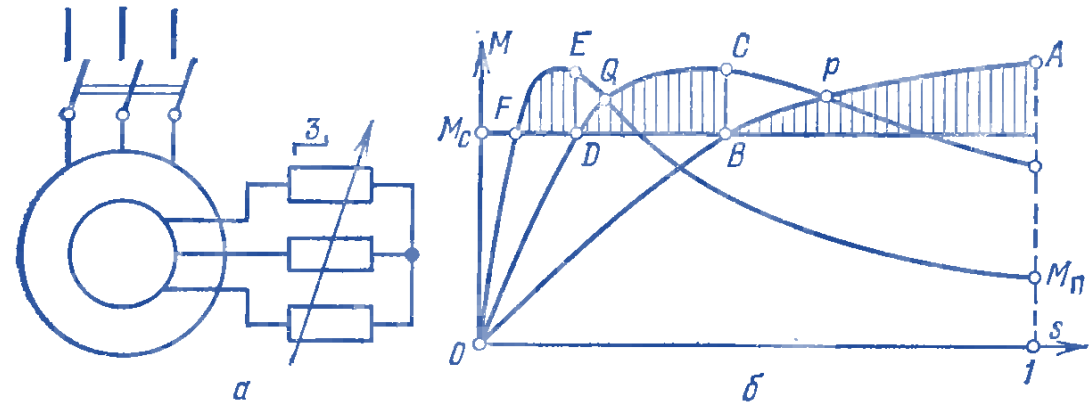
$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 (x_1 + x_2')}.$$

$$M_{\Pi} = \frac{m_1 U_1^2 r_2' p}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2]}.$$

4. Асинхронды қозғалтқыштар

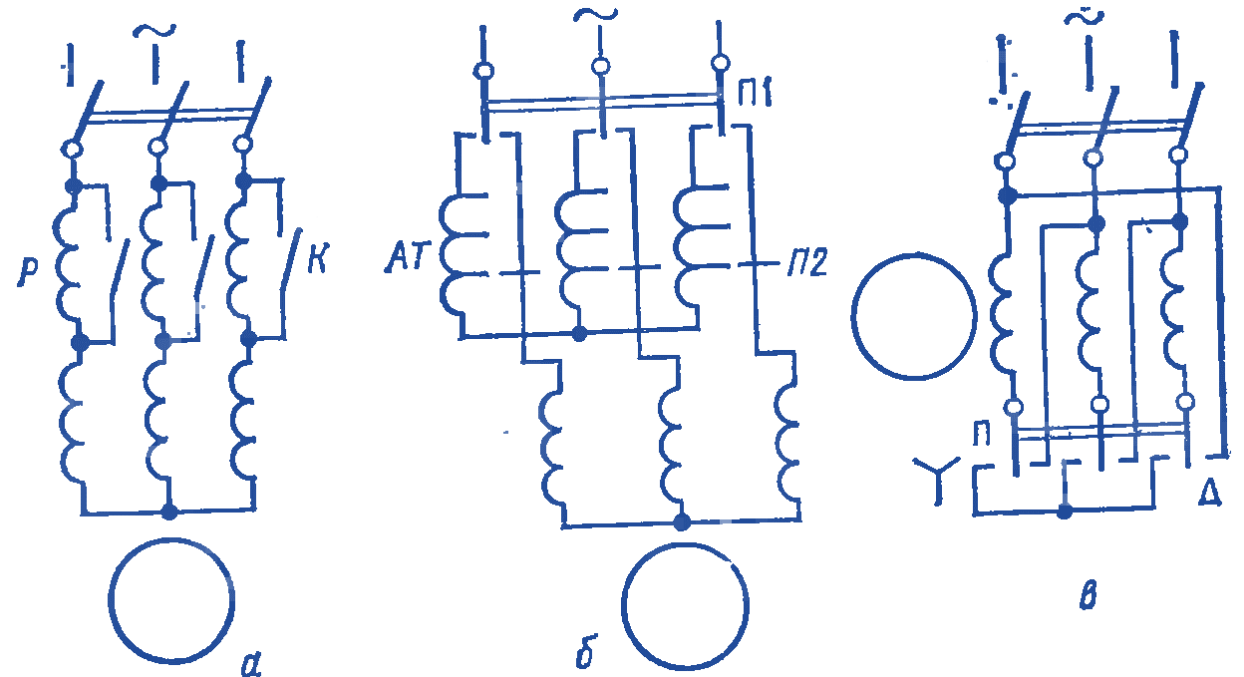
Асинхронды машиналарды іске қосу

Пуск двигателя с фазным ротором



Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором:

- 1) При помощи реактора;
- 2) При помощи автотрансформатора;
- 3) Путем переключения со звезды на треугольник.

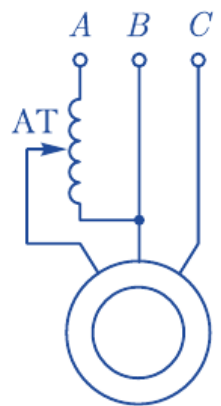
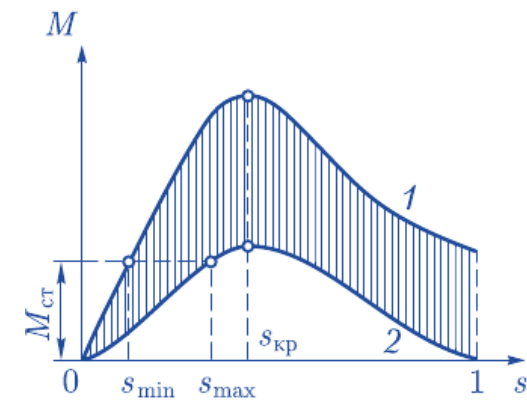
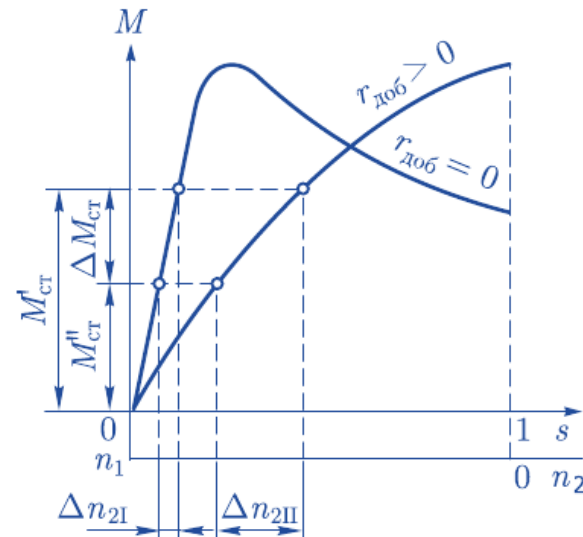
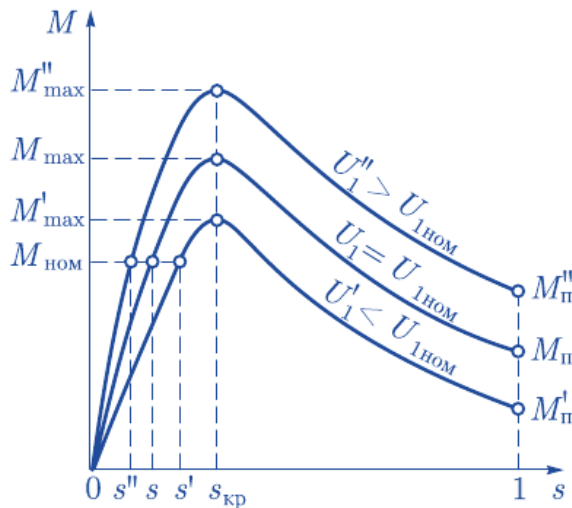
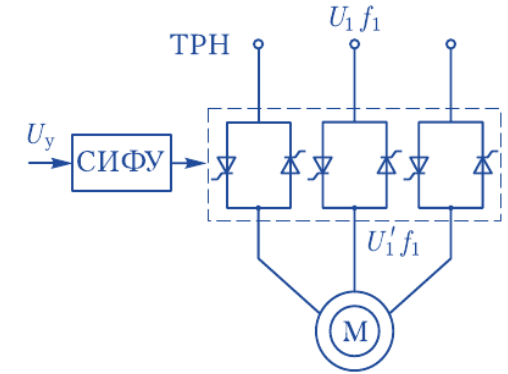
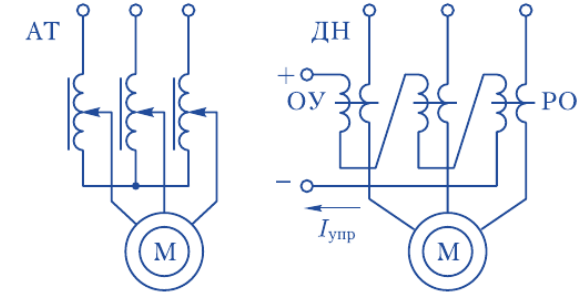


4. Асинхронды қозғалтқыштар

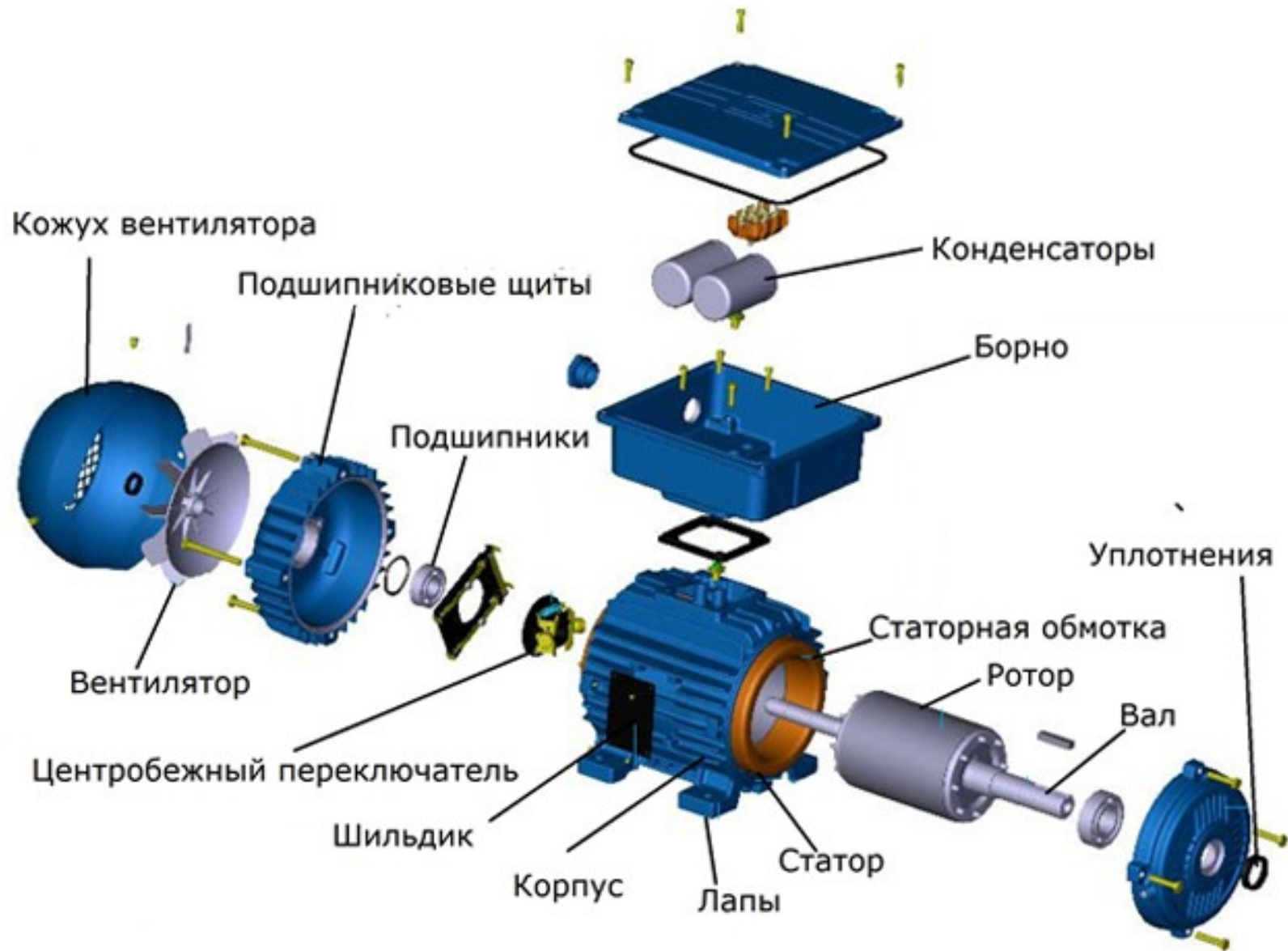
АҚ-дың айналу жиілігін реттеу

$$n_2 = n_1 (1 - s) = \frac{60f_1}{p} (1 - s).$$

- 1) Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения s :
 - 1.1 Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения;
 - 1.2 Регулирование частоты вращения нарушением симметрии подводимого напряжения;
 - 1.3 Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора;
- 2) Регулирование частоты вращения путем переключения числа пар полюсов;
- 3) Регулирование частоты вращения изменением частоты питающей сети;
- 4) Импульсное регулирование частоты вращения.



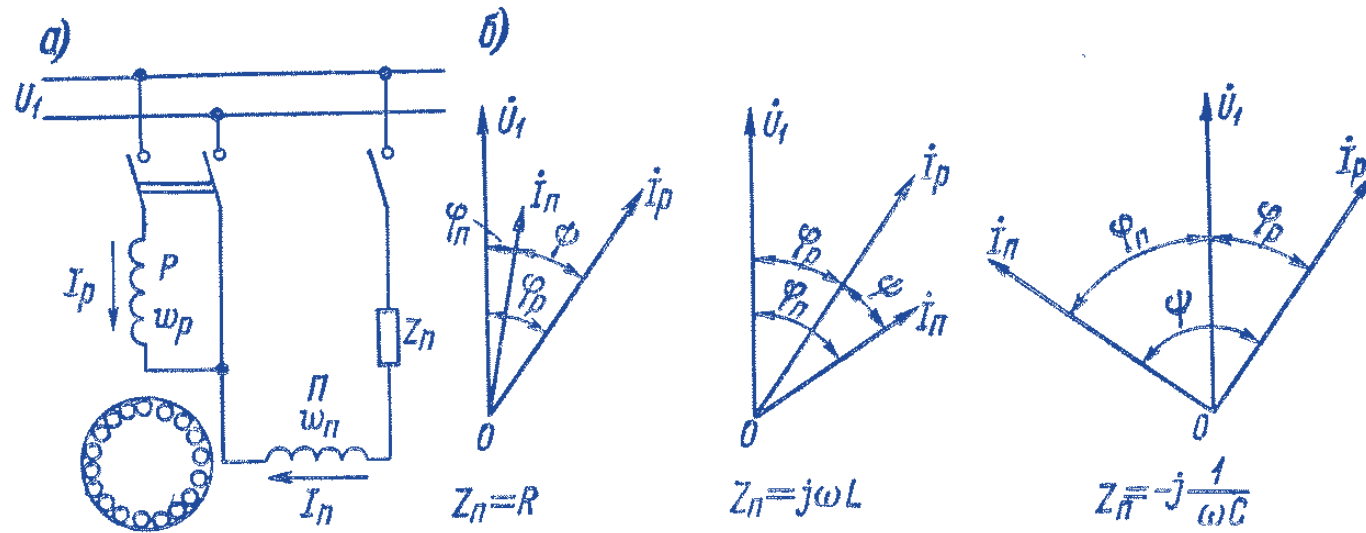
4. Асинхронды қозғалтқыштар



4. Асинхронды қозғалтқыштар

Бір фазалы АҚ-ды іске қосу

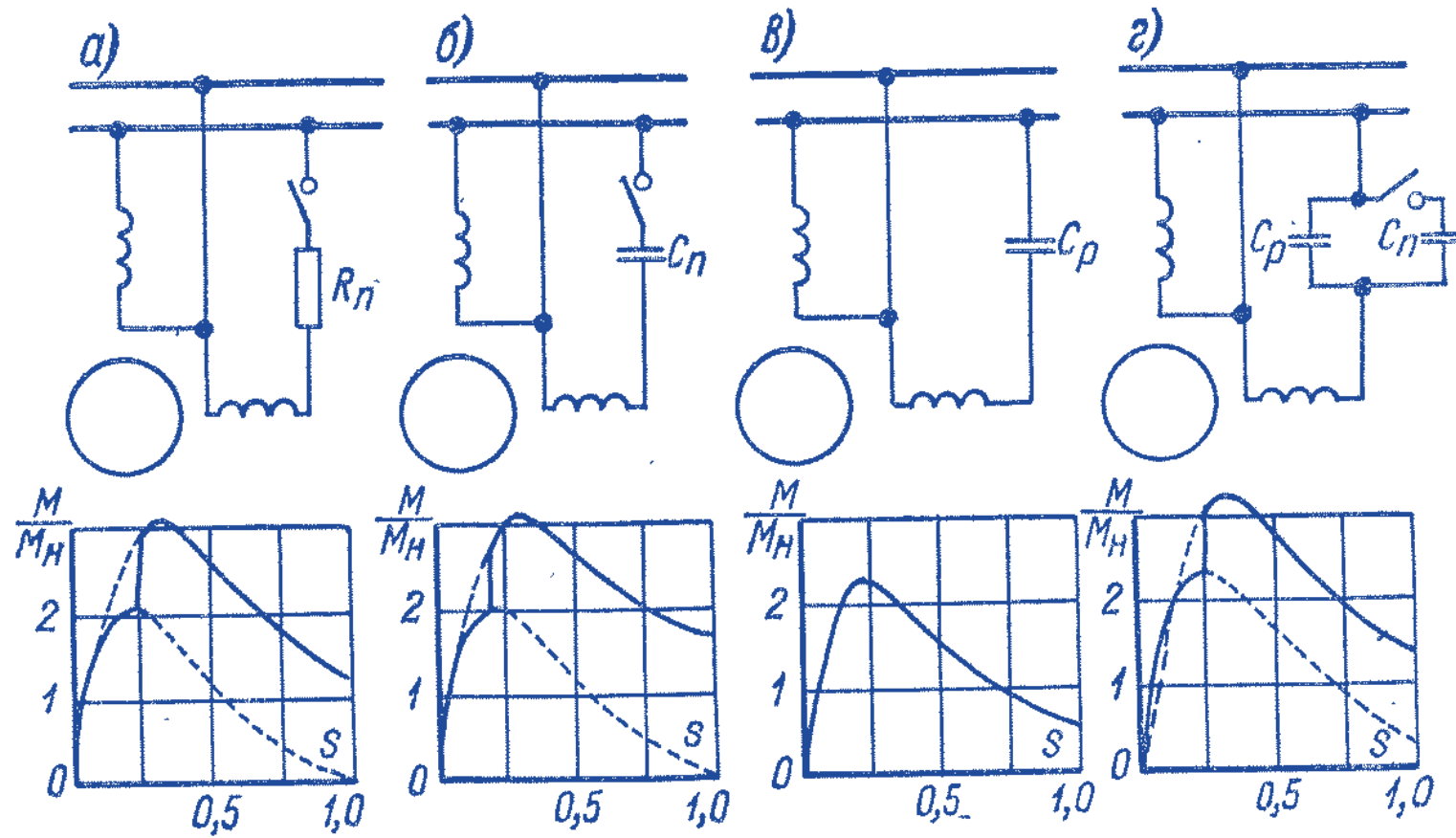
Однофазный асинхронный двигатель с пусковой обмоткой



4. Асинхронды қозғалтқыштар

Бір фазалы АҚ-ды іске қосу

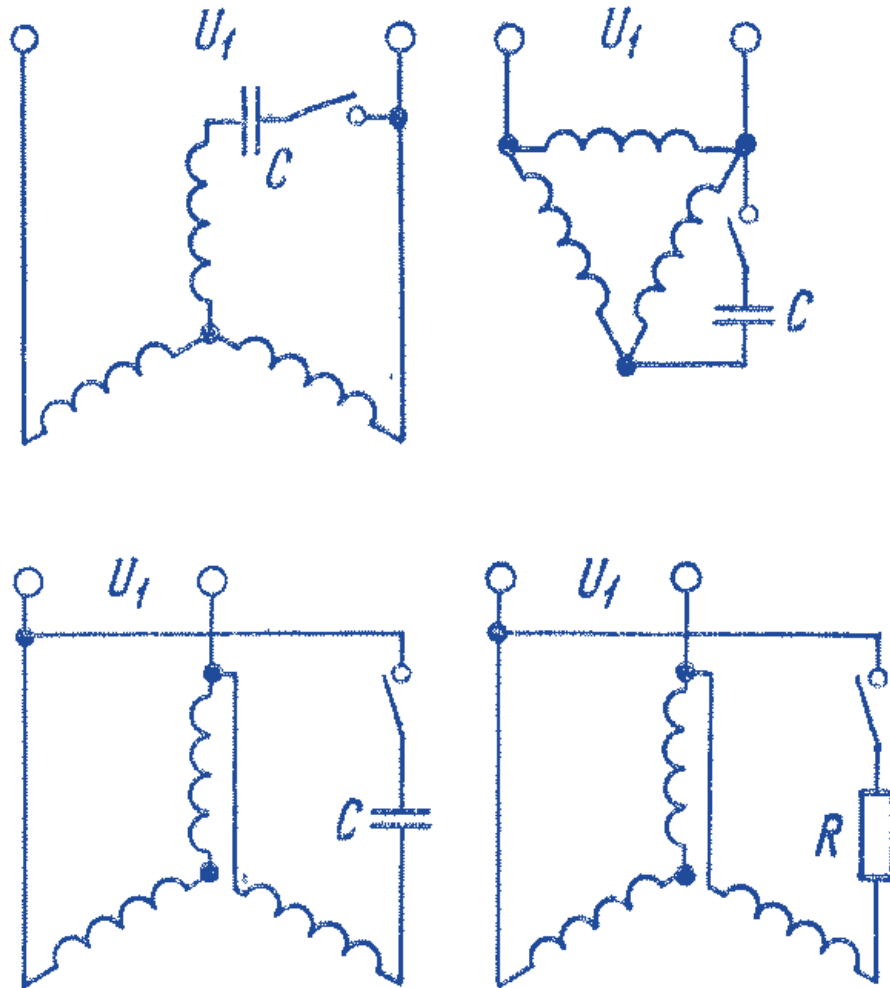
Схемы включения и механические характеристики однофазных асинхронных двигателей



4. Асинхронды қозғалтқыштар

Пуск трехфазных АД с однофазного источника

Схемы включения трехфазных АД для работы от однофазной сети



5. Бақылау сұрақтары

Келесі сұрақтарға жауап беріңіз:

1. Тұрақты ток қозғалтқыштарында іске қосу тогын шектеудің қандай әдістері қолданылады?
2. Қандай мақсатта параллельді қоздырғышты іске қосқанда қоздыру тізбегіндегі реостат кедергісі минимумға қойылады?
3. Басқару қасиеттеріне қарай параллель және тізбектей қозғалтқыштарды салыстырыңыз.
4. Тұрақты ток қозғалтқышында регенеративті тежеу қандай жағдайларда болады?
5. Синхронды қозғалтқыштың тұрақты жұмыс аймағының шектеуі қандай?
6. Синхронды қозғалтқышты іске қосу процесін түсіндіріңіз.
7. Синхронды қозғалтқыштың қуат коэффициенті қалай реттеледі?
8. Синхронды қозғалтқыштардың асинхронды қозғалтқыштармен салыстырғанда қандай артықшылықтары мен кемшіліктері бар?
9. Асинхронды машинаның сырғуы дегеніміз не?
10. Асинхронды машинаның әртүрлі жұмыс режимдерінде сырғанауының өзгеру диапазоны қандай?
11. Үш фазалы ток желісіне асинхронды генератордың статор орамасы қандай мақсатта қосылады?
12. Тиін торының және жаралы ротордың конструкциясын түсіндіріңіз.
13. Асинхронды қозғалтқыш пен трансформатордың қандай ұқсастықтары мен айырмашылықтары бар?
14. Неліктен асинхронды қозғалтқыштың білігіне механикалық жүктеме артқан сайын қозғалтқыштың желіден тұтынатын қуаты артады?