

# Асинхронные микродвигатели

---

Конструкция, свойства, характеристики



# Асинхронные микродвигатели

- » Самый распространенный вид микродвигателей
- » Как правило, «однофазные»  
(питание от однофазных сетей,  
хотя сами двигатели имеют двухфазную обмотку)
- » Вторая фазная обмотка имеет фазосдвигающий элемент
  - АД с пусковым резистором
  - АД с пусковым конденсатором
  - АД с пусковым и рабочим конденсаторами
  - АД с рабочим конденсатором
  - АД с КЗ витком
- » Универсальный асинхронный двигатель
  - оптимизирован для работы как от 3-фазной, так и 1-фазной сети
- » Конструкции статоров различаются
- » Ротор всегда короткозамкнутый
  - обычно – «беличья клетка»
  - иногда – массивный ротор
  - возможно – полый ротор

# Однофазный асинхронный двигатель

(однофазный  
режим работы АД)

# Однофазный асинхронный двигатель – ОАД

- » Однофазная обмотка на статоре
- » Короткозамкнутая обмотка на роторе

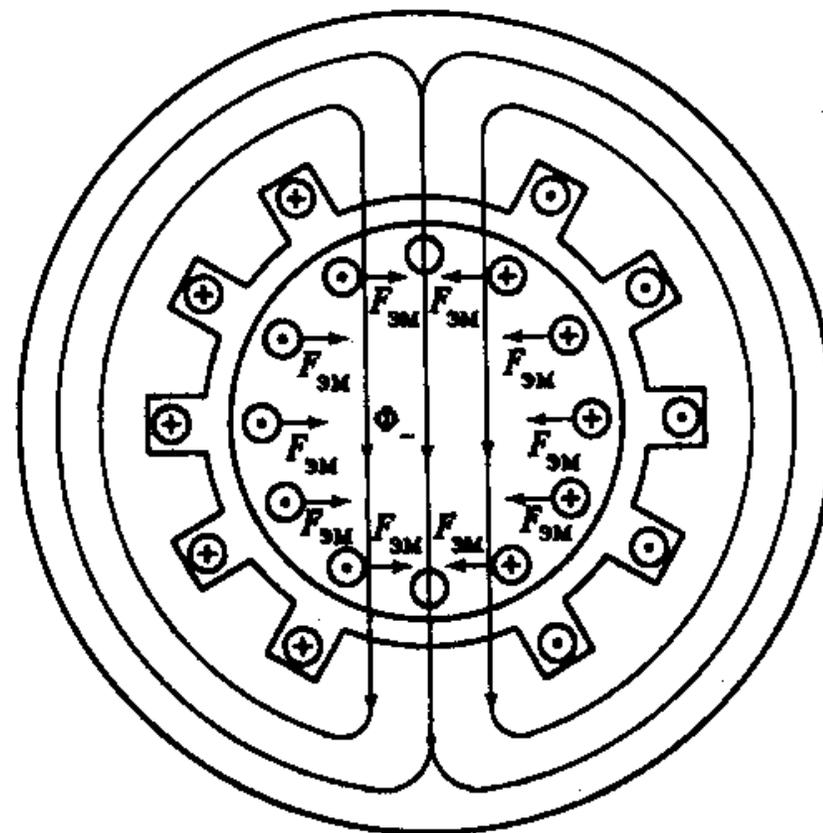
При питании переменным током обмотка статора создает пульсирующее магнитное поле: поток изменяется от  $+\Phi_m$  до  $-\Phi_m$  вдоль оси обмотки

Пульсирующее поле наводит переменную ЭДС и токи в обмотке ротора (трансформаторная ЭДС)

При неподвижном роторе электромагнитные силы  $F_{ЭМ}$  (действующие на токи в пазах ротора) взаимно уравновешены

– вращающий момент не создается!

т.е. двигатель не может начать вращение



# Особенности ОАД

- » Отсутствие пускового момента – особенность и недостаток однофазного АД
- » Но если ротор имеет начальное вращение – он будет устойчиво работать в двигательном режиме

*Метод симметричных составляющих:*

пульсирующая МДС обмотки → вращающиеся МДС прямой и обратной последовательности  $F_1$  и  $F_2$   
( $F_1 = F_2 = F_m/2$ ,  $\Omega_{c1} = -\Omega_{c2}$ )

Однофазный АД: совместная работа на общий вал двух симметричных АД с круговым полем

- »  $F_1$  создает прямое поле  $\Phi_{S1}$  → вращающий момент  $M_1$
- »  $F_2$  создает обратное поле  $\Phi_{S2}$  → тормозной момент  $M_2$

*При неподвижном роторе ( $s = 1$ )*

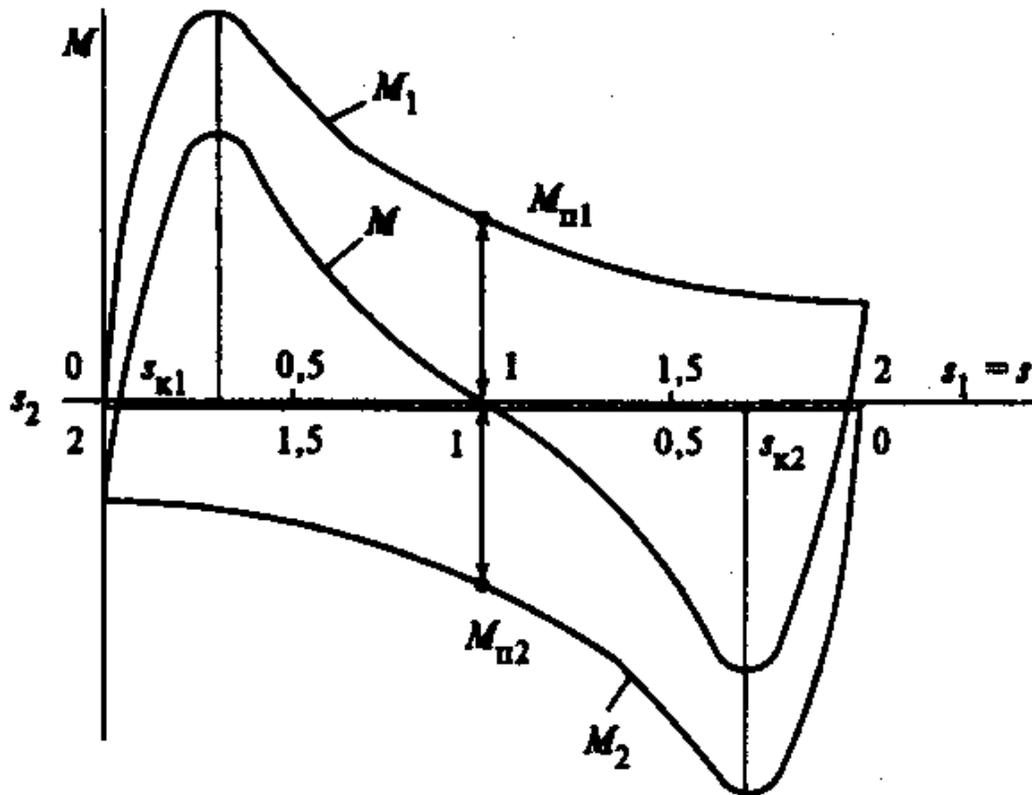
- » скорость каждого поля относительно ротора одинакова →  $|M_1| = |M_2|$
- » направление вращения полей противоположно →  $M_1 = -M_2$
- » результирующий момент  $M_{\Pi} = M_{\Pi1} + M_{\Pi2} = 0$

*При вращающемся роторе ( $0 < s < 1$ )*

- » прямое поле  $\Phi_{S1}$  наводит в роторе ЭДС  $E_{R1}$  → ток ротора  $I_{R1}$  с частотой  $f_{R1} = sf_1$  ( $f_{R1}$  стремится к 0)
- » обратное поле  $\Phi_{S2}$  наводит в роторе ЭДС  $E_{R2}$  → ток ротора  $I_{R2}$  с частотой  $f_{R2} = (2-s)f_1$  ( $f_{R2}$  стремится к  $2f_1$ )
- » индуктивное сопротивление токам  $I_{R2}$  велико (> активного) → токи  $I_{R2}$  отстают от  $E_{R2}$  почти на  $\pi/2$
- » поток ротора  $\Phi_{R2}$  направлен против потока статора  $\Phi_{S2}$  и ослабляет его → уменьшает тормозной момент  $M_2$
- » результирующий момент  $M = M_1 + M_2 > 0$

# Особенности ОАД

Механическая характеристика однофазного АД  
– сумма моментов от прямого и обратного поля



Прямое поле:

- » момент  $M_1 = f(s_1)$ , где  $s_1 = s$
- » критическое скольжение  $s_{к1}$
- » пусковой момент  $M_{п1}$

Обратное поле:

- » момент  $M_2 = f(s_2)$ , где  $s_2 = 2-s$
- » критическое скольжение  $s_{к2}$
- » пусковой момент  $M_{п2}$

Результирующая характеристика

- »  $M = M_1 + M_2$

При  $s_{к1} < 1$  ротор может вращаться в любую сторону

Такой ОАД не имеет режима ЭМ тормоза

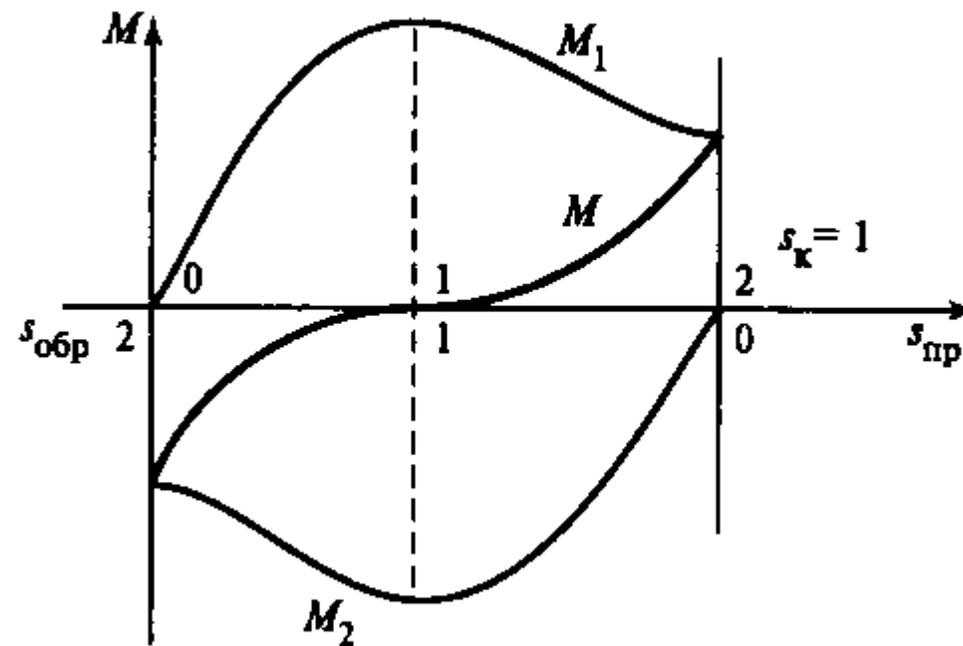
При  $n_R$  от 0 до  $n_c$  – двигательный режим

При  $n_R > n_c$  – генераторный режим

# Особенности ОАД

Механическая характеристика однофазного АД  
– сумма моментов от прямого и обратного поля

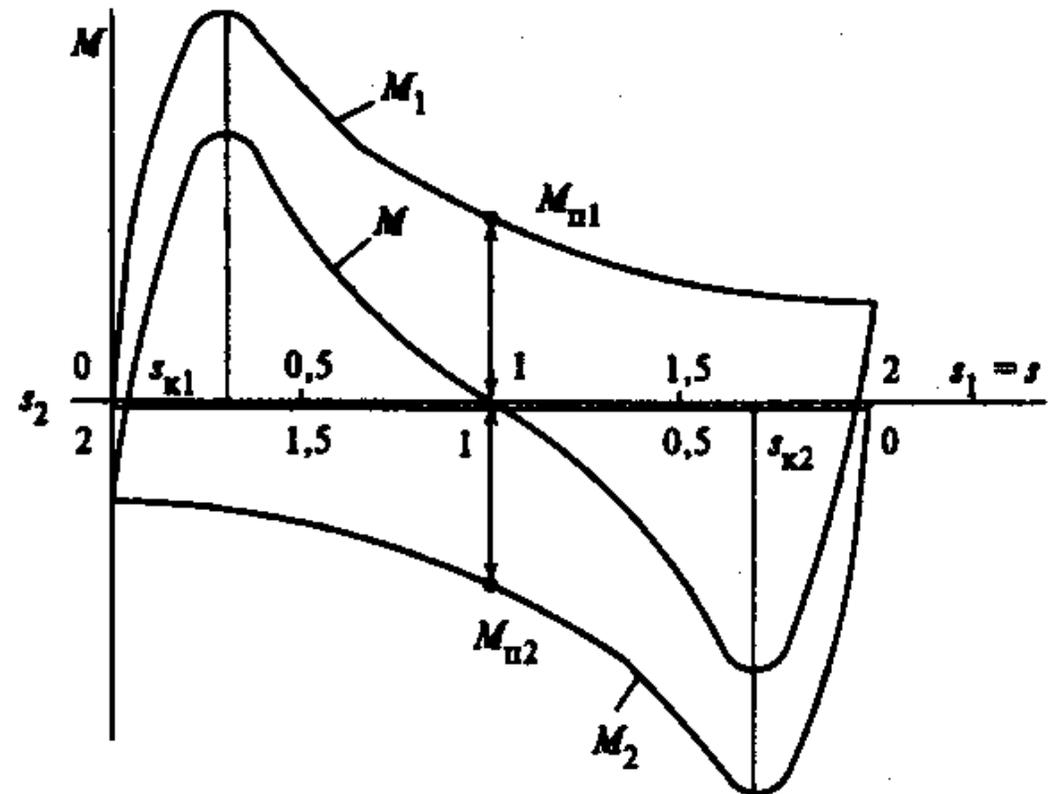
При  $s_k > 1$  в однофазном АД  
ротор вообще не может вращаться самостоятельно  
Такой ОАД имеет только тормозной режим работы  
(результрующий момент всегда  $< 0$ )



# Особенности ОАД

Механическая характеристика однофазного АД  
– сумма моментов от прямого и обратного поля

Друга особенность однофазного АД:  
величина максимального момента изменяется при  
увеличении сопротивления ротора  $r_R$   
(при изменении  $r_R$  изменяются  $s_{к1}$  и  $s_{к2}$  →  
искажается вся кривая результирующего момента)



# Уравнения ОАД

Воспользуемся теорией двухфазной несимметричной асинхронной машины

Токи прямой и обратной последовательности (в однофазном АД полагаем  $U_B = 0$ )

$$\dot{i}_{A1} = \frac{\dot{U}_A Z_{B2}}{Z_{A1} Z_{B2} + Z_{B1} Z_{A2}} \quad \dot{i}_{A2} = \frac{\dot{U}_A Z_{B1}}{Z_{A1} Z_{B2} + Z_{B1} Z_{A2}}$$

Поскольку второй фазы нет, полагаем  $Z_{B1} = Z_{B2} = \infty$

Тогда

$$\dot{i}_{A1} = \frac{\dot{U}_A}{Z_{A1} + Z_{A2}} \quad \dot{i}_{A2} = \frac{\dot{U}_A}{Z_{A1} + Z_{A2}}$$

Полный ток фазы

$$\dot{i}_A = \dot{i}_{A1} + \dot{i}_{A2} = \frac{2\dot{U}_A}{Z_{A1} + Z_{A2}}$$

Таким образом, входное сопротивление однофазного АД  $Z_{\text{вх}} = \frac{Z_{A1}}{2} + \frac{Z_{A2}}{2}$

где  $Z_{A1}$  и  $Z_{A2}$  – полные сопротивления фазы токам прямой и обратной последовательности (см. схему замещения)

# Схема замещения ОАД

Схема замещения – модель входного сопротивления

$$Z_{ex} = \frac{Z_{A1}}{2} + \frac{Z_{A2}}{2} = \left( \frac{Z_{SA}}{2} + \frac{Z_{RA1}}{2} \right) + \left( \frac{Z_{SA}}{2} + \frac{Z_{RA2}}{2} \right)$$

Здесь  $Z_{RA1}$  и  $Z_{RA2}$  – сопротивления разветвления схемы замещения для токов  $I_{A1}$  и  $I_{A2}$

$U_{A1}$  и  $U_{A2}$  – падения напряжения на  $Z_{A1}/2$  и  $Z_{A2}/2$  от тока фазы  $I_A$

Падения напряжения  $U_{A1}$  и  $U_{A2}$  изменяются при изменении  $n_R$  ( $s$ )

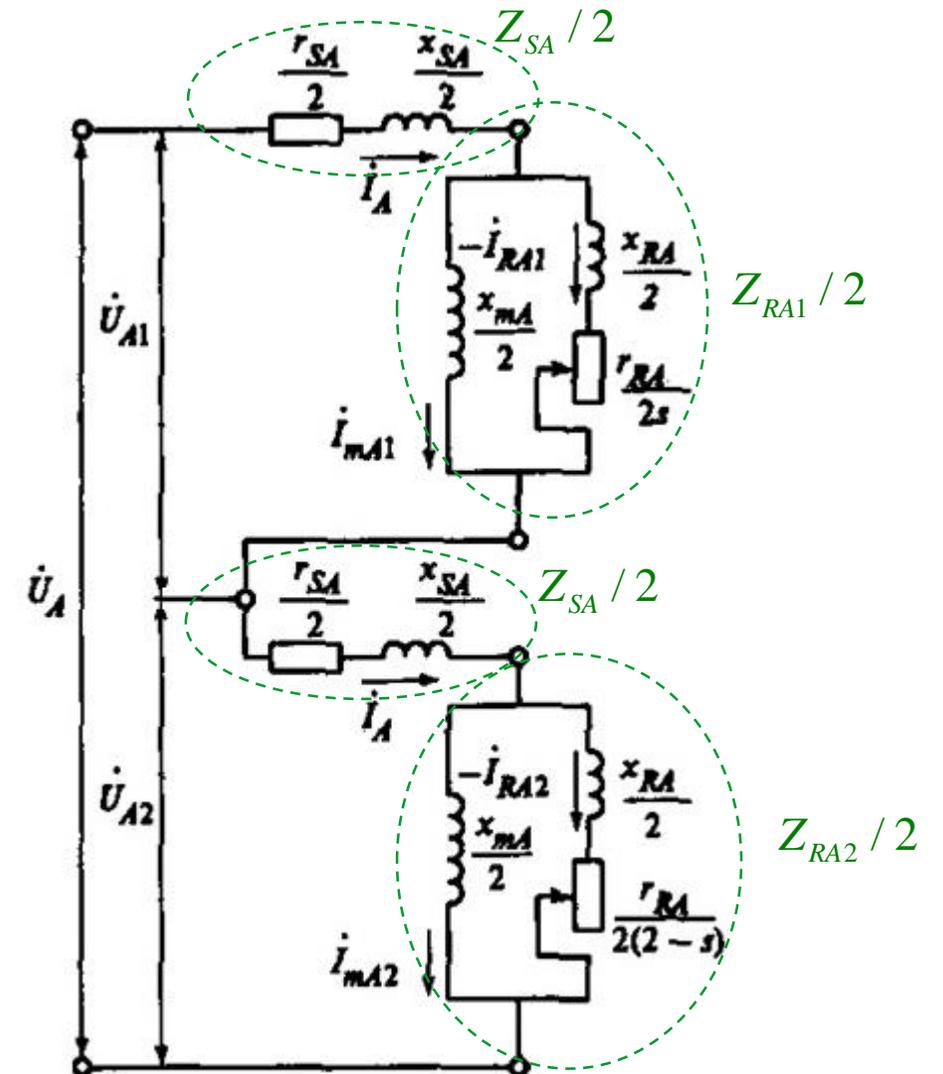
» При пуске ( $n_R = 0, s = 1$ )  $U_{A1} = U_{A2}$

» По мере разгона (при увеличении  $n_R$ , уменьшении  $s$ )

- $U_{A1}$  возрастает из-за увеличения  $\frac{r_{RA}}{2s}$
- $U_{A2}$  уменьшается из-за уменьшения  $\frac{r_{RA}}{2(2-s)}$

» При идеальном ХХ ( $n_R = n_c, s = 0$ ) почти все  $U_A$  приходится на  $Z_{A1}/2$

Поэтому ток ХХ однофазного АД вдвое больше тока ХХ обычного АД, ведь  $(Z_{SA} + x_{mA})/2 < (Z_{SA} + x_{mA})$



# Асинхронные двигатели с пусковыми элементами

Сравнение свойств  
фазосдвигающих  
элементов

# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

На практике однофазные АД имеют две фазные обмотки, к которым могут быть подключены разные фазосдвигающие элементы ( $R$ ,  $L$  или  $C$ ) – split-phase motor

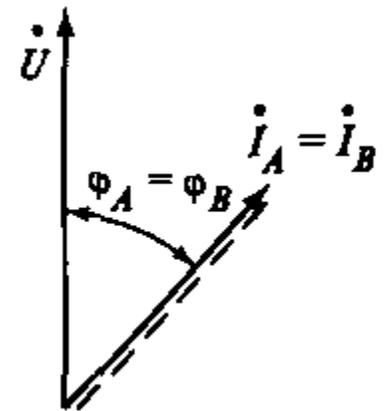
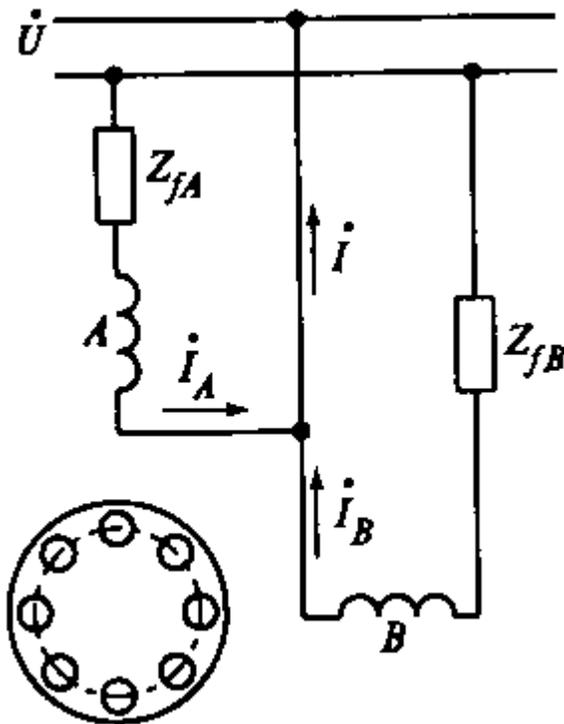
Рассмотрим пуск двухфазного АД с питанием от однофазной сети

Пусть фазы  $A$  и  $B$

- » сдвинуты в пространстве на  $\pi/2$
- » имеют одинаковое число эффективных витков  $k = 1$
- » содержат фазосдвигающие элементы  $Z_{fA}$  и  $Z_{fB}$

При отсутствии фазосдвигающих элементов ( $Z_{fA} = Z_{fB} = 0$ )

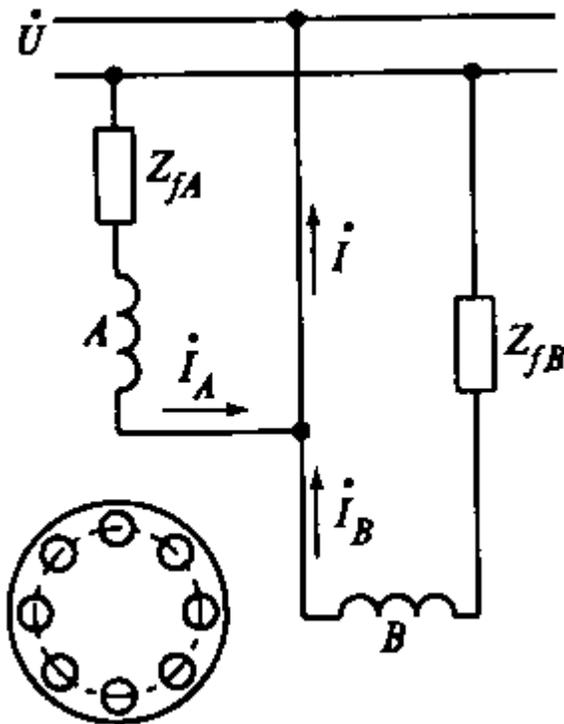
- » пусковые токи фаз равны по амплитуде  $I_A = I_B$
- » отстают от  $U$  на одинаковый угол  $\varphi_A = \varphi_B$
- » т.е. совпадают во времени (разность фаз  $\beta = 0$ )
- » магнитное поле – пульсирующее
- » пусковой момент  $M_{II} = 0$



# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

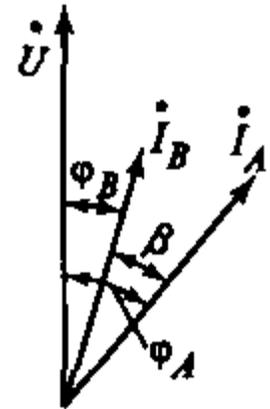
Пусть фазы  $A$  и  $B$

- » сдвинуты в пространстве на  $\pi/2$
- » имеют одинаковое число эффективных витков  $k = 1$
- » содержат фазосдвигающие элементы  $Z_{fA}$  и  $Z_{fB}$



Включим в фазу  $B$  **резистор** ( $Z_{fA} = 0, Z_{fB} = r_f$ )

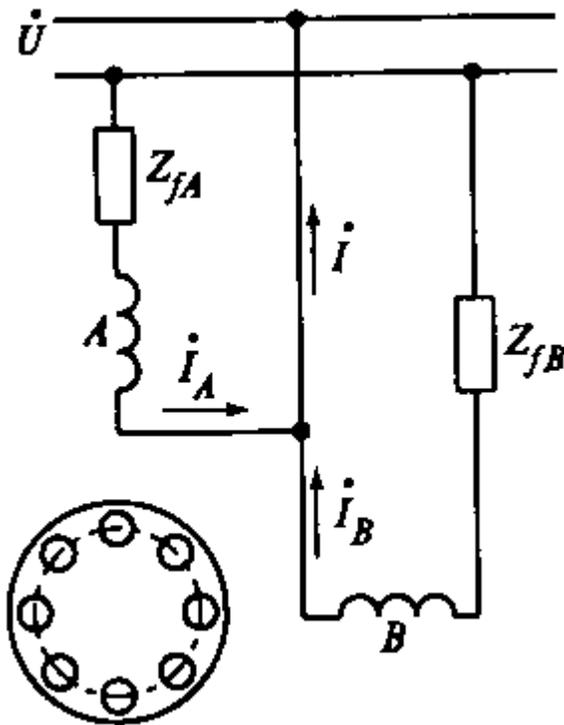
- » сопротивление фазы  $B$  «более активное», чем фазы  $A$
- » ток  $I_B$  отстает от  $U$  на угол  $\varphi_B < \varphi_A$
- » появляется разность фаз  $\beta$
- » магнитное поле – эллиптическое
- » пусковой момент  $M_{II} > 0$
- » (но  $\beta$  всегда меньше  $\pi/2$ )



# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

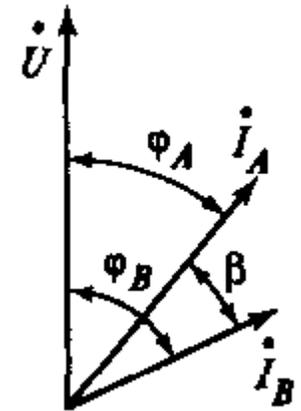
Пусть фазы  $A$  и  $B$

- » сдвинуты в пространстве на  $\pi/2$
- » имеют одинаковое число эффективных витков  $k = 1$
- » содержат фазосдвигающие элементы  $Z_{fA}$  и  $Z_{fB}$



Включим в фазу  $B$  катушку индуктивности ( $Z_{fA} = 0, Z_{fB} = jx_{fL}$ )

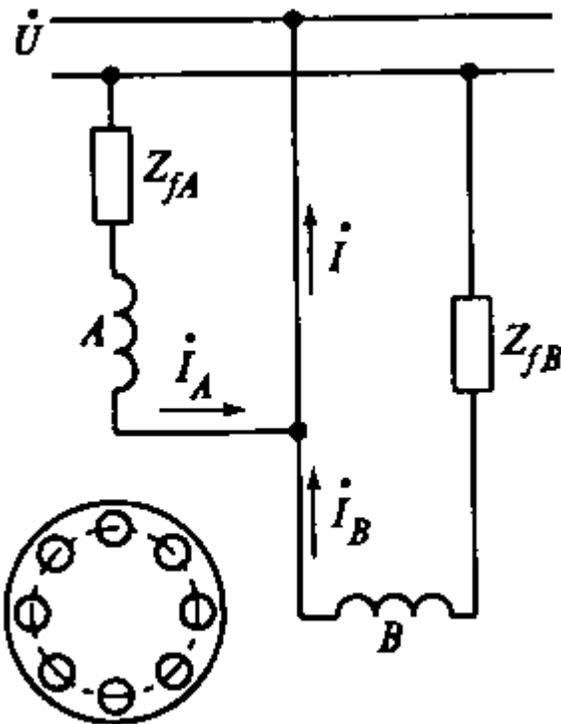
- » сопротивление фазы  $B$  «более индуктивное», чем фазы  $A$
- » ток  $I_B$  отстает от  $U$  на угол  $\varphi_B > \varphi_A$
- » появляется разность фаз  $\beta$
- » магнитное поле – эллиптическое
- » пусковой момент  $M_{II} > 0$
- » (но  $\beta$  всегда меньше  $\pi/2$ )



# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

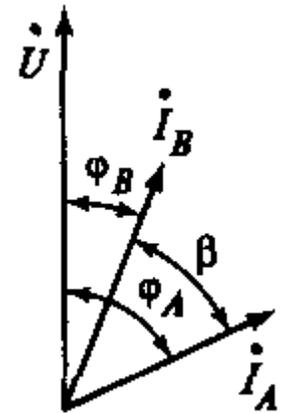
Пусть фазы  $A$  и  $B$

- » сдвинуты в пространстве на  $\pi/2$
- » имеют одинаковое число эффективных витков  $k = 1$
- » содержат фазосдвигающие элементы  $Z_{fA}$  и  $Z_{fB}$



Включим в фазу  $A$  катушку индуктивности, а в фазу  $B$  резистор  
( $Z_{fA} = jx_{fL}$ ,  $Z_{fB} = r_f$ )

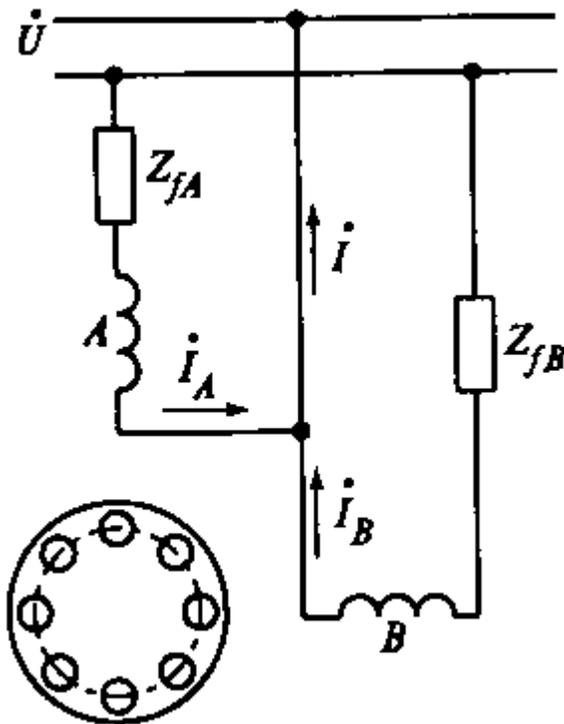
- » ток  $I_A$  отстает от  $U$  на бóльший угол  $\varphi_A$
- » ток  $I_B$  отстает от  $U$  на мéньший угол  $\varphi_B$
- » разность фаз  $\beta$  увеличивается
- » магнитное поле – более эллиптическое
- » пусковой момент  $M_{II}$  возрастает
- » (но  $\beta$  все равно меньше  $\pi/2$ )



# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

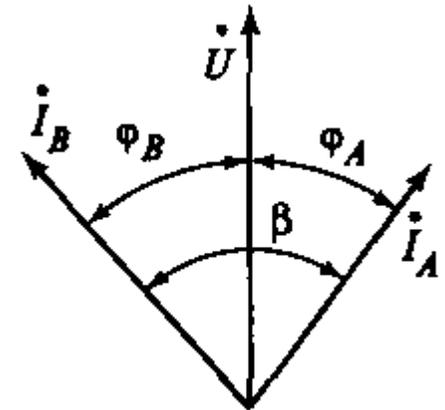
Пусть фазы  $A$  и  $B$

- » сдвинуты в пространстве на  $\pi/2$
- » имеют одинаковое число эффективных витков  $k = 1$
- » содержат фазосдвигающие элементы  $Z_{fA}$  и  $Z_{fB}$



Включим в фазу  $B$  **конденсатор** ( $Z_{fA} = 0, Z_{fB} = -jx_{fC}$ )

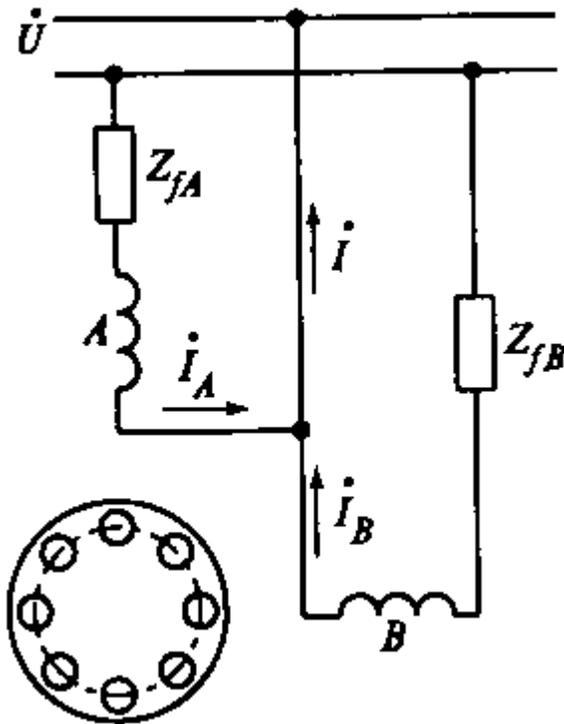
- » ток  $I_B$  может опережать  $U$  на угол  $\varphi_B$
- » можно подобрать  $C$  так, чтобы получить разность фаз  $\beta = \pi/2$
- » возможно получить круговое поле
- » наибольший пусковой момент  $M_{II}$  (т.к. нет тормозного момента)



# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

Конденсатор в качестве фазосдвигающего элемента позволяет

- » получить круговое поле при пуске
- » обеспечить требуемый момент при минимальном токе
- » повысить энергетические показатели



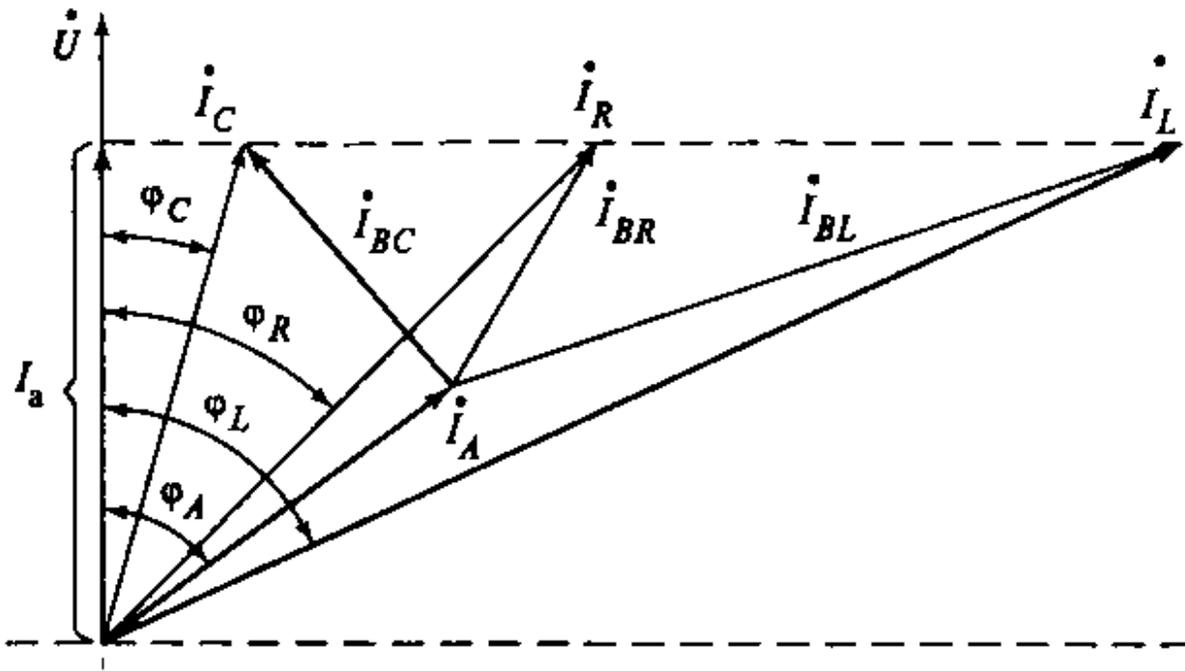
Сравним фазосдвигающие элементы при условии получения одинакового пускового момента

- » момент АД – взаимодействие тока и потока
- » величина момента пропорциональна  $\Phi \cdot I_a$  (где  $I_a$  – активная составляющая тока)
- » поскольку  $\Phi \sim U$ , можно принять  $M \sim U \cdot I_a$
- » т.е. момент определяется активной составляющей тока

Сравним АД с фазосдвигающими элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$  в фазе  $B$ , обеспечивающими одинаковую  $I_a$

# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

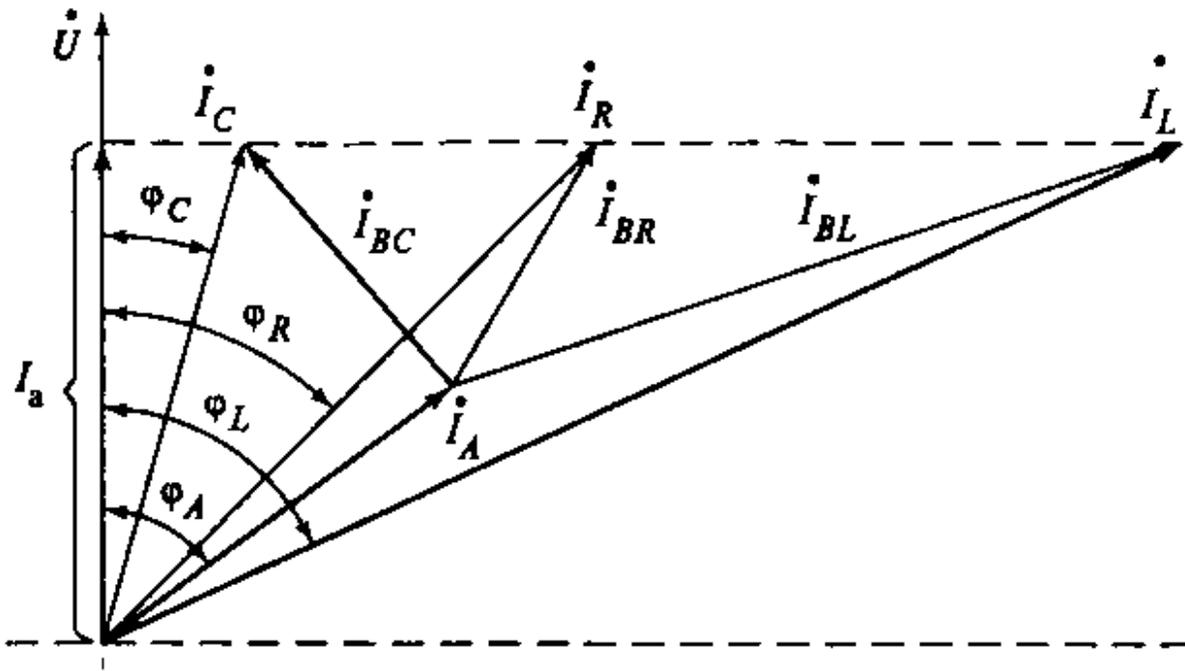
Сравним АД с фазосдвигающими элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$  в фазе  $B$ , обеспечивающими одинаковую  $I_a$



- $I_A$  – ток фазы  $A$
- $I_{BR}$  – ток фазы  $B$  с добавочным  $R$
- $I_{BL}$  – ток фазы  $B$  с добавочным  $L$
- $I_{BC}$  – ток фазы  $B$  с добавочным  $C$
- $I_R$  – полный ток АД при использовании  $R$
- $I_L$  – полный ток АД при использовании  $L$
- $I_C$  – полный ток АД при использовании  $C$
- $I_a$  – активная составляющая полного тока

# Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

Сравним АД с фазосдвигающими элементами  $R$ ,  $L$  и  $C$  в фазе  $B$ , обеспечивающими одинаковую  $I_a$



Полный ток, потребляемый АД из сети

$$I_C < I_R < I_L$$

Потребляемая из сети мощность

$$P_{SC} < P_{SR} < P_{SL}$$

Электрические потери

$$P_{\text{э}C} < P_{\text{э}R} < P_{\text{э}L}$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta_C > \eta_R > \eta_L$$

Коэффициент мощности

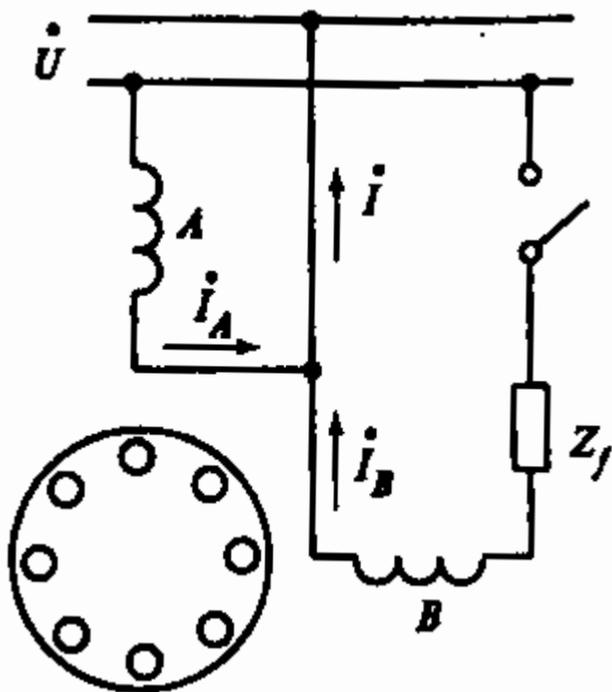
$$\cos \varphi_C > \cos \varphi_R > \cos \varphi_L$$

Конденсатор – наилучший фазосдвигающий элемент  
(но самый дорогой)

# Асинхронные двигатели с пусковыми элементами

Однофазный АД не имеет пускового момента  
но после запуска работает устойчиво

→ достаточно обеспечить пуск АД и вернуться в однофазный режим



АД с пусковыми элементами имеет 2 обмотки

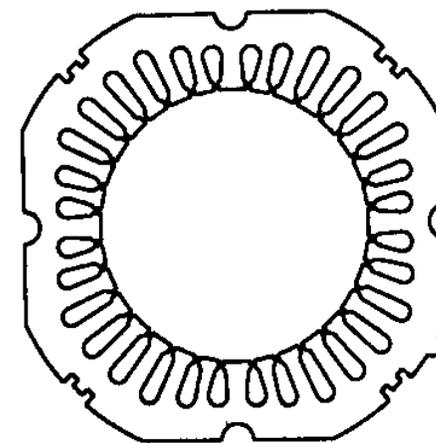
- » рабочая обмотка – постоянно под напряжением
- » пусковая обмотка – включается только на время пуска

Оси обмоток смещены в пространстве на  $\pi/2$

Пусковая обмотка имеет фазосдвигающий элемент  $Z_f$   
(на практике используют  $R$  или  $C$ )

Пусковая обмотка используется кратковременно  
→ целесообразно отдать 2/3 пазов  
под рабочую обмотку

Кроме того, пазы пусковой обмотки  
имеют меньшее сечение



# Асинхронные двигатели с пусковым резистором

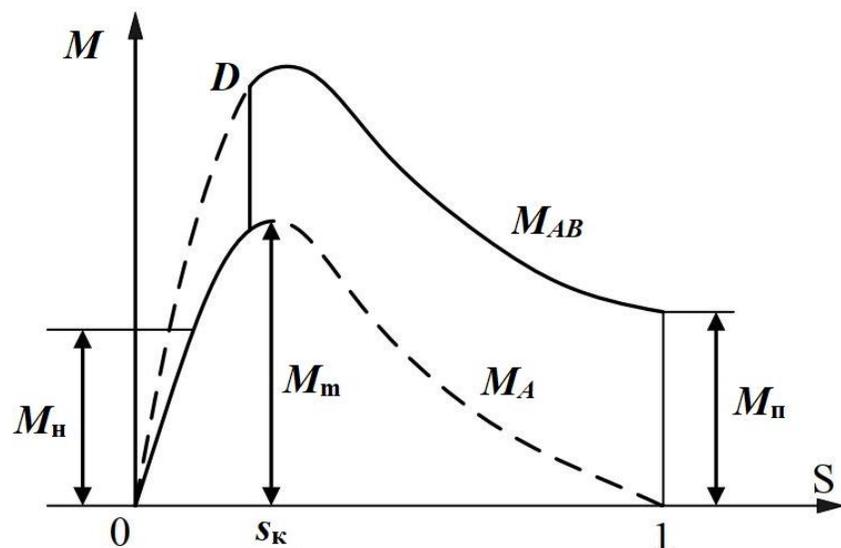
Применяют в случаях, когда не требуется большой пусковой момент

Для повышения  $R$  фазы  $B$  – либо дополнительный резистор, либо обмоточный провод меньшего сечения (тогда  $r_{SA} < r_{SB}$ )

Кроме того, число витков пусковой обмотки делают меньше (тогда  $x_{SB} < x_{SA}$ )

Для дальнейшего снижения  $x_{SB}$  часть витков фазы  $B$  иногда наматывают бифилярно

Увеличение  $r_{SB}$  и уменьшение  $x_{SB}$  → увеличение временного сдвига  $\beta$  между  $I_A$  и  $I_B$   
→ эллиптическое поле → пусковой момент  $M_{II} > 0$



**Механическая характеристика** состоит из двух частей

- » при пуске  $M_{AB}$  – двухфазный несимметричный АД
- » после разгона  $M_A$  – отключение пусковой обмотки (точка  $D$ ) и переход в режим однофазного АД

Автоматическое отключение пусковой обмотки

- » центробежный выключатель (на валу) – срабатывает при разгоне до скорости  $n_D$
- » токовое реле (потребляемый ток) – срабатывает при снижении тока до  $I_D$

# Асинхронные двигатели с пусковым резистором

Расчет: симметричные составляющие тока – из уравнений двухфазного несимметричного АД

При пуске:  $U_A = U_B = U$

с учетом  $Z_{B1} = Z_{\phi B1} + r_f$  и  $Z_{B2} = Z_{\phi B2} + r_f$  запишем

$$\dot{I}_{A1} = \dot{U} \frac{Z_{\phi B2} + r_f - jkZ_{A2}}{Z_{A1}(Z_{\phi B2} + r_f) + Z_{A2}(Z_{\phi B1} + r_f)}$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{U} \frac{Z_{\phi B1} + r_f + jkZ_{A1}}{Z_{A1}(Z_{\phi B2} + r_f) + Z_{A2}(Z_{\phi B1} + r_f)}$$

В рабочем режиме:  $I_B = 0, Z_B = \infty$

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}}{Z_{A1} + Z_{A2}}$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{\dot{U}}{Z_{A1} + Z_{A2}}$$

Далее находят полный ток, момент, потери, КПД и  $\cos\phi$  для всех режимов работы ( $s$  от 0 до 1)

# Асинхронные двигатели с пусковым резистором

Для увеличения пускового момента применяют **форсирование потока** пусковой обмотки

Поток фазы  $B$   $\Phi_B \approx \frac{U}{4,44 f_1 w_B}$  Для увеличения потока уменьшают  $w_B$   
Получают пусковой момент  $M_{II} = (0,8 \dots 1,3) M_H$

- » Уменьшение  $w_B$  ведет к увеличению тока  $I_B$  и общего пускового тока  
Обычно  $I_{II} = (7 \dots 9) I_H$
- » При пуске плотность тока в пусковой обмотке достигает  $40 \dots 60$  А/мм<sup>2</sup>
- » В результате частые пуски недопустимы
- » Для снижения нагрева лучше использовать обмоточный провод увеличенного сечения + дополнительный резистор за пределами АД

**Энергетические показатели** невысоки

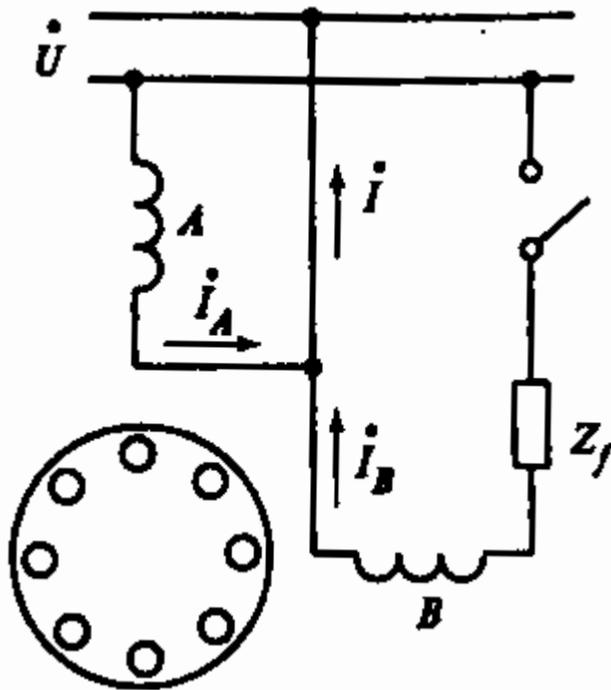
- » КПД  $0,4 \dots 0,7$
- » Коэффициент мощности  $0,5 \dots 0,6$
- » Перегрузочная способность  $1,4 \dots 2,0$

Зато простота и дешевизна → применяют при кратковременных режимах и нечастых пусках (холодильники, стиральные машины)

# Асинхронные двигатели с пусковым конденсатором

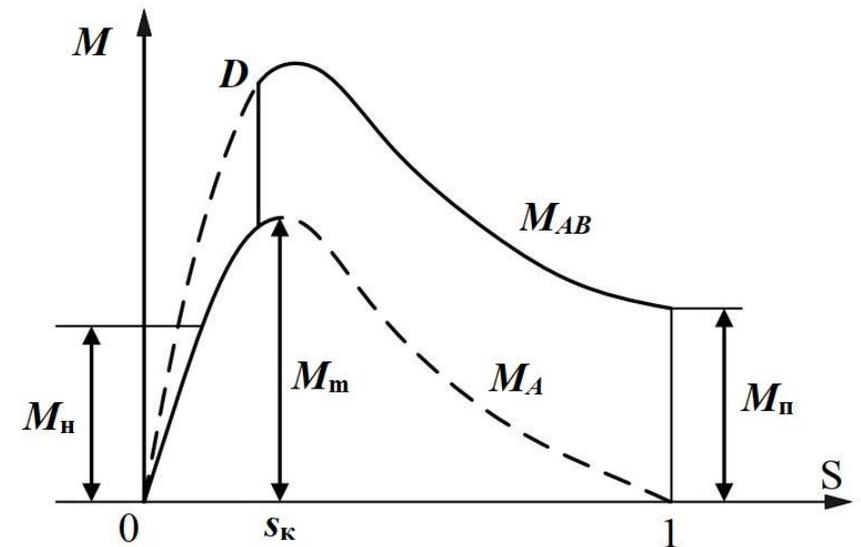
– применяют при повышенных требованиях к пусковым свойствам

Схема соединения – аналогична двигателю с пусковым резистором



Механическая характеристика – аналогична двигателю с пусковым резистором

- » при пуске – двухфазный несимметричный АД
- » после разгона – отключение пусковой обмотки и переход в режим однофазного АД



# Асинхронные двигатели с пусковым конденсатором

Расчет: выражения для симметричных составляющих тока в пусковом режиме аналогичны двигателю с пусковым резистором, но фазосдвигающий элемент  $Z_f = -jx_{fC}$

$$\dot{I}_{A1} = \dot{U} \frac{Z_{\phi B2} - jx_{fC} - jkZ_{A2}}{Z_{A1}(Z_{\phi B2} - jx_{fC}) + Z_{A2}(Z_{\phi B1} - jx_{fC})}$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{U} \frac{Z_{\phi B1} - jx_{fC} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}(Z_{\phi B2} - jx_{fC}) + Z_{A2}(Z_{\phi B1} - jx_{fC})}$$

В рабочем режиме:

$$\dot{I}_{A1} = \frac{\dot{U}}{Z_{A1} + Z_{A2}}$$

$$\dot{I}_{A2} = \frac{\dot{U}}{Z_{A1} + Z_{A2}}$$

Число витков  $w_B$  и емкость конденсатора  $C$  подбирают так, чтобы

- » получить требуемый пусковой момент
- » либо получить круговое поле при пуске

За счет форсирования потока фазы  $B$  можно получить большой пусковой момент  $M_{II} = (2,0 \dots 2,5)M_H$  (больше чем при круговом поле)

При этом кратность пускового тока  $I_{II} = (4 \dots 6)I_H$

# Асинхронные двигатели с пусковым конденсатором

Для получения кругового поля при пуске надо обеспечить  $I_{A2} = 0$ , т.е.  $Z_{\phi B1} - jx_{fC} + jkZ_{A1} = 0$

$$i_{A2} = \dot{U} \frac{Z_{\phi B1} - jx_{fC} + jkZ_{A1}}{Z_{A1}(Z_{\phi B2} - jx_{fC}) + Z_{A2}(Z_{\phi B1} - jx_{fC})}$$

В случае  $N_{ZA} \neq N_{ZB}$  сопротивление фазы  $B$  при пуске приводится как

$$Z_{\phi B1\Pi} = k a t r_{SA} \frac{k_{oA}^2}{k_{oB}^2} + k^2 r_{RA\Pi} + j \left( k^2 a x_{SA} \frac{k_{oA}^2}{k_{oB}^2} + k^2 x_{RA\Pi} \right)$$

Тогда для получения  $Z_{\phi B1} - jx_{fC} + jkZ_{A1} = 0$  надо обеспечить выполнение двух равенств

Т.е. для получения кругового поля при пуске надо обеспечить следующие значения коэффициента трансформации  $k = w_B/w_A$  и реактивного сопротивления конденсатора  $x_{fC}$

$$\begin{cases} k a t r_{SA} \frac{k_{oA}^2}{k_{oB}^2} + k^2 r_{RA\Pi} - k x_{A1\Pi} = 0 \\ k^2 a x_{SA} \frac{k_{oA}^2}{k_{oB}^2} + k^2 x_{RA\Pi} - x_{fC} + k r_{A1\Pi} = 0 \end{cases}$$

(одновременно)

$$\begin{cases} k = \frac{x_{A1\Pi} - a t r_{SA} \frac{k_{oA}^2}{k_{oB}^2}}{r_{RA\Pi}} \\ x_{fC} = k r_{A1\Pi} + k^2 a x_{SA} \frac{k_{oA}^2}{k_{oB}^2} + k^2 x_{RA\Pi} \end{cases}$$

Если принять  $a = N_{ZA}/N_{ZB} = 2$  и  $k_{oA}/k_{oB} = \sqrt{3}/2$  (при  $y_A = y_B$ ), то можно считать

$$\begin{cases} k = \frac{x_{A1\Pi} - 1,5 t r_{SA}}{r_{RA\Pi}} \\ x_{fC} = k r_{A1\Pi} + 1,5 k^2 x_{SA} + k^2 x_{RA\Pi} \end{cases}$$

# Асинхронный конденсаторный двигатель (АКД)

# Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

АКД имеет главную обмотку и вспомогательную обмотку с конденсатором, которые всегда находятся под напряжением

Числа пазов обмоток одинаковы  $N_{ZA} = N_{ZB} = N_Z/2$ ,  
форма пазов одинакова

Для устранения влияния 3 гармоника в 2-фазных двигателях выбирают укорочение шага обмотки  $y \approx 2/3 \tau$

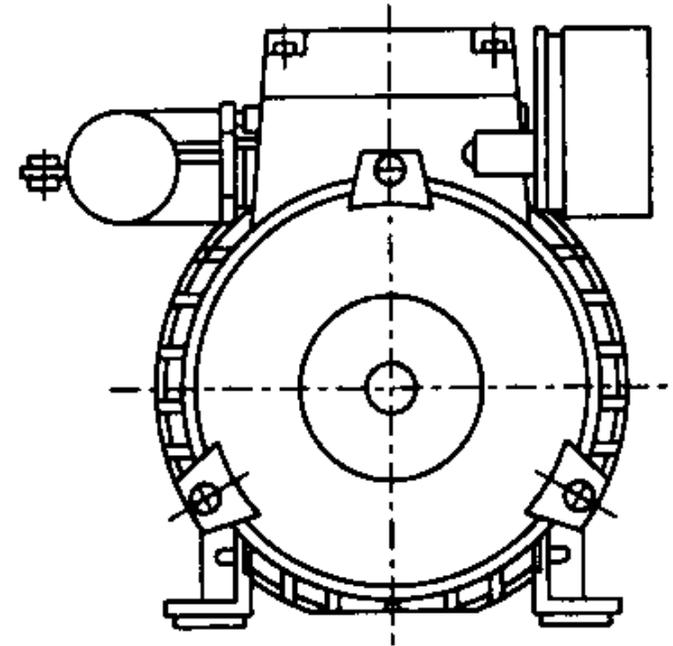
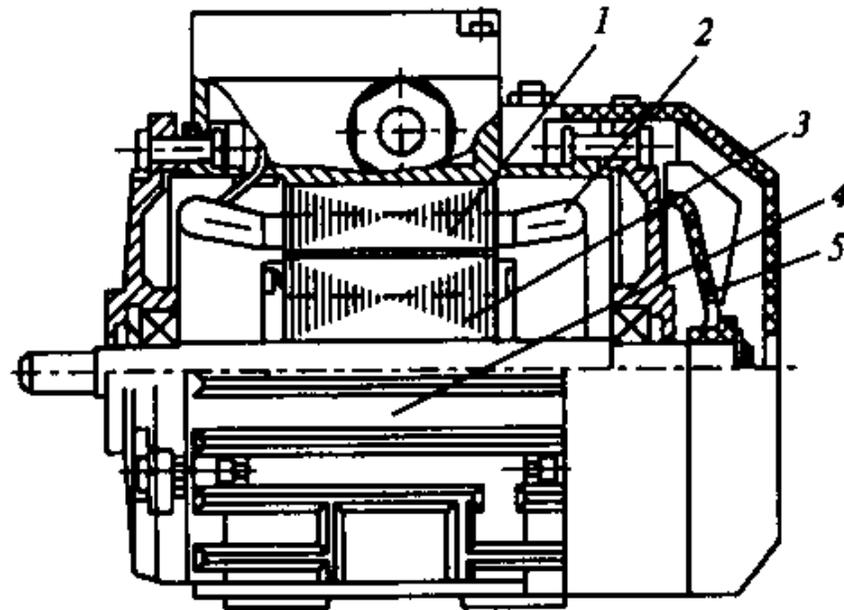
Конструкция АКД мощностью 60...550 Вт аналогична трехфазным АД



# Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

Конструкция АКД мощностью 60...550 Вт аналогична трехфазным АД

- » в пазах сердечника статора 1 – две обмотки 2, сдвинутые на  $\pi/2$
- » обмотки статора – однослойные концентрические
- » на роторе 3 – КЗ обмотка  $A_l$  со скосом пазов на  $t_{z1}$
- » корпус 4 – алюминиевый оребренный
- » на валу – пластмассовый вентилятор 5

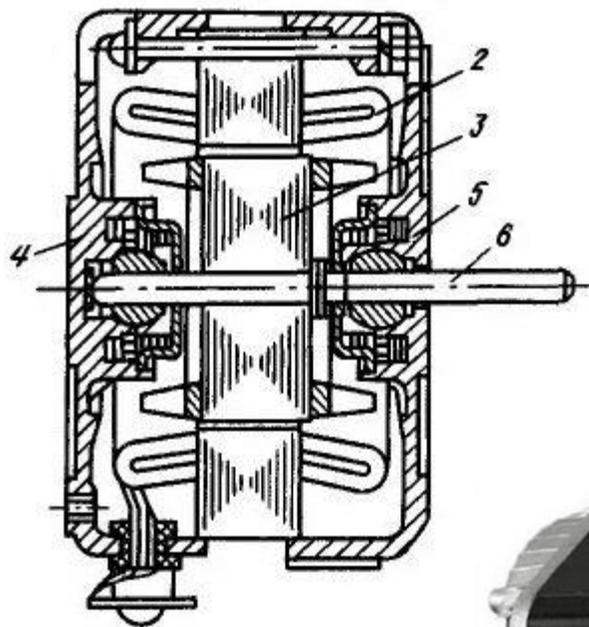


# Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

Двигатели меньшей мощности – открытые с самовентиляцией  
(для бытовых устройств)

АКД серии КД

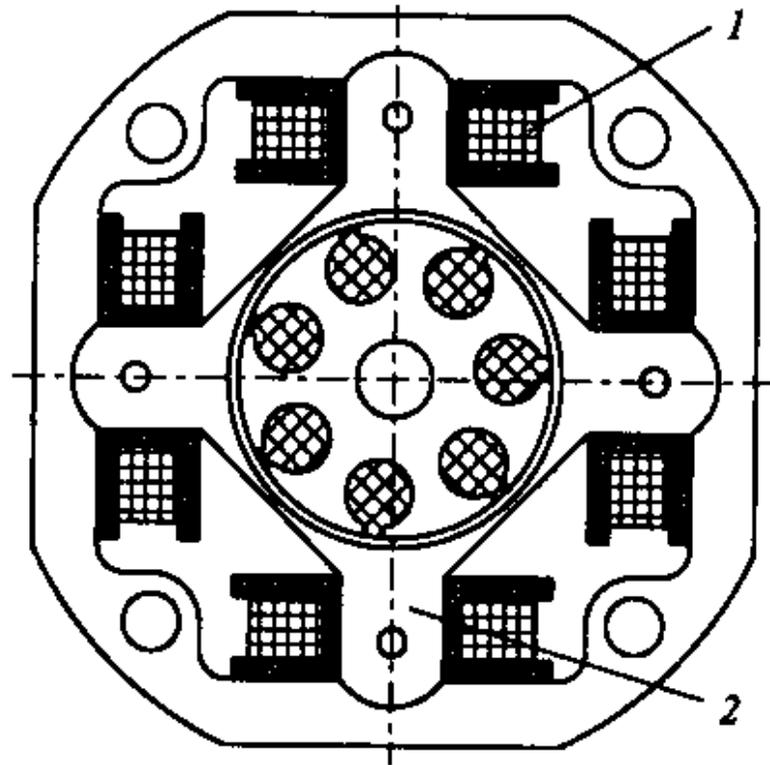
- » Двухфазная обмотка статора – однослойная катушечная
- » Обмотка ротора – короткозамкнутая
- » Подшипники скольжения – металлокерамика



# Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

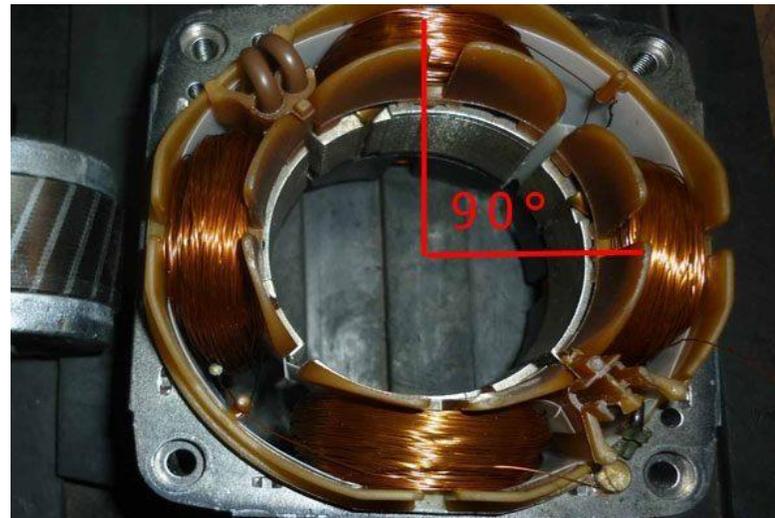
АКД мощностью < 25 Вт:

сосредоточенные обмотки на явно выраженных полюсах (для простоты)



АКД серии ДКВ:

- » Каждая фаза статора содержит две катушки 1, расположенные на противоположных полюсах 2

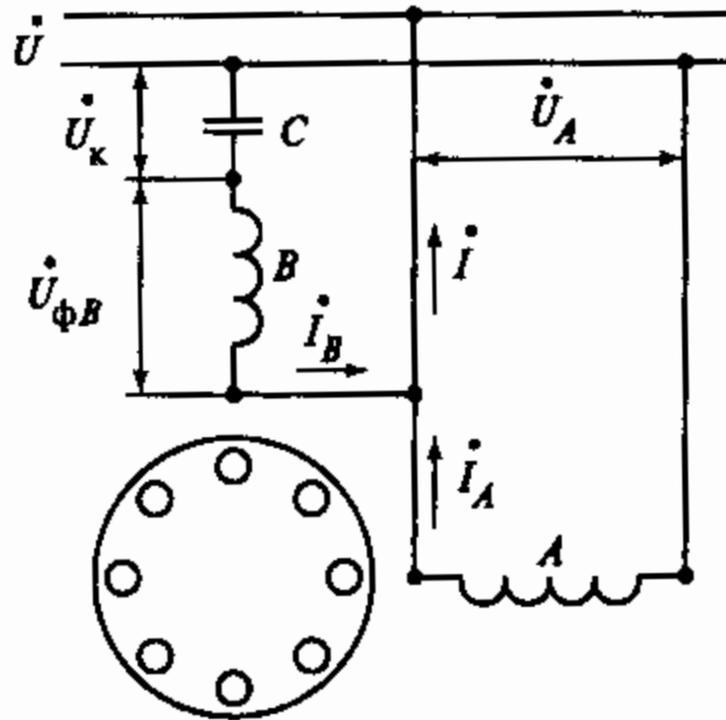


ЭМАУ

Ширинский С.В., каф.ЭМЭА, НИУ «МЭИ»

# Двигатель с рабочим конденсатором

Применяют в случаях, когда требуются высокие энергетические показатели ( $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ), а пусковой момент невелик (для длительной работы)



Расчет: выражения для симметричных составляющих тока (из уравнений двухфазной несимметричной машины)

Здесь можно принять  $U_A = U_B = U$ ;  $Z_{B1} = k^2 Z_{A1} + Z_C$ ;  $Z_{B2} = k^2 Z_{A2} + Z_C$

Тогда

$$i_{A1} = \dot{U} \frac{kZ_{A2}(k-j) + Z_C}{2k^2 Z_{A1} Z_{A2} + Z_C(Z_{A1} + Z_{A2})}$$

$$i_{A2} = \dot{U} \frac{kZ_{A1}(k+j) + Z_C}{2k^2 Z_{A1} Z_{A2} + Z_C(Z_{A1} + Z_{A2})}$$

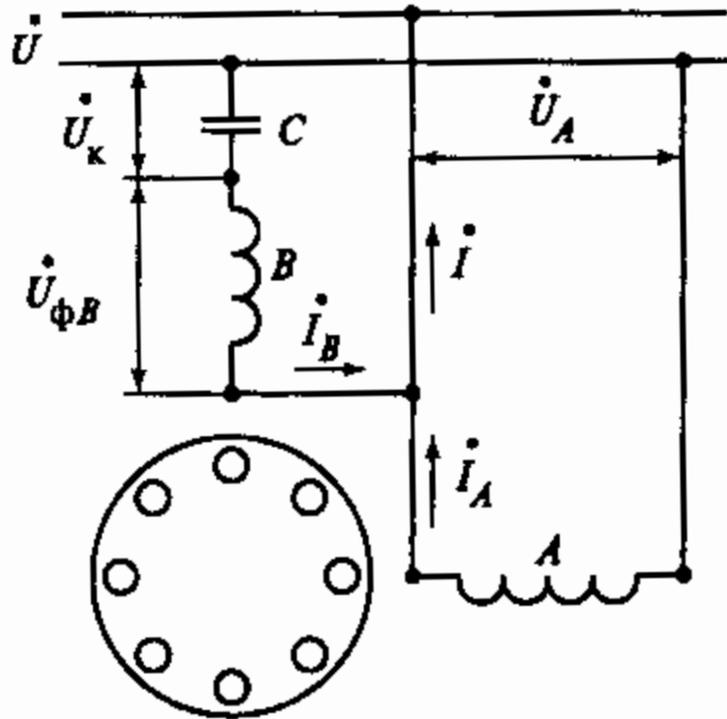
Здесь  $Z_C = -jx_C$

# Двигатель с рабочим конденсатором

Для получения кругового поля надо обеспечить  $I_{A2} = 0$

Т.е. надо обеспечить нулевые значения Re и Im числителя выражения для  $I_{A2}$

$$\begin{cases} k^2 r_{A1} - k x_{A1} = 0 \\ k^2 x_{A1} - x_C + k r_{A1} = 0 \end{cases}$$



Условия получения кругового поля в АКД

$$\begin{cases} k = \frac{x_{A1}}{r_{A1}} \\ x_C = k r_{A1} + k^2 x_{A1} \end{cases}$$

где  $k = w_B/w_A$

Емкость конденсатора в мкФ  $C = \frac{10^6}{2\pi f x_C}$

Можно заметить:  $x_C = k r_{A1} + k^2 x_{A1} = x_{A1} + x_{B1}$

»  $x_C$  должно быть равно сумме полных реактивных сопротивлений фаз

Кроме того:  $k = \frac{x_{A1}}{r_{A1}} = \operatorname{tg} \varphi_A$  и  $x_C = k r_{A1} + k^2 x_{A1} = x_{A1} + \operatorname{tg}^2 \varphi_A x_{A1}$

» требуемые значения  $k$  и  $x_C$  зависят от  $\varphi_A$  – угла между  $U_A$  и  $I_A$

» при изменении нагрузки изменяется угол  $\varphi_A$  (и  $\cos \varphi_A$ )

» поскольку  $k$  регулировать нельзя, то в АКД можно получить круговое поле только для одного режима работы (когда  $\operatorname{tg} \varphi_A = k$ )

» при других режимах работы (нагрузках) поле будет эллиптическим

# Векторная диаграмма АКД (при круговом поле)

Уравнения АКД

$$\dot{U} = \dot{U}_A = \dot{U}_B$$

$$\dot{I}_A r_{A1} + j\dot{I}_A x_{A1} = \dot{U}_A$$

$$\dot{I}_B r_{B1} + j\dot{I}_B x_{B1} - j\dot{I}_B x_C = \dot{U}_B$$

$$(\dot{U}_{\phi B} - \dot{U}_K = \dot{U}_B)$$

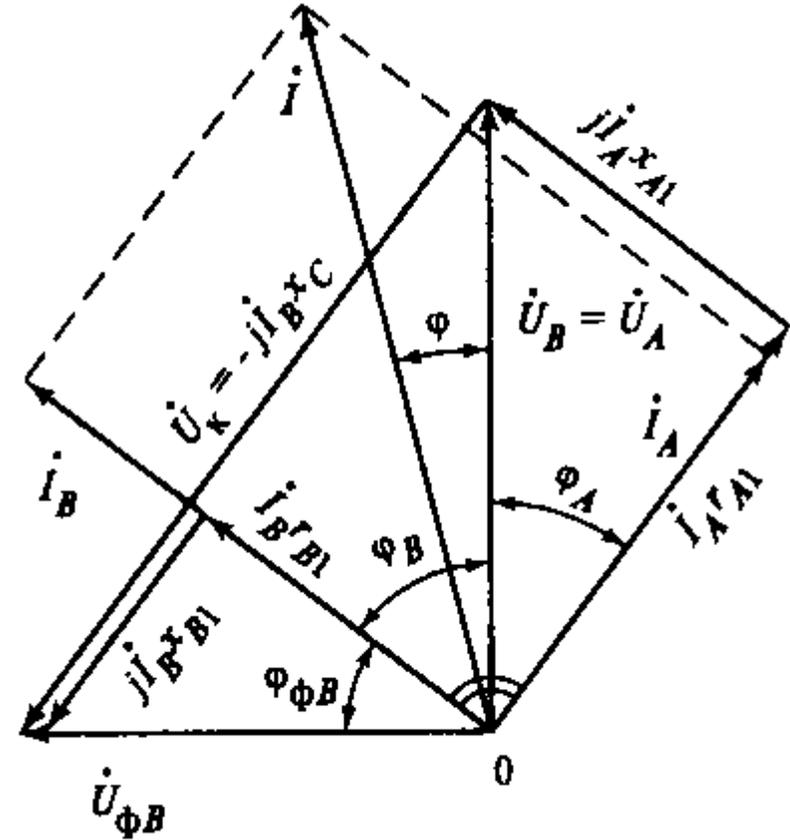
$$\dot{I}_A + \dot{I}_B = \dot{I}$$

При круговом поле  $\dot{I}_B = \dot{I}_{B1} = j \frac{\dot{I}_{A1}}{k} = j \frac{\dot{I}_A}{k}$

$$\dot{U}_{\phi B} = j\dot{U}_A k$$

Напряжение на конденсаторе  $U_K = \sqrt{U^2 + U_{\phi B}^2} = U \sqrt{1 + k^2}$

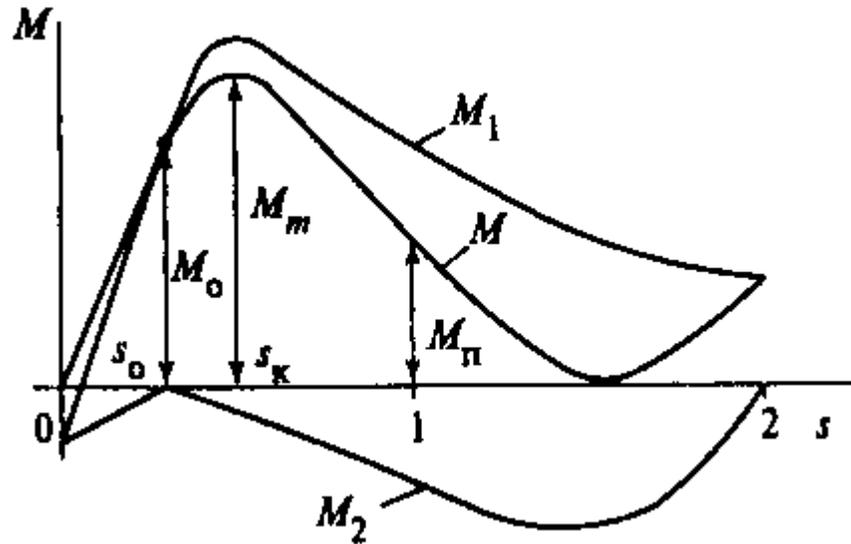
- »  $U_K$  всегда больше  $U$  сети и увеличивается с ростом  $k$
- » надо это учитывать при выборе конденсатора



# Механическая характеристика АКД

Пусть круговое поле обеспечивается при скольжении  $s_0$

- » при  $s_0$  обратной последовательности нет ( $M_2 = 0$ ), поле круговое
- » при других  $s$  поле эллиптическое ( $M = M_1 + M_2$ )



Обычно проектируют АКД так, чтобы  $s_0 = s_H$   
(круговое поле в номинальном режиме работы)

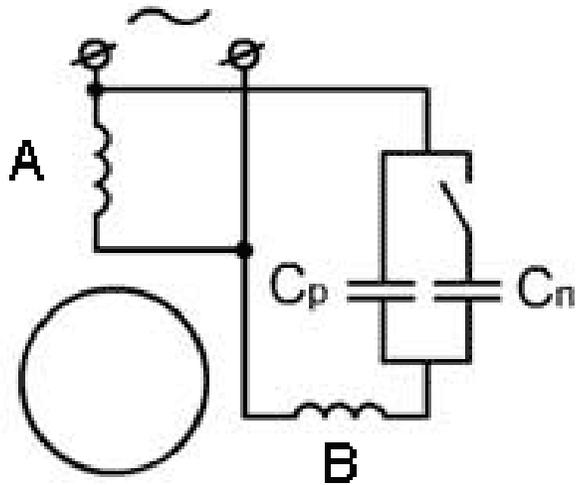
При этом АКД имеет хорошие рабочие свойства  
 $\eta = 0,5 \dots 0,8$   $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,95$   $M_m = (1,8 \dots 2,2)M_H$

Но небольшой пусковой момент

$$M_{II} = (0,3 \dots 0,5)M_H$$

# Двигатель с пусковым и рабочим конденсатором

Один из способов повышения  $M_{II}$  – включение на время пуска пускового конденсатора (параллельно рабочему конденсатору)



Величину  $x_{C_{II}}$  выбирают так, чтобы совместно с  $x_{C_p}$  получить требуемый  $M_{II}$  (или круговое поле)

В таких двигателях  $M_{II} = (2,0 \dots 2,5)M_H$

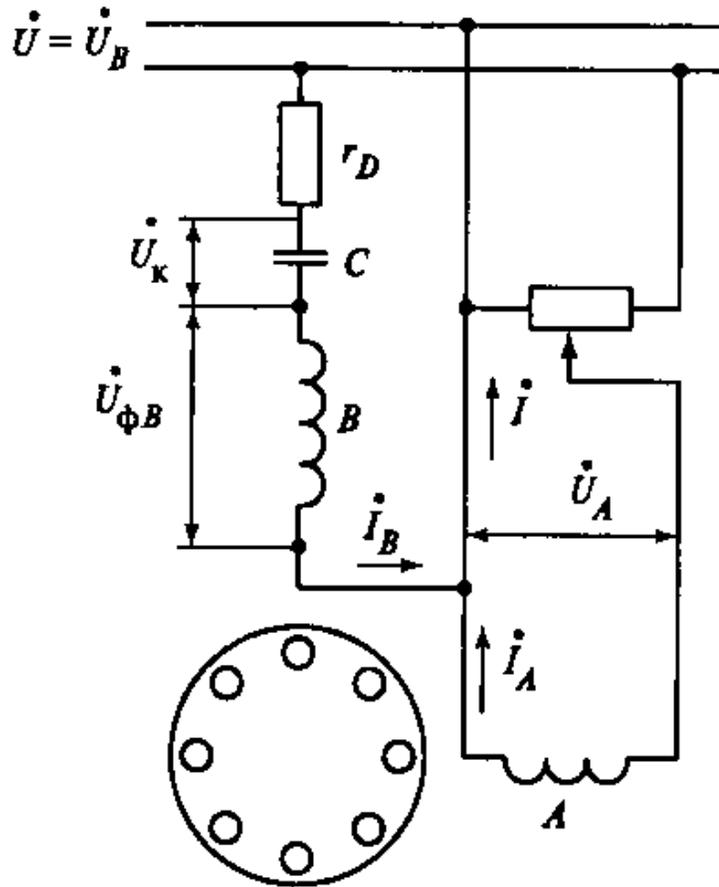


Другой способ повышения  $M_{II}$  – получение кругового поля при  $s_0 > s_H$

При этом ухудшаются рабочие свойства

# Конденсаторный двигатель с предвключенными элементами

Если имеется готовый двигатель ( $k$  изменить нельзя), для получения кругового поля можно подобрать параметры дополнительных элементов ( $C$ ,  $r_D$  и  $\alpha$ )



Здесь  $\alpha$  – коэффициент сигнала ( $U_A = \alpha U$ )

Симметричные составляющие тока получим из уравнений 2-фазного АД принимая  $Z_{B1} = k^2 Z_{A1} - jx_C + r_D$ ,  $Z_{B2} = k^2 Z_{A2} - jx_C + r_D$  и  $U_A = \alpha U$ ,  $U_B = U$

$$i_{A1} = \dot{U} \frac{\alpha(k^2 Z_{A2} - jx_C + r_D) - jk Z_{A2}}{Z_{A1}(k^2 Z_{A2} - jx_C + r_D) + Z_{A2}(k^2 Z_{A1} - jx_C + r_D)}$$

$$i_{A2} = \dot{U} \frac{\alpha(k^2 Z_{A1} - jx_C + r_D) + jk Z_{A1}}{Z_{A1}(k^2 Z_{A2} - jx_C + r_D) + Z_{A2}(k^2 Z_{A1} - jx_C + r_D)}$$

Полагая  $I_{A2} = 0$  запишем общие условия получения кругового поля

$$\begin{cases} k^2 r_{A1} - \frac{k x_{A1}}{\alpha} + r_D = 0 \\ -\frac{k r_{A1}}{\alpha} - k^2 x_{A1} + x_C = 0 \end{cases}$$

Здесь 3 переменные в 2-х уравнениях, надо чем-то задаваться

# Конденсаторный двигатель с предвключенными элементами

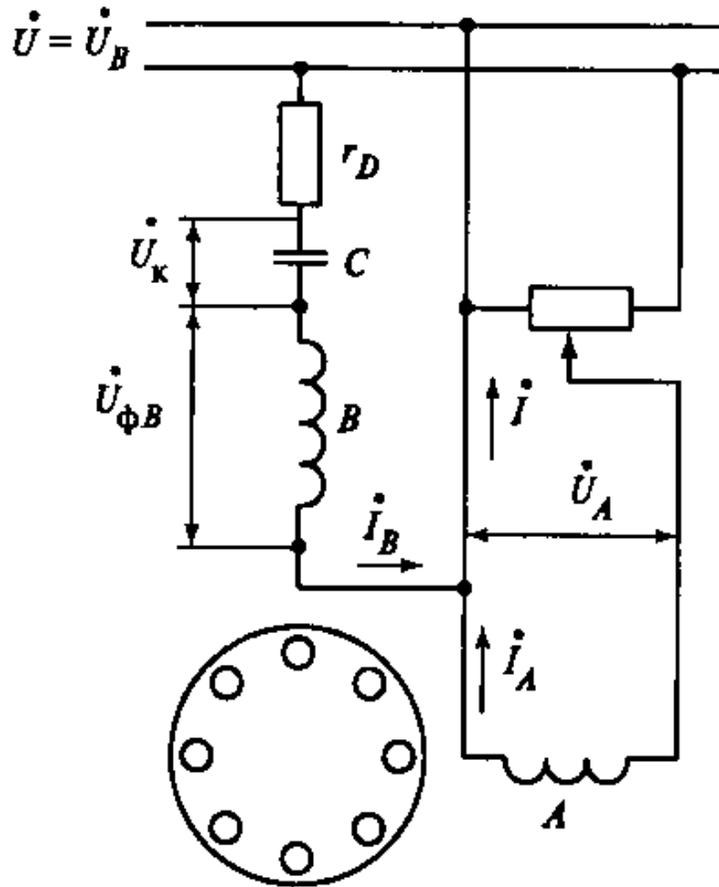
На практике применяют следующие варианты

**Вариант 1.** Выбор  $x_C$  и коэффициента сигнала  $\alpha$  (полагая  $r_D = 0$ )

При  $r_D = 0$  условия получения кругового поля запишем как

$$\begin{cases} \alpha = \frac{x_{A1}}{k r_{A1}} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_A}{k} \\ x_C = \frac{k r_{A1}}{\alpha} + k^2 x_{A1} = \frac{x_{A1}}{\alpha^2} + x_{\phi B1} \end{cases}$$

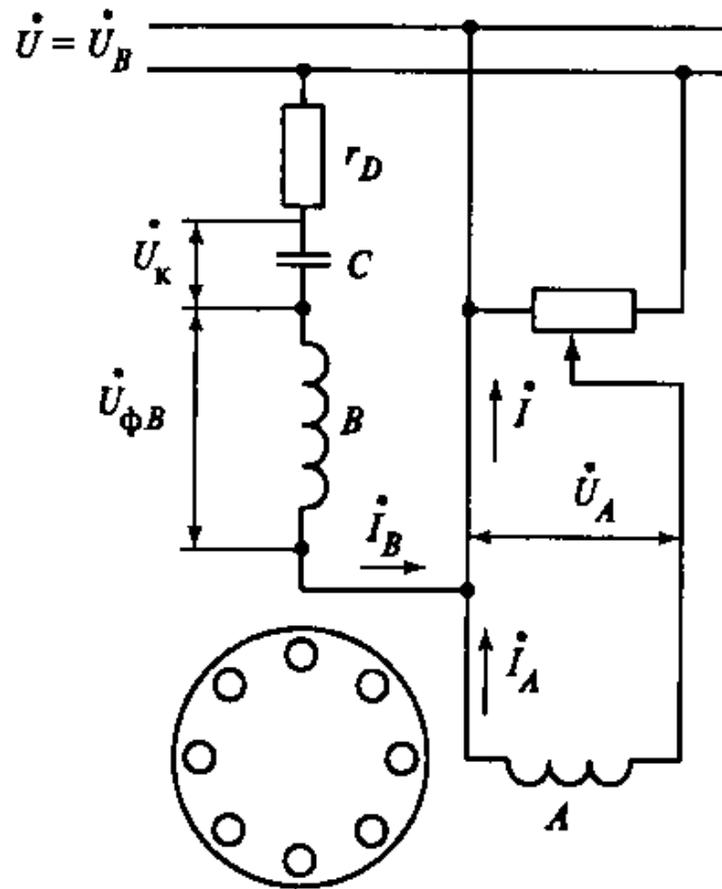
Путем выбора  $\alpha$  и  $x_C$  можно получить круговое поле в АКД с заданным  $k$  в любом режиме работы  
(ограничение – напряжение на конденсаторе)



# Конденсаторный двигатель с предвключенными элементами

На практике применяют следующие варианты

**Вариант 2.** Выбор  $x_C$  и добавочного резистора  $r_D$  (полагая  $\alpha = 1$ , т.е.  $U_A = U$ )



При  $\alpha = 1$  условия получения кругового поля запишем как

$$\begin{cases} r_D = k x_{A1} - k^2 r_{A1} \\ x_C = k r_{A1} + k^2 x_{A1} \end{cases}$$

Недостатки этого варианта

- » дополнительные потери мощности в  $r_D$
- » ограниченное применение

Заметим, что  $r_D = k x_{A1} - k^2 r_{A1} = k Z_{A1} \sin \varphi_A - k^2 Z_{A1} \cos \varphi_A = k Z_{A1} \cos \varphi_A (\operatorname{tg} \varphi_A - k)$

Для получения  $r_D > 0$  необходимо соблюдение условия  $(\operatorname{tg} \varphi_A - k) > 0$

Т.е. этот вариант пригоден лишь для режимов работы, когда  $\operatorname{tg} \varphi_A > k = \frac{w_B}{w_A}$

# Определение параметров двигателя

Для выбора  $x_C$ ,  $\alpha$  и  $r_D$  надо знать  $r_A$ ,  $x_A$ ,  $\cos\varphi_A$  и  $\operatorname{tg}\varphi_A$   
(параметры фазы  $A$  и угол  $\varphi_A$  при круговом поле)

- » Если известна геометрия АД и обмоточные данные – можно рассчитать параметры схемы замещения и по ней найти  $r_A$ ,  $x_A$ ,  $\varphi_A$  для любого режима работы (любого  $s$ )
- » Если есть готовый АД – можно определить  $r_A$ ,  $x_A$ ,  $\varphi_A$  экспериментально

**Случай 1.** Требуется получить круговое поле при пуске ( $s = 1$ )

Опыт короткого замыкания:

» на фазу  $A$  подаем напряжение  $U_A$  (при котором будет работать АКД)

» измеряем  $I_A$  и  $P_A$

» рассчитываем  $Z_A = \frac{U_A}{I_A}$      $r_A = \frac{P_A}{I_A^2} = Z_A \cos \varphi_A$      $x_A = \sqrt{Z_A^2 - r_A^2} = Z_A \sin \varphi_A$      $\cos \varphi_A = \frac{P_A}{U_A I_A}$

» Аналогично находим параметры фазы  $B$

# Определение параметров двигателя

**Случай 2.** Требуется получить круговое поле при вращении АД (произвольном  $s$ )

Необходимо провести испытание АД при соответствующей скорости

- » Питание фаз – симметричным двухфазным напряжением  $U_{A2\phi}$ ,  $U_{B2\phi}$ 
  - из трехфазной сети с нулевым проводом:  $U_{A2\phi} = U_{A3\phi}$ ,  $U_{B2\phi} = U_{BC3\phi}$
  - без нулевого провода – можно использовать трехфазный трансформатор

» Напряжения  $U_{A2\phi}$ ,  $U_{B2\phi}$  пропорциональны эффективным числам витков  $\frac{U_{B2\phi}}{U_{A2\phi}} = \frac{w_B}{w_A} = k$

» Напряжение  $U_{A2\phi}$  равно  $U_A$  при работе АКД

» Контроль кругового поля – по соотношению  $U_A/U_B = 1/k$ , либо  $I_A/I_B = k$

» Вращение ротора с соответствующей скоростью (нагрузка)

» Измеряем  $I_A$ ,  $I_B$  и  $P_A$ ,  $P_B$  и рассчитываем  $Z_A$ ,  $r_A$ ,  $x_A$ ,  $\varphi_A$  и  $Z_B$ ,  $r_B$ ,  $x_B$ ,  $\varphi_B$

# Определение параметров двигателя

Если неизвестны числа витков (коэффициент трансформации):

Опыт холостого хода при поочередном питании фаз

- » на фазе  $A$  – напряжение  $U_A$ , фаза  $B$  – отключена, частота вращения близка к  $n_c$ 
  - измеряем ЭДС фазы  $B - E_B$
- » на фазе  $B$  – напряжение  $U_B \approx 1,2E_B$ , фаза  $A$  – отключена, частота вращения близка к  $n_c$ 
  - измеряем ЭДС фазы  $A - E_A$
- » рассчитываем коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_B}{w_A} \approx \sqrt{\frac{U_B E_B}{U_A E_A}}$$

## Пример расчета АКД

Дано: в асинхронном конденсаторном двигателе, подключенном к сети с  $U_H = 220$  В, круговое поле существует при  $s = 0,2$ . При этом  $I_A = 0,57$  А,  $\cos\varphi_A = 0,866$

Найти: ток  $I_B$ ,  $\cos\varphi_B$ , полный потребляемый ток  $I$ , коэффициент трансформации и емкость конденсатора, обеспечивающие круговое поле, напряжение на конденсаторе и напряжение на фазной обмотке  $B$

При круговом поле токи  $I_A$  и  $I_B$  образуют прямую составляющую (нет обратной)  $\rightarrow \varphi_A + \varphi_B = 90^\circ$

$$\cos \varphi_A = 0,866 \rightarrow \varphi_A = -30^\circ, \text{ тогда } \varphi_B = 60^\circ \rightarrow \cos \varphi_B = 0,5$$

Коэффициент трансформации, при котором существует круговое поле

$$k = \frac{x_A}{r_A} = \operatorname{tg} \varphi_A = \operatorname{tg} 30^\circ = 0,577$$

Ток фазы  $B$ , образующий прямую составляющую с током фазы  $A$

$$I_B = \frac{I_A}{k} = \frac{0,57}{0,577} = 0,99 \text{ [А]}$$

## Пример расчета АКД

Дано: в асинхронном конденсаторном двигателе, подключенном к сети с  $U_H = 220$  В, круговое поле существует при  $s = 0,2$ . При этом  $I_A = 0,57$  А,  $\cos\varphi_A = 0,866$

Найти: ток  $I_B$ ,  $\cos\varphi_B$ , полный потребляемый ток  $I$ , коэффициент трансформации и емкость конденсатора, обеспечивающие круговое поле, напряжение на конденсаторе и напряжение на фазной обмотке  $B$

Определим параметры фаз

$$Z_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A} = \frac{220}{0,57 e^{-j30^\circ}} = 386 e^{j30^\circ} [\text{Ом}]$$

$$r_A = Z_A \cos \varphi_A = 386 \cdot 0,866 = 334 [\text{Ом}]$$

$$x_A = Z_A \sin \varphi_A = 386 \cdot 0,5 = 193 [\text{Ом}]$$

$$r_B = r_A k^2 = 334 \cdot 0,577^2 = 111 [\text{Ом}]$$

$$x_B = x_A k^2 = 193 \cdot 0,577^2 = 64 [\text{Ом}]$$

Сопrotивление конденсатора,

при котором существует круговое поле

$$x_C = x_A + x_B = x_A (1 + k^2) = 193 \cdot (1 + 0,577^2) = 257 [\text{Ом}]$$

$$C = \frac{10^6}{x_C \omega} = \frac{10^6}{257 \cdot 2\pi \cdot 50} = 12,4 [\text{мкФ}]$$

Напряжение на фазной обмотке  $B$

$$U_{\phi B} = I_B Z_B = I_B \sqrt{r_B^2 + x_B^2} = 0,99 \sqrt{111^2 + 64^2} = 127 [\text{В}]$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = U \sqrt{1 + k^2} = 220 \sqrt{1 + 0,577^2} = 254 [\text{В}]$$

$$\text{или } U_C = \sqrt{U^2 + U_{\phi B}^2} = \sqrt{220^2 + 127^2} = 254 [\text{В}]$$

$$\text{или } U_C = I_B x_C = 0,99 \cdot 257 = 254 [\text{В}]$$

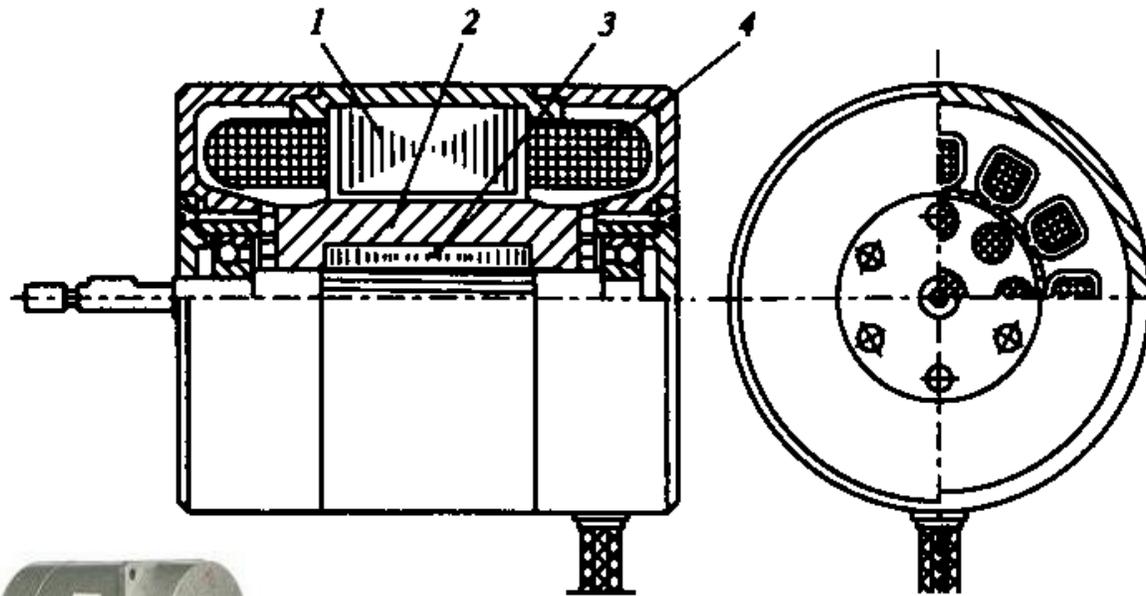
Избыточность – только для примера

# Универсальный асинхронный двигатель (УАД)

# Универсальный асинхронный двигатель

- АД, рассчитанный на работу как от 3-фазных сетей, так и 1-фазных сетей
- » конструкция аналогична 3-фазному АД, но обмоточные данные оптимизированы под 1-фазный режим питания ( $y = 2/3\tau$ )
- » в 1-фазном режиме номинальная мощность УАД  $P_{н1ф} = (70...85)\%$  от  $P_{н3ф}$

Двигатели серии УАД – от 1 до 70 Вт

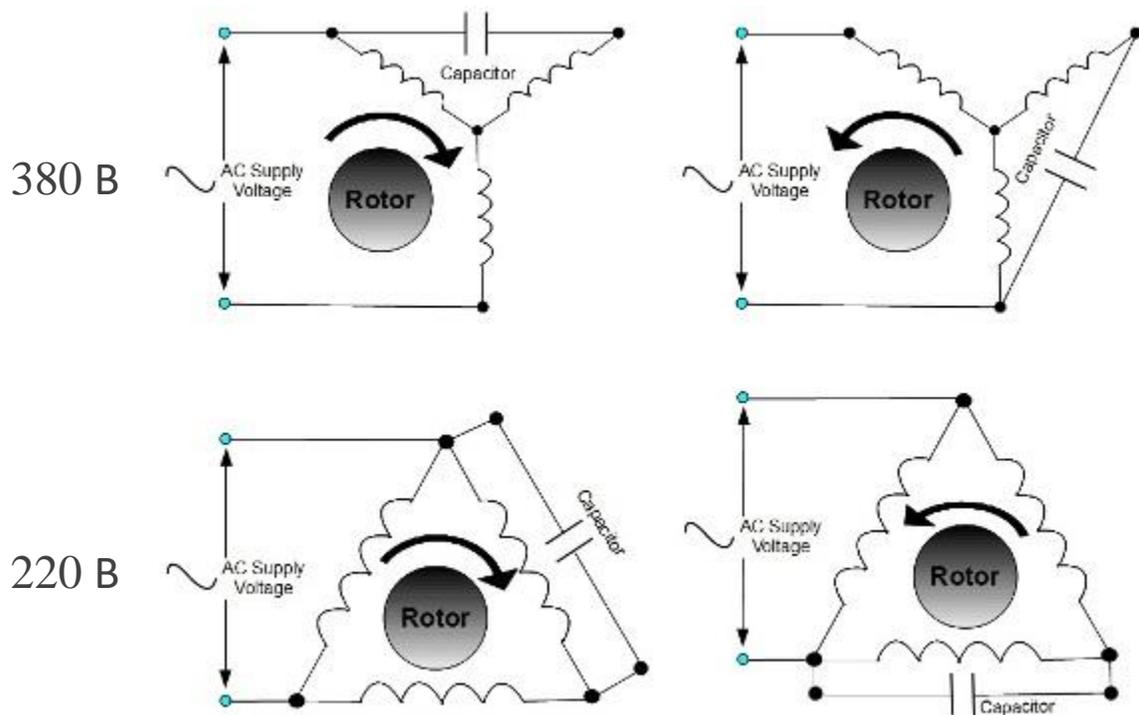


Двигатели 10...500 Вт



# Универсальный асинхронный двигатель

Типичные схемы включения УАД в 1-фазную сеть



Популярные эмпирические формулы расчета емкости рабочего конденсатора

$$C_Y = 2800 \frac{I_H}{U}$$

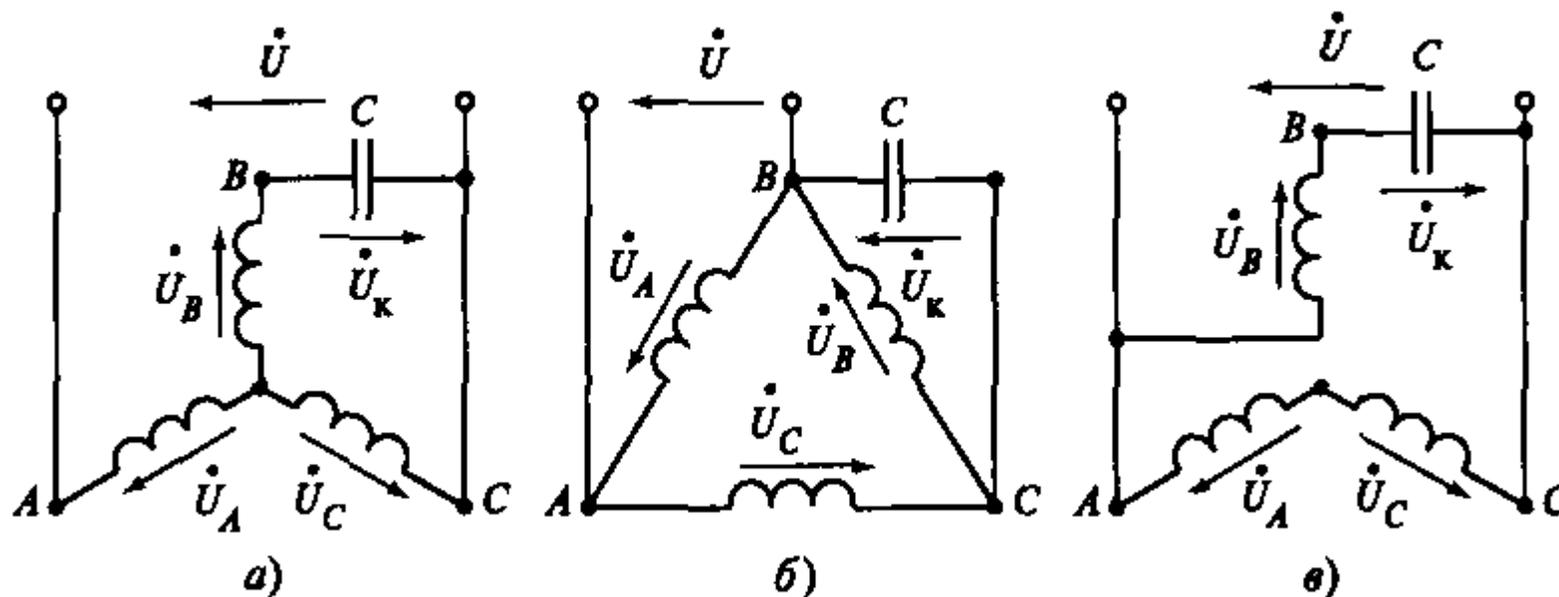
$$C_{\Delta} = 4800 \frac{I_H}{U}$$

$$I_H = \frac{P}{\sqrt{3}U\eta\cos\varphi}$$

Для увеличения  $M_{II}$  включают пусковую емкость  $C_{II} = (2,5 \dots 3) C_p$

# Универсальный асинхронный двигатель

Схемы включения УАД в 1-фазную сеть (Юферов Ф.М., Осин И.Л.)



Эмпирические формулы для выбора рабочей емкости

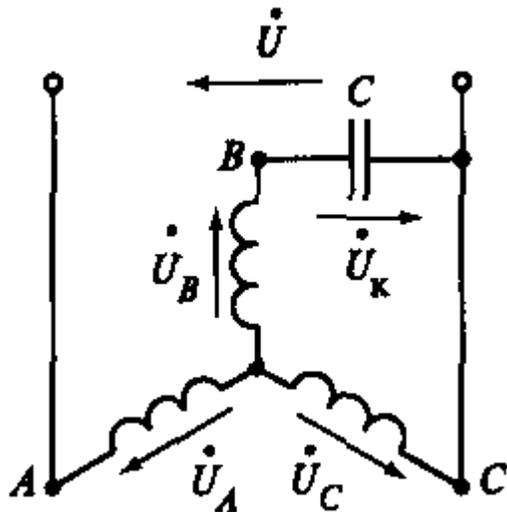
$$C_p \approx 2800 \frac{I_H}{U}$$

$$C_p \approx 4800 \frac{I_H}{U}$$

$$C_p \approx 2740 \frac{I_H}{U}$$

# Универсальный асинхронный двигатель

Расчет: схема (а) – звезда



На основании метода симметричных составляющих:

Токи фаз

$$\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 \quad \dot{I}_K = \dot{I}_B \quad \text{где } a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

Уравнения напряжений

$$\dot{U} - \dot{U}_A + \dot{U}_C = 0$$

$$\dot{U}_A = \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – полные сопротивления фазы токам прямой и обратной последовательности

$$\dot{U}_C - \dot{U}_B - \dot{U}_K = 0$$

$$\dot{U}_B = a^2 \dot{I}_1 Z_1 + a \dot{I}_2 Z_2$$

$$Z_C = -jx_C$$

$$\dot{U}_K = \dot{I}_K Z_C$$

$$\dot{U}_C = a \dot{I}_1 Z_1 + a^2 \dot{I}_2 Z_2$$

Симметричные составляющие тока статора

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{a - a^2} \cdot \frac{(a - a^2)Z_2 + aZ_C}{3Z_1Z_2 + Z_C(Z_1 + Z_2)}$$

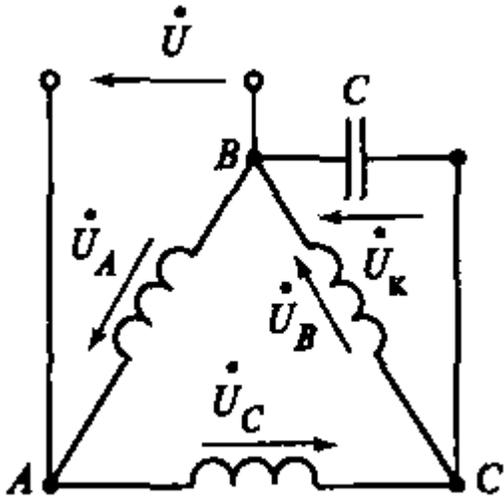
Потребляемый из сети ток  $I = I_A$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{a - a^2} \cdot \frac{(a - a^2)Z_1 - a^2Z_C}{3Z_1Z_2 + Z_C(Z_1 + Z_2)}$$

Здесь круговое поле можно получить только при такой  $n$ , когда  $\cos\varphi_{3\phi} = 0,5$

# Универсальный асинхронный двигатель

Расчет: схема (б) – треугольник



На основании метода симметричных составляющих:

Токи фаз

$$\dot{I} + \dot{I}_A - \dot{I}_C = 0 \quad \dot{I}_C - \dot{I}_B - \dot{I}_K = 0 \quad \dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 \quad \dot{I}_B = a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 \quad \dot{I}_C = a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2$$

Уравнения напряжений

$$\begin{aligned} \dot{U} &= \dot{U}_A & \dot{U}_A &= \dot{I}_1 Z_1 + \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{U}_B &= \dot{U}_K = \dot{I}_K Z_C & \dot{U}_B &= a^2 \dot{I}_1 Z_1 + a \dot{I}_2 Z_2 \\ \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C &= 0 & \dot{U}_C &= a \dot{I}_1 Z_1 + a^2 \dot{I}_2 Z_2 \end{aligned}$$

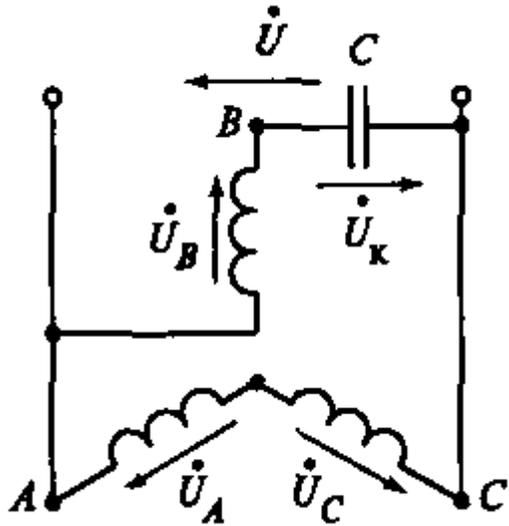
Симметричные составляющие тока статора

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}}{(a-1)} \cdot \frac{(a-1)Z_C + aZ_2}{Z_1 Z_2 + Z_C(Z_1 + Z_2)} \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}}{(a-1)} \cdot \frac{(a-1)Z_C - Z_1}{Z_1 Z_2 + Z_C(Z_1 + Z_2)} \end{aligned}$$

При правильном подборе  $x_C$  здесь можно получить хорошие пусковые и рабочие свойства в однофазном режиме

# Универсальный асинхронный двигатель

Расчет: схема (в) – аналог схемы включения асинхронного конденсаторного двигателя



Аналогия с АКД:

- » к  $U$  параллельно подключены фазы  $B$  и соединенные  $A-C$
- » эквивалентная главная фаза  $AC$  занимает  $2/3$  пазов
- » вспомогательная фаза  $B$  занимает  $1/3$  пазов

Поэтому коэффициент трансформации  $k = w_B / w_{AC} = 1 / \sqrt{3}$

где эффективные числа витков  $w_B = w_\phi$   $w_{AC} = 2w_\phi \frac{\sqrt{3}}{2}$

Симметричные составляющие тока статора – из уравнений АКД

$$\dot{I}_{A1} = \dot{U} \frac{kZ_{A2}(k-j) + Z_C}{2k^2Z_{A1}Z_{A2} + Z_C(Z_{A1} + Z_{A2})}$$

$$\dot{I}_{A2} = \dot{U} \frac{kZ_{A1}(k+j) + Z_C}{2k^2Z_{A1}Z_{A2} + Z_C(Z_{A1} + Z_{A2})}$$

где параметры эквивалентных фаз:

$$r_{SAC} = 2r_S \quad x_{SAC} = 2x_S \quad x_{mAC} = 2x_m$$

$$x_{RAC} = 2x_R \quad r_{RAC} = 2r_R$$

$$r_{SB} = r_S \quad x_{SB} = x_S \quad x_{mB} = \frac{2}{3}x_m$$

$$x_{RB} = \frac{2}{3}x_R \quad r_{RB} = \frac{2}{3}r_R$$

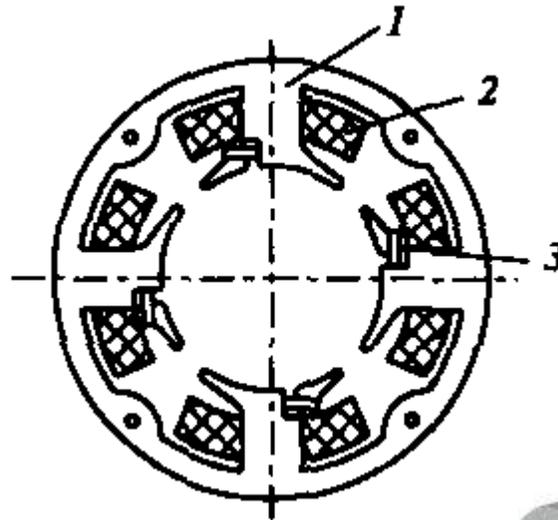
Здесь круговое поле можно получить только при такой  $n$ , когда  $\cos\varphi_{3\phi} = \sqrt{3}/2$

# Асинхронные двигатели с экранированными полюсами (АДЭП)

# Асинхронные двигатели с экранированными полюсами

также Двигатель с КЗ витком, Shaded pole IM

- » самая простая и дешевая конструкция однофазного двигателя
- » массовое применение – приводы малой мощности с легкими условиями пуска



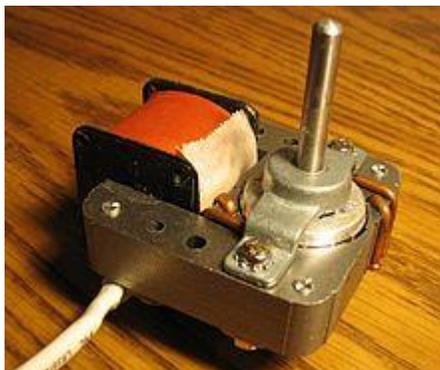
1 – явно выраженные полюсы

2 – катушки 1-фазной ОБ

3 – КЗ виток вокруг части полюса

Чередующаяся полярность полюсов

Ротор – обычный с КЗ обмоткой

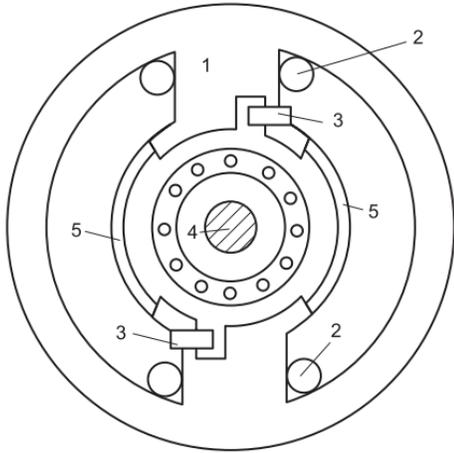


ЭМАУ

Ширинский С.В., каф.ЭМЭА, НИУ «МЭИ»

# Особенности конструкции АДЭП

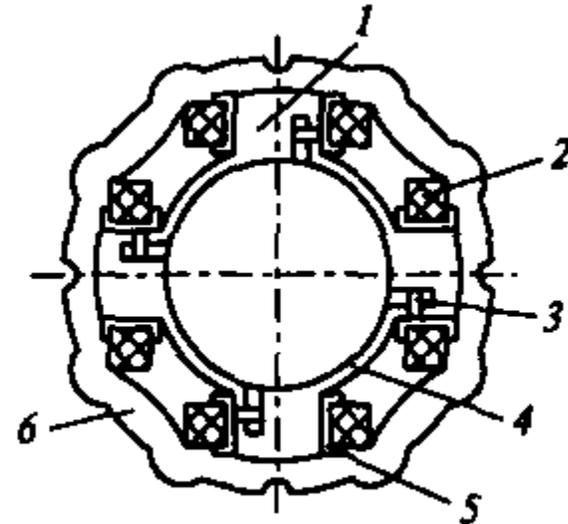
Статор может иметь магнитные шунты между полюсами (узкие – мостики насыщения)



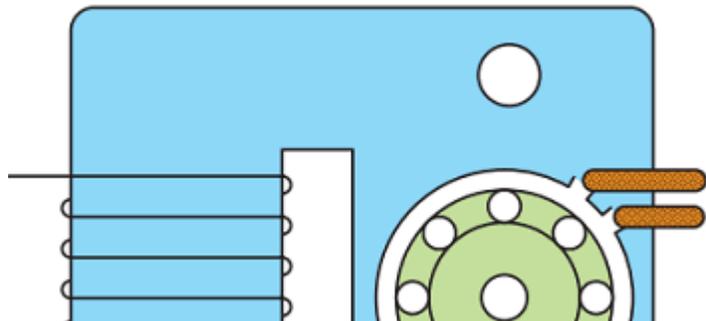
- » «оттягивают» поток к краям полюсов
- » улучшают форму поля в зазоре
- » уменьшается число высших гармоник поля
- » увеличивается момент

Иногда статор с магнитными шунтами делают составным

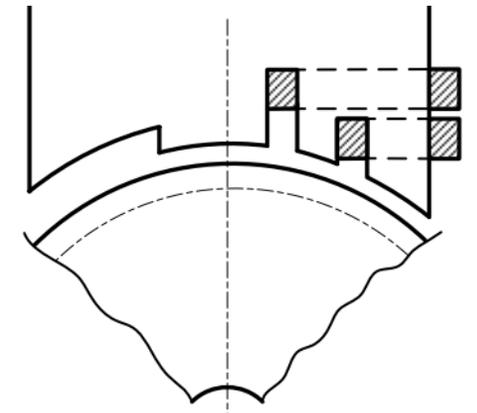
- » 5 – внутренняя крестовина
- » 6 – внешнее ярмо (технологичность)



АДЭП может иметь несколько КЗ витков – несколько экранированных частей полюса

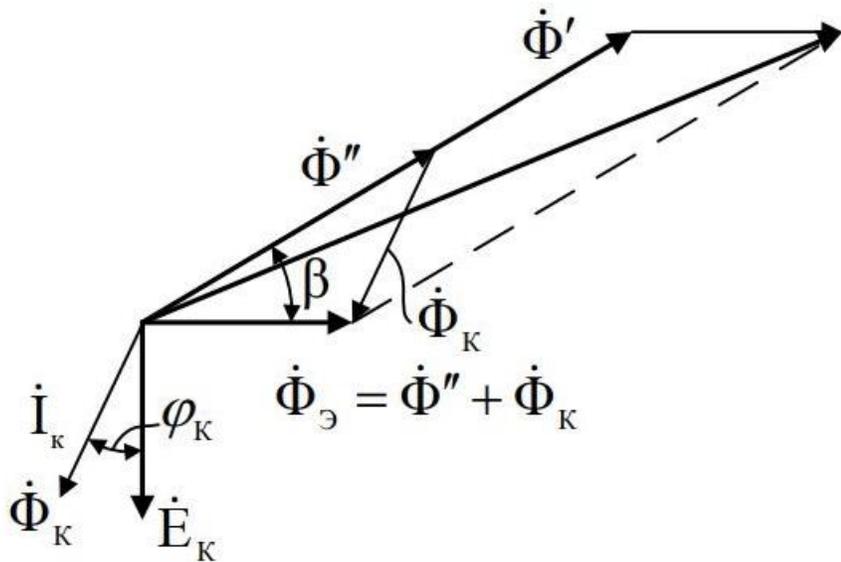
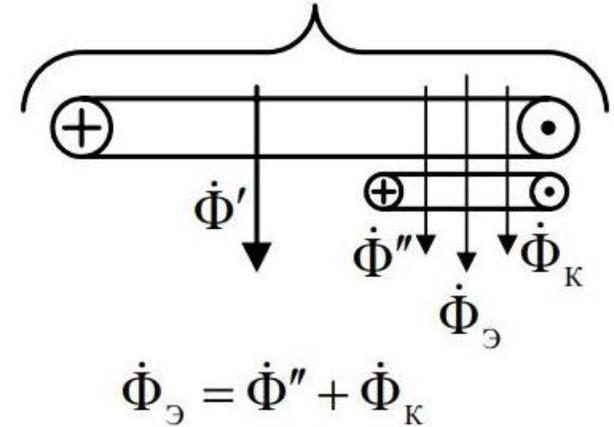


Это улучшает форму поля, как и ступенчатый зазор под неэкранированной частью полюса



# Принцип действия АДЭП

- » однофазная ОВ создает пульсирующий поток  $\dot{\Phi}$
- » часть потока  $\dot{\Phi}'$  - через неэкранированную часть полюса (неизменно)
- » часть потока  $\dot{\Phi}''$  - сцеплена с КЗ витком
- »  $\dot{\Phi}''$  наводит в КЗ витке ЭДС  $E_K$  (отстает на  $\pi/2$  от потока)
- »  $E_K$  создает ток  $I_K$ , отстающий от ЭДС на угол  $\varphi_K$  (из-за индуктивности  $L_K$ )
- »  $I_K$  создает поток  $\dot{\Phi}_K$ , совпадающий по фазе с током  $I_K$
- » т.о. поток экранированной части полюса  $\dot{\Phi}_\Delta = \dot{\Phi}'' + \dot{\Phi}_K$



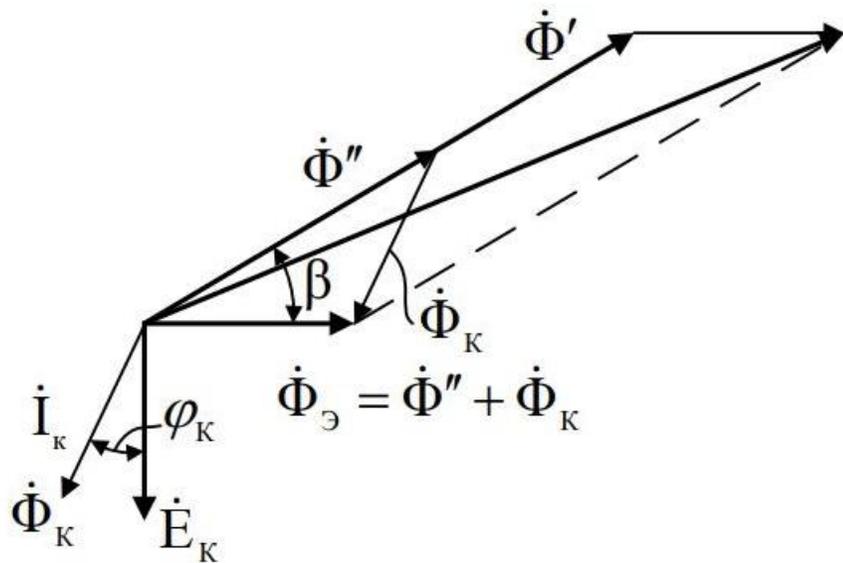
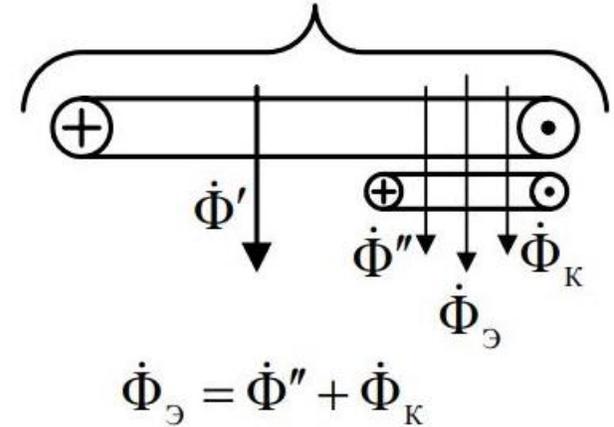
- » поток экранированной части полюса  $\Phi_\Delta$  сдвинут во времени относительно потока неэкранированной части полюса  $\Phi'$  на угол  $\beta$
- » также поток  $\Phi_\Delta$  сдвинут в пространстве относительно  $\Phi'$  на угол  $\theta$
- » два потока, сдвинутые во времени и в пространстве создают вращающееся магнитное поле

# Принцип действия АДЭП

потоки  $\Phi_{\text{э}}$  и  $\Phi'$  неравны, углы сдвига  $\beta$  и  $\theta$  невелики

→ поле не может быть круговым, но и эллиптическое поле вращается

→ создает вращающий момент (в том числе пусковой)



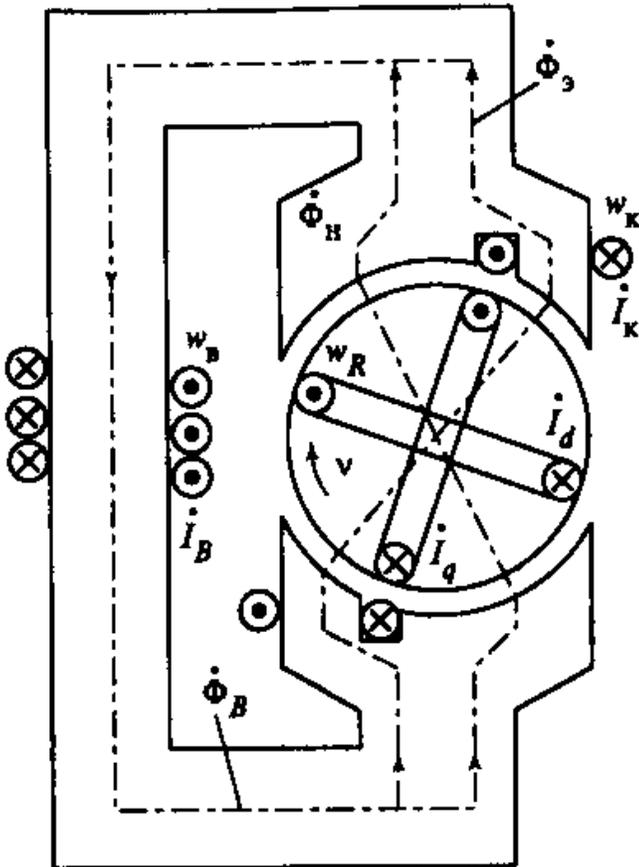
Поле вращается в сторону отстающего потока

→ поле всегда вращается в сторону КЗ витка

→ АДЭП – нереверсируемый двигатель

# Способ расчета АДЭП

Конструкция АДЭП очень проста, тем сложнее построить математическую модель (найти адекватные допущения)



Рассмотрим приближенную математическую модель, принимая во внимание:

- » 2-полюсный АДЭП
- » только основные пространственные гармоники
- » бесконечная магнитная проницаемость стали
- » одна фаза – обмотка возбуждения с  $w_B$
- » вторая фаза – КЗ виток с  $w_K$
- » КЗ обмотка ротора по методу двух реакций – 2 эквивалентные обмотки по осям  $d$  и  $q$  с  $w_R$

Магнитный поток ОВ распределяется по двум контурам

$$\dot{\Phi}_B = \dot{\Phi}_H + \dot{\Phi}_3$$

- »  $\Phi_H$  – поток неэкранированной части полюса
- »  $\Phi_3$  – поток экранированной части полюса

# Способ расчета АДЭП

По закону полного тока для каждого контура замыкания потока

$$\oint Hdl = \sum Iw \rightarrow 2F_{\delta} = \sum Iw \rightarrow 2\Phi / \Lambda_{\delta} = \sum Iw$$

С учетом выбранных положительных направлений токов и потоков запишем

» для потока экранированной части полюса

$$2\dot{\Phi}_{\delta_3} \frac{\delta_3}{\mu_0 S_3} = \sqrt{2} [\dot{I}_B w_B + (\dot{I}_d + \dot{I}_q) w_R + 2\dot{I}_K w_K]$$

» для потока неэкранированной части полюса

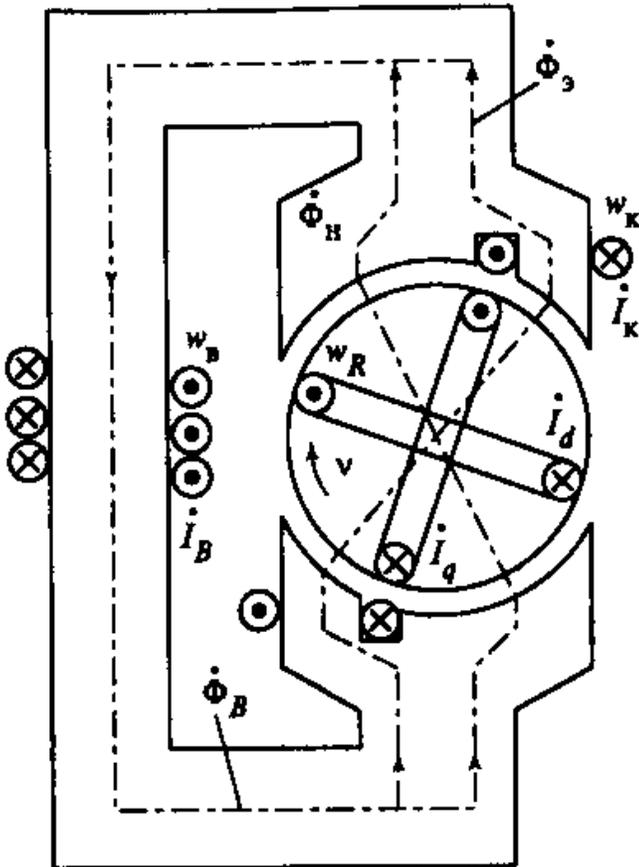
$$2\dot{\Phi}_{\delta_H} \frac{\delta_H}{\mu_0 S_H} = \sqrt{2} [\dot{I}_B w_B + (\dot{I}_d - \dot{I}_q) w_R]$$

Здесь  $\delta_3, \delta_H$  – зазор под соответствующей частью полюса

$S_3, S_H$  – площадь соответствующей части полюса

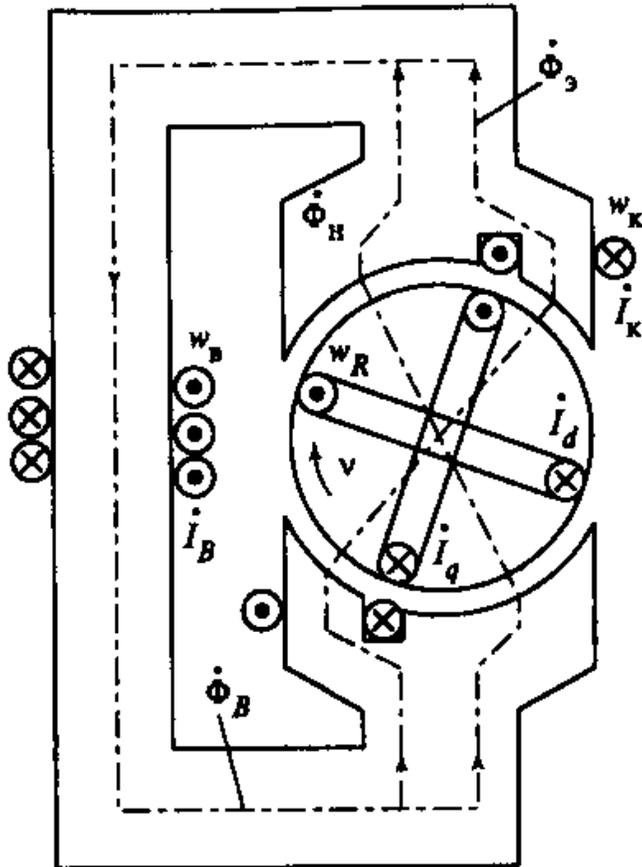
$\mu_0 S/\delta$  – магнитная проводимость зазора

(поток – амплитудное значение, токи, ЭДС и напряжения – действующее значение)



# Способ расчета АДЭП

Выразив потоки, найдем наведенные ЭДС



» Трансформаторные ЭДС в обмотках статора

$$\dot{E}_B = \frac{-j\omega_1 \dot{\Phi}_B w_B}{\sqrt{2}} \quad \dot{E}_K = \frac{-j\omega_1 \dot{\Phi}_\Sigma w_K}{\sqrt{2}}$$

» Трансформаторные ЭДС в обмотках ротора

$$\dot{E}_d = \frac{-j\omega_1 (\dot{\Phi}_\Sigma + \dot{\Phi}_H) w_R}{\sqrt{2}} \quad \dot{E}_q = \frac{-j\omega_1 (\dot{\Phi}_\Sigma - \dot{\Phi}_H) w_R}{\sqrt{2}}$$

» ЭДС вращения в обмотках ротора:  $+j\nu E_q$  и  $-j\nu E_d$ ,  
где  $\nu = n/n_c$  – относительная скорость ротора

Подставим ЭДС в уравнения равновесия напряжений обмоток

$$\dot{U} = -\dot{E}_B + \dot{I}_B Z_B \quad 0 = \dot{E}_d + j\nu \dot{E}_q - \dot{I}_d Z_R$$

$$0 = \dot{E}_K - \dot{I}_K Z_K \quad 0 = \dot{E}_q - j\nu \dot{E}_d - \dot{I}_q Z_R$$

# Способ расчета АДЭП

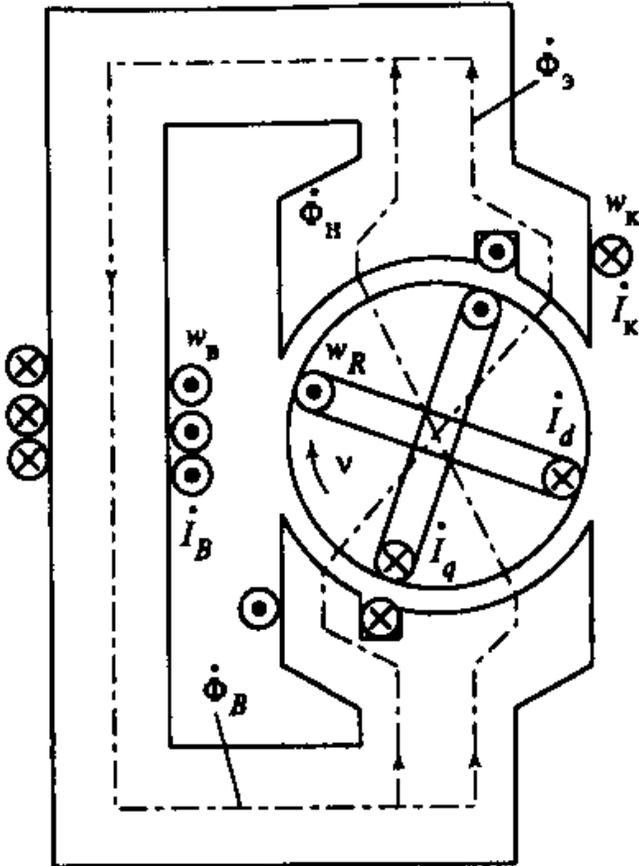
Тогда уравнения равновесия напряжений можно записать в виде

$$\dot{U} = \dot{I}_B (r_B + jx_m) + j\dot{I}'_K 2x_{mK} + j\dot{I}'_d x_m + j\dot{I}'_q x_p$$

$$0 = j\dot{I}_B x_{mK} + \dot{I}'_K (Z'_K + j2x_{mK}) + j\dot{I}'_d x_{mK} + j\dot{I}'_q x_{mK}$$

$$0 = \dot{I}_B (jx_m + vx_p) + \dot{I}'_K (j - v)2x_{mK} + \dot{I}'_d (Z'_R + jx_m - vx_p) + \dot{I}'_q (jx_p - vx_m)$$

$$0 = \dot{I}_B (jx_p + vx_m) + \dot{I}'_K (j + v)2x_{mK} + \dot{I}'_d (jx_p + vx_m) + \dot{I}'_q (Z'_R + jx_m + vx_p)$$



$x_m$  – индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки возбуждения и обмоток ротора

$$x_m = \omega_1 \frac{\mu_0}{2} \left( \frac{S_\partial}{\delta_\partial} + \frac{S_H}{\delta_H} \right) w_B^2$$

$x_{mK}$  – индуктивное сопротивление взаимной индукции КЗ витка и ротора

$$x_{mK} = \omega_1 \frac{\mu_0}{2} \left( \frac{S_\partial}{\delta_\partial} \right) w_B^2$$

$x_p$  – реактивное сопротивление  $x_p = \omega_1 \frac{\mu_0}{2} \left( \frac{S_\partial}{\delta_\partial} - \frac{S_H}{\delta_H} \right) w_B^2$

Приведенные значения токов и параметров обмоток (к числу витков ОВ)

» токи  $\dot{I}'_K = \dot{I}_K \frac{w_K}{w_B}$        $\dot{I}'_d = \dot{I}_d \frac{w_R}{w_B}$        $\dot{I}'_q = \dot{I}_q \frac{w_R}{w_B}$

» полные сопротивления  $Z'_K = 2Z_K \left( \frac{w_B}{w_K} \right)^2$        $Z'_R = Z_R \left( \frac{w_B}{w_R} \right)^2$

# Способ расчета АДЭП

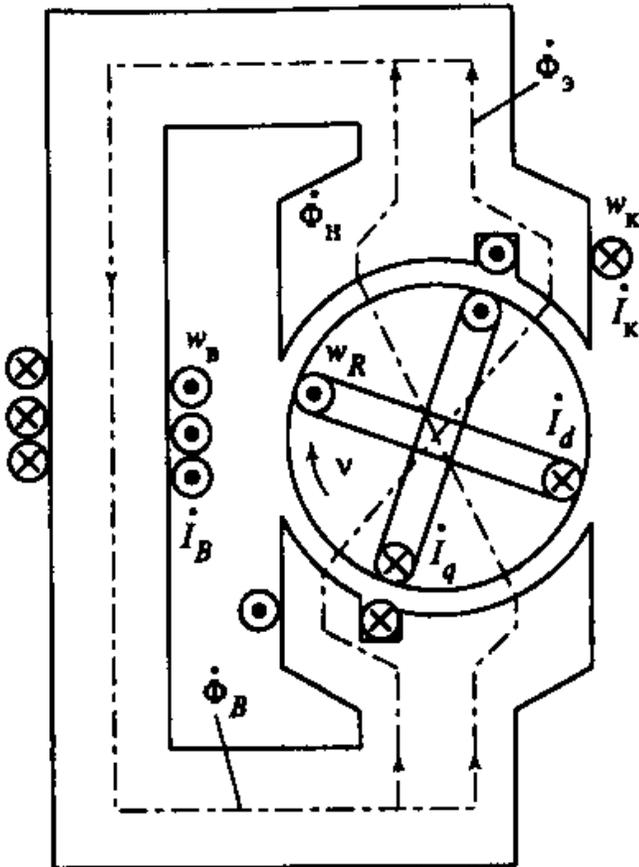
Тогда уравнения равновесия напряжений можно записать в виде

$$\dot{U} = \dot{I}_B (r_B + jx_m) + j\dot{I}'_K 2x_{mK} + j\dot{I}'_d x_m + j\dot{I}'_q x_p$$

$$0 = j\dot{I}_B x_{mK} + \dot{I}'_K (Z'_K + j2x_{mK}) + j\dot{I}'_d x_{mK} + j\dot{I}'_q x_{mK}$$

$$0 = \dot{I}_B (jx_m + vx_p) + \dot{I}'_K (j - v)2x_{mK} + \dot{I}'_d (Z'_R + jx_m - vx_p) + \dot{I}'_q (jx_p - vx_m)$$

$$0 = \dot{I}_B (jx_p + vx_m) + \dot{I}'_K (j + v)2x_{mK} + \dot{I}'_d (jx_p + vx_m) + \dot{I}'_q (Z'_R + jx_m + vx_p)$$



Решая уравнения можно найти токи контуров, электрические потери, электромагнитную мощность и момент (без учета потерь в стали)

Изменяя значение скорости  $v$  от 0 до 1 можно рассчитать характеристики АДЭП

# Механическая характеристика АДЭП

Механическая характеристика АДЭП аналогична несимметричному АД при эллиптическом поле ( $M = M_1 + M_2$ )

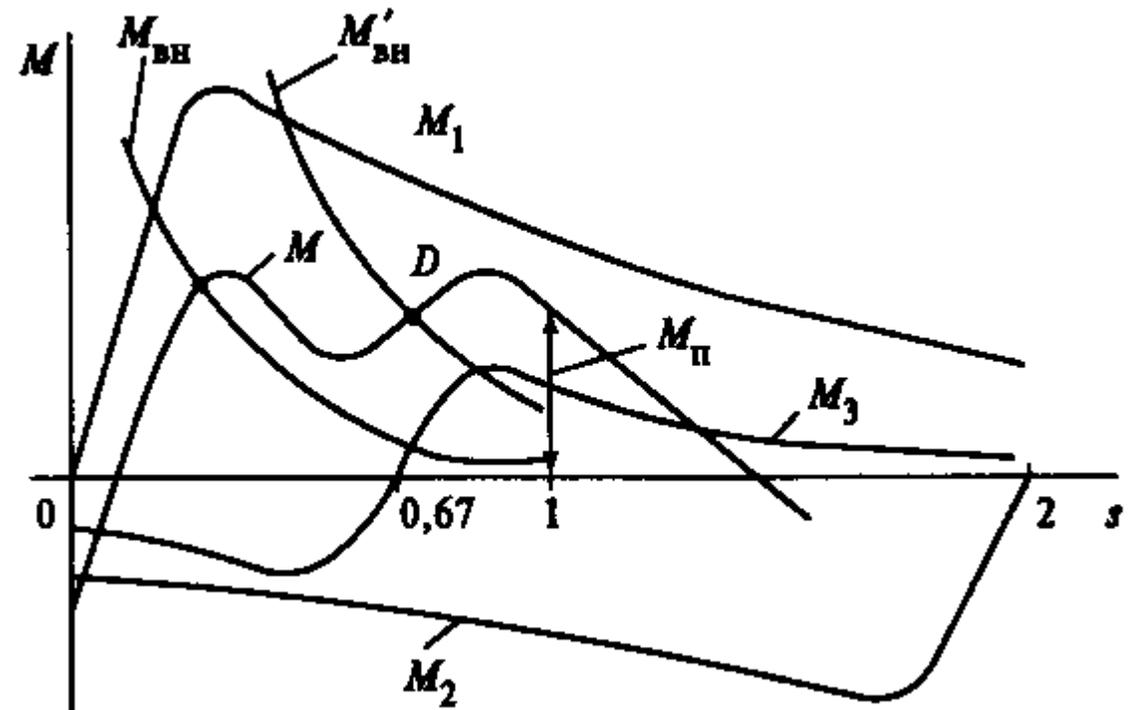
Однако, значительные высшие гармоники (из-за сосредоточенной обмотки) создают моменты, которые вносят искажения в результирующую кривую  $M(s)$

Наибольшее влияние – от 3 гармоники

- » ее  $n_{c3}$  втрое меньше  $n_c \rightarrow$  «провал» при  $s = 0,667$
- » при некоторых нагрузках ( $M'_{вн}$ ) ротор разгоняется лишь до  $n \approx n_c$  (точка  $D$ )
- » хотя при других нагрузках ( $M_{вн}$ ) ротор выходит на обычную  $n$
- »  $M_3$  повышает пусковой момент, но снижает момент при номинальной нагрузке

Магнитные шунты снижают влияние высших гармонических  $\rightarrow$  повышают момент АДЭП

Той же цели служит ступенчатый зазор и применение нескольких КЗ витков



# Механическая характеристика АДЭП

Так как поле резко эллиптическое, то пусковой момент небольшой  $M_{\Pi} = (0,3 \dots 0,6) M_H$

Коэффициент мощности  $\cos\varphi = 0,4 \dots 0,6$

КПД  $\eta = 0,1 \dots 0,3$

Максимальный КПД оказывается при моменте, близком к максимальному

→  $M_H$  выбирают близко к  $M_m$

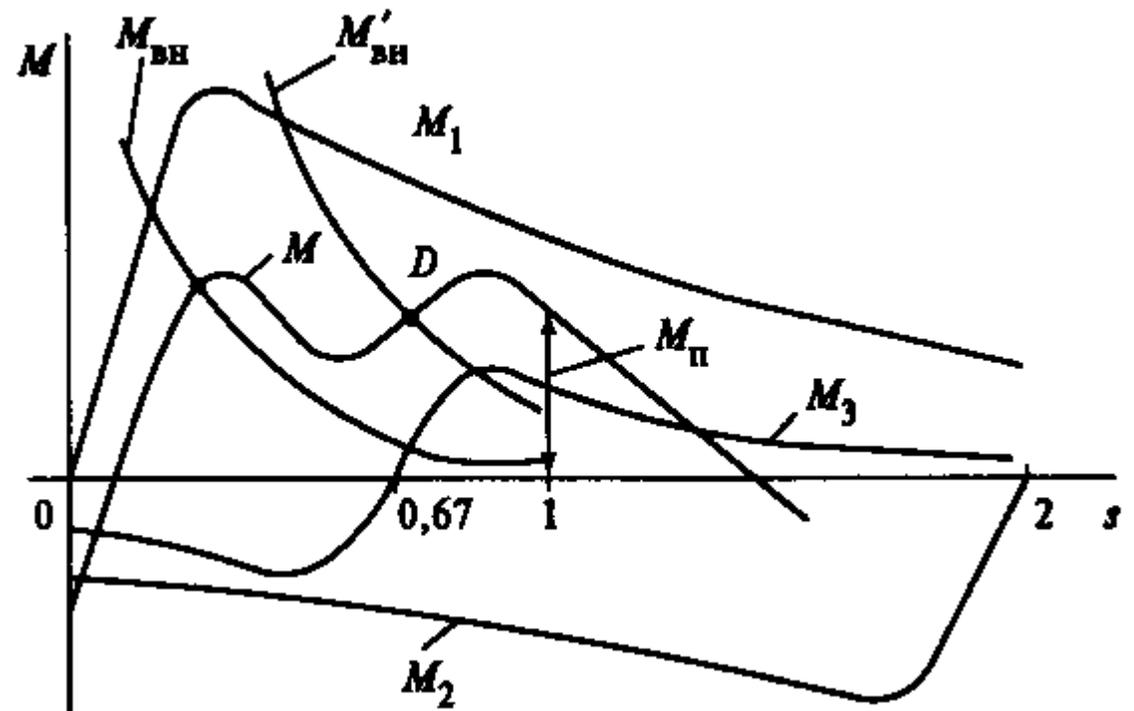
→ перегрузочная способность  $M_m/M_H = 1,1 \dots 1,25$

Потери в КЗ витке велики при любом  $s$

→ при изменении нагрузки от ХХ до КЗ потребляемая мощность  $P_S$  изменяется мало (на 40...50%)

→ пусковой ток мал  $I_{\Pi}/I_H = 1,2 \dots 1,4$

→ АДЭП может долго находиться в режиме КЗ



# Далее

---

## Теория синхронных микромашин

Ширинский С.В.  
каф. ЭМЭЭА, НИУ «МЭИ»

ShirinskiiSV@mpei.ru

<https://e-200.ru/EMAU/>

