

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

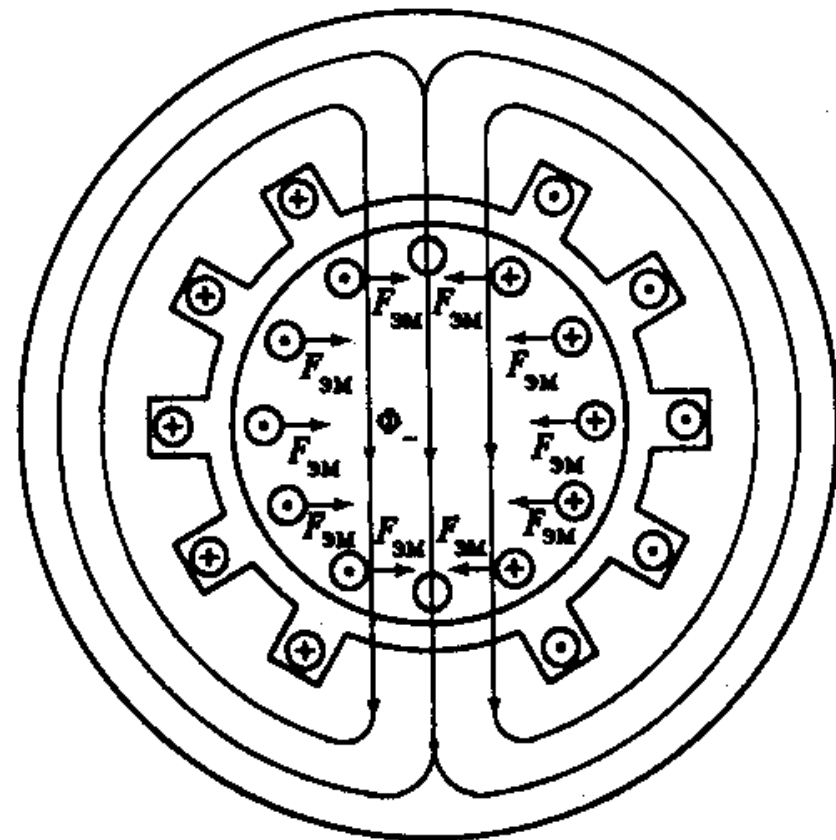
При питании переменным током обмотка статора создает пульсирующее магнитное поле: поток изменяется от $+\Phi_m$ до $-\Phi_m$ вдоль оси обмотки

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 Φ_{S1} → вращающий момент M_1
- » F_2 создает обратное поле Φ_{S2} → тормозной момент M_2

При неподвижном роторе ($s = 1$)

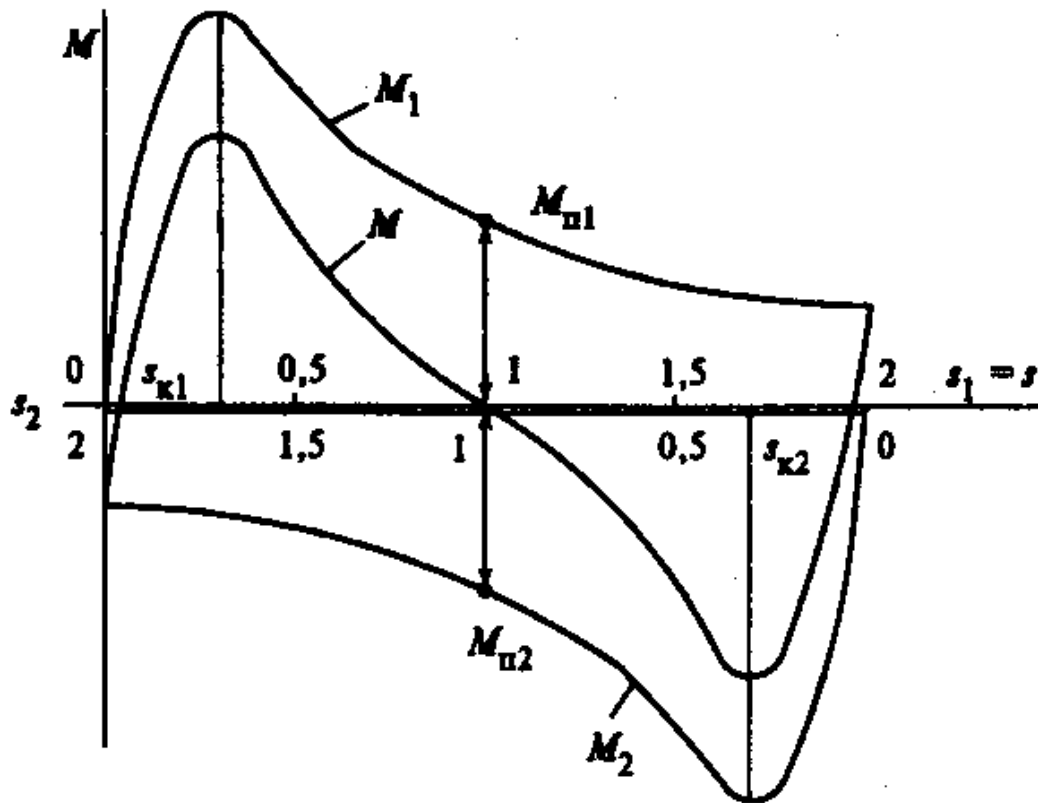
- » скорость каждого поля относительно ротора одинакова → $|M_1| = |M_2|$
- » направление вращения полей противоположно → $M_1 = -M_2$
- » результирующий момент $M_{\Pi} = M_{\Pi1} + M_{\Pi2} = 0$

При вращающемся роторе ($0 < s < 1$)

- » прямое поле Φ_{S1} наводит в роторе ЭДС E_{R1} → ток ротора I_{R1} с частотой $f_{R1} = sf_1$ (f_{R1} стремится к 0)
- » обратное поле Φ_{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 Φ_{R2} направлен против потока статора Φ_{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

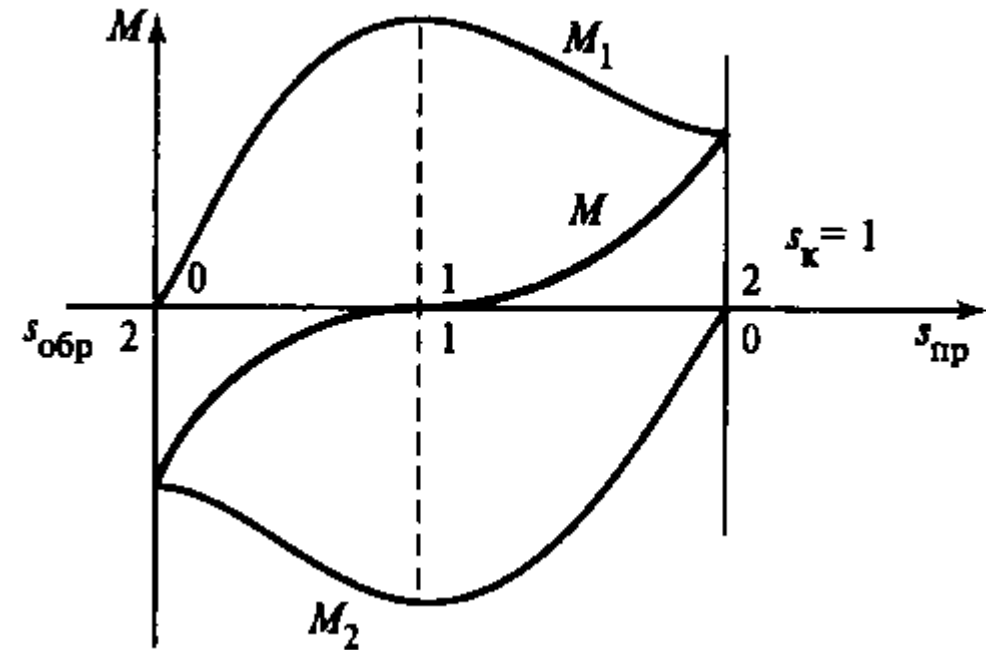
При n_R от 0 до n_c – двигательный режим

При $n_R > n_c$ – генераторный режим

Особенности ОАД

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

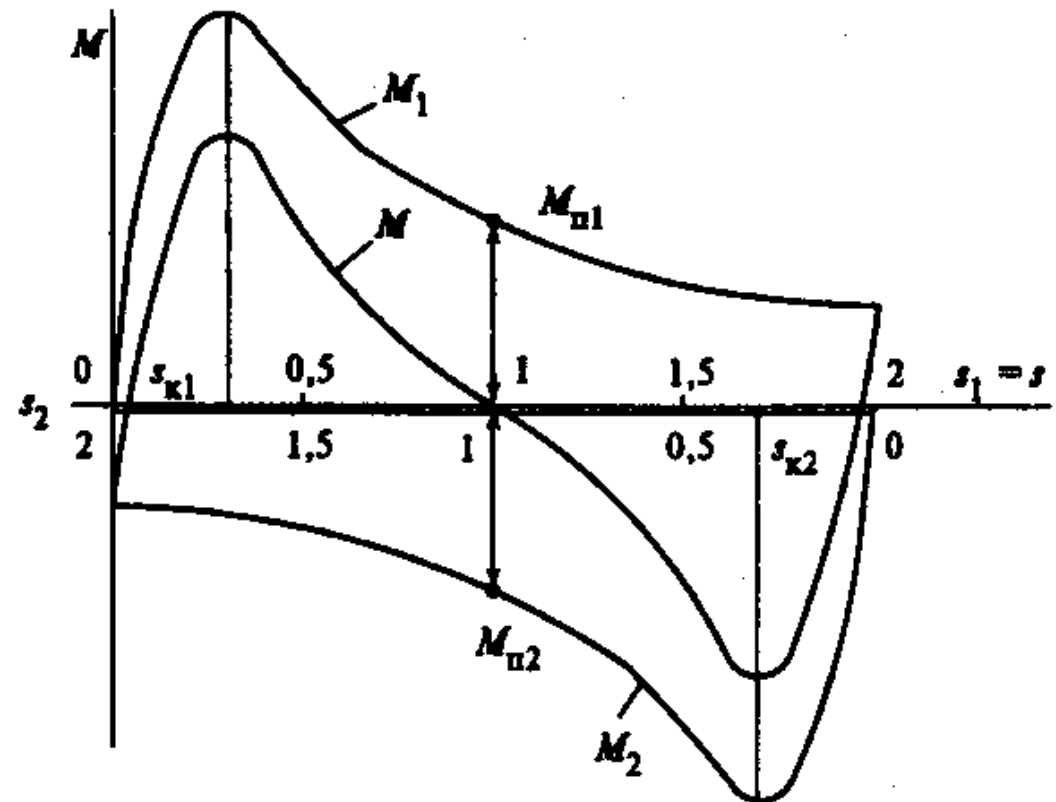
При $s_k > 1$ в однофазном АД
ротор вообще не может вращаться самостоятельно
Такой ОАД имеет только тормозной режим работы
(результрующий момент всегда < 0)



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)

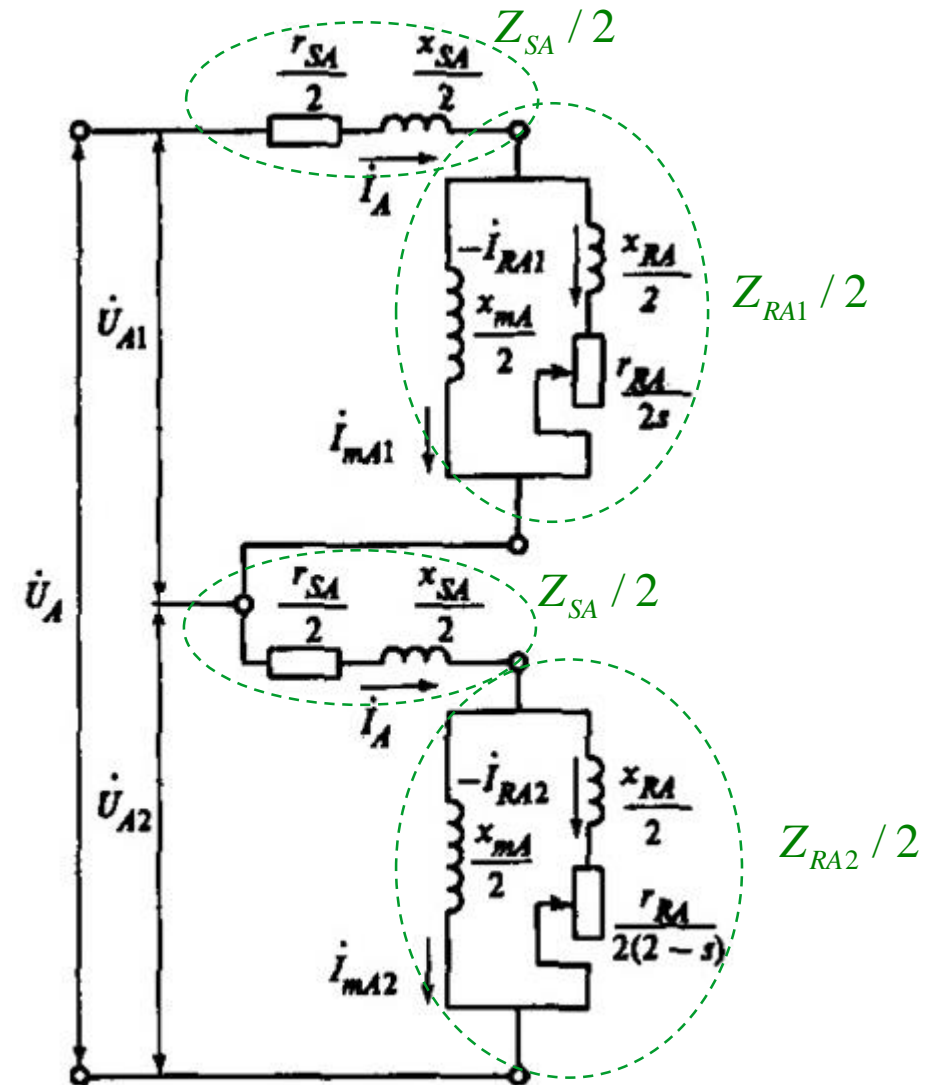
» При пуске ($n_R = 0, s = 1$) $U_{A1} = U_{A2}$

» 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

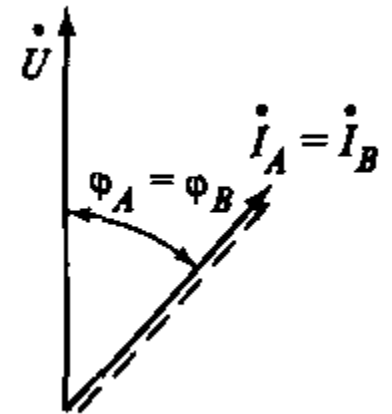
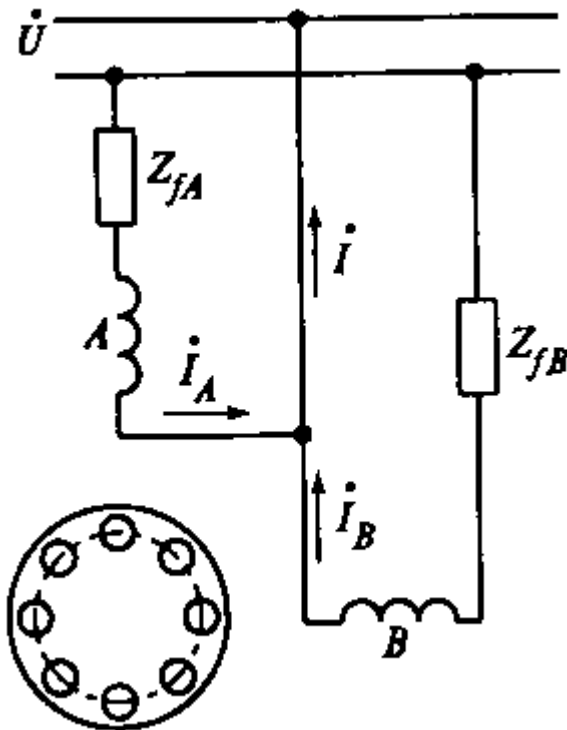
Рассмотрим пуск двухфазного АД с питанием от однофазной сети

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 ($Z_{fA} = Z_{fB} = 0$)

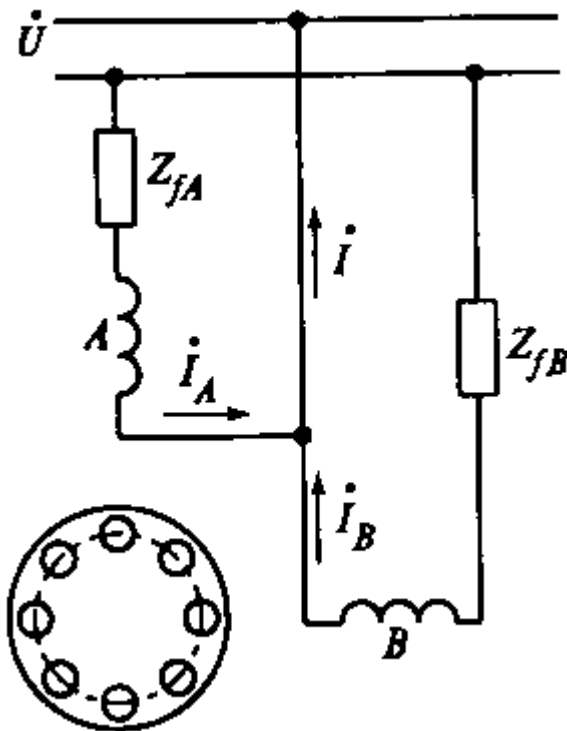
- » пусковые токи фаз равны по амплитуде $I_A = I_B$
- » отстают от U на одинаковый угол $\varphi_A = \varphi_B$
- » т.е. совпадают во времени (разность фаз $\beta = 0$)
- » магнитное поле – пульсирующее
- » пусковой момент $M_{II} = 0$



Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

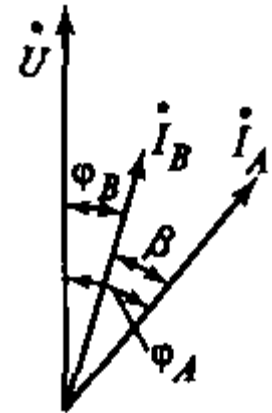
Пусть фазы A и B

- » 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** ($Z_{fA} = 0, Z_{fB} = r_f$)

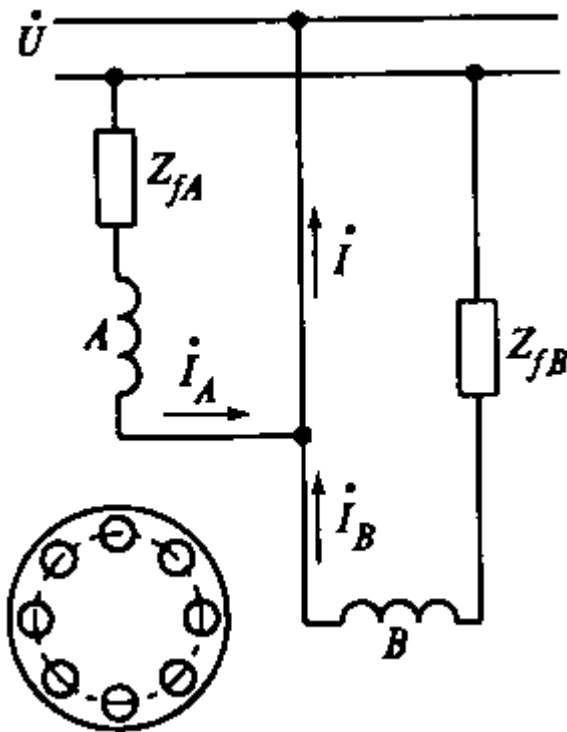
- » сопротивление фазы B «более активное», чем фазы A
- » ток I_B отстает от U на угол $\varphi_B < \varphi_A$
- » появляется разность фаз β
- » магнитное поле – эллиптическое
- » пусковой момент $M_{II} > 0$
- » (но β всегда меньше $\pi/2$)



Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

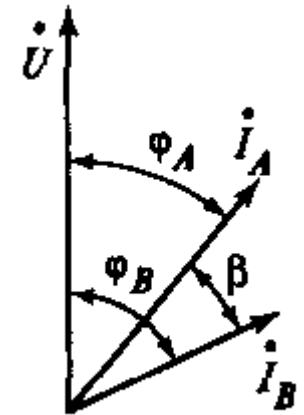
Пусть фазы A и B

- » 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 ($Z_{fA} = 0, Z_{fB} = jx_{fL}$)

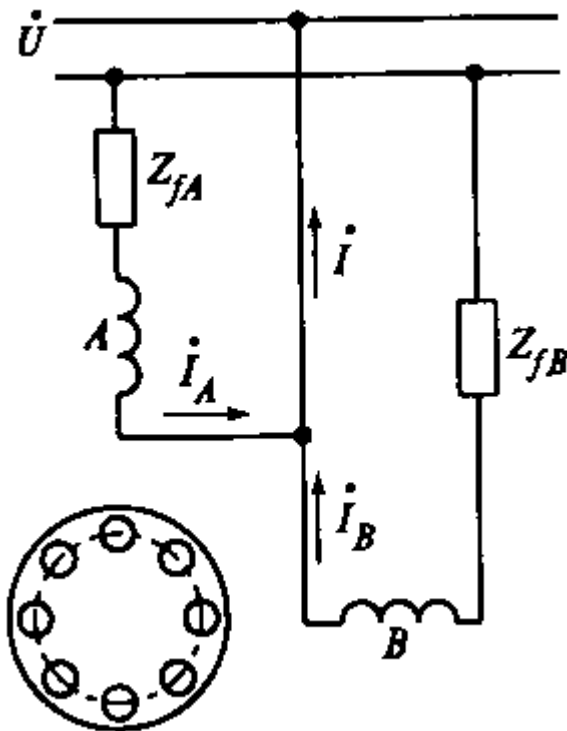
- » сопротивление фазы B «более индуктивное», чем фазы A
- » ток I_B отстает от U на угол $\varphi_B > \varphi_A$
- » появляется разность фаз β
- » магнитное поле – эллиптическое
- » пусковой момент $M_{II} > 0$
- » (но β всегда меньше $\pi/2$)



Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

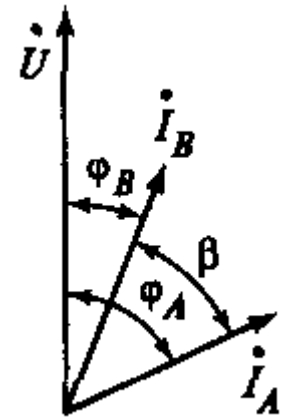
Пусть фазы A и B

- » 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
($Z_{fA} = jx_{fL}$, $Z_{fB} = r_f$)

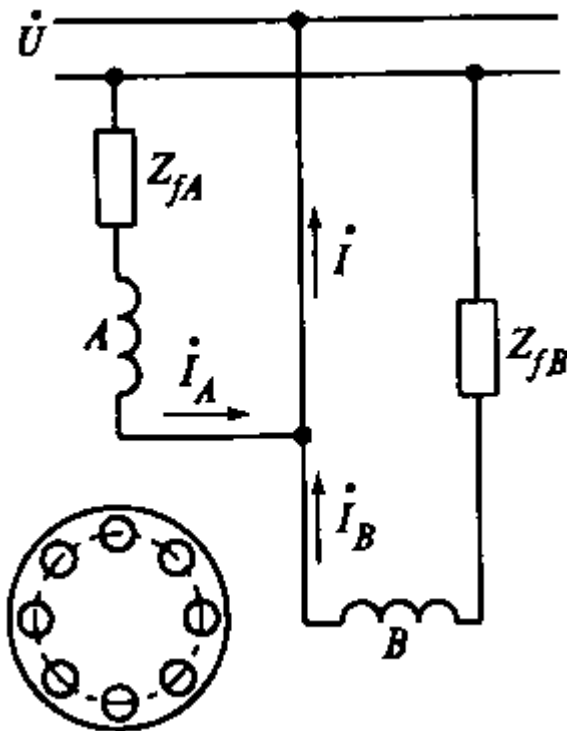
- » ток I_A отстает от U на бóльший угол φ_A
- » ток I_B отстает от U на мéньший угол φ_B
- » разность фаз β увеличивается
- » магнитное поле – более эллиптическое
- » пусковой момент M_{II} возрастает
- » (но β все равно меньше $\pi/2$)



Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

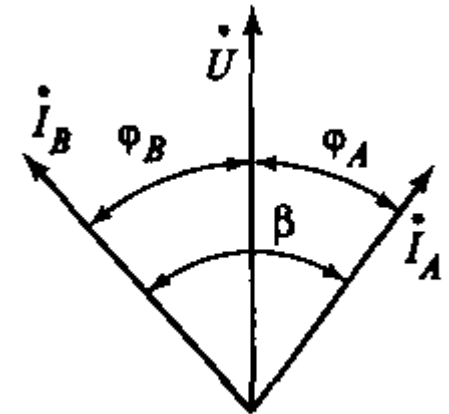
Пусть фазы A и B

- » 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 ($Z_{fA} = 0, Z_{fB} = -jx_{fC}$)

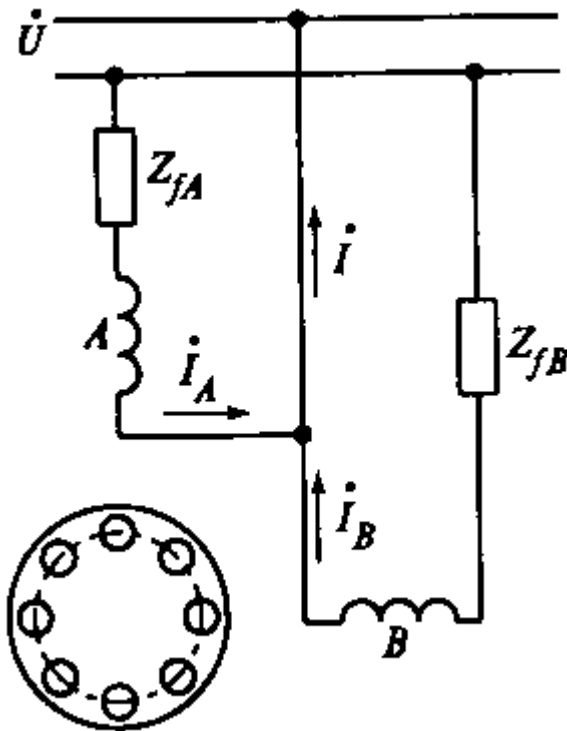
- » ток I_B может опережать U на угол φ_B
- » можно подобрать C так, чтобы получить разность фаз $\beta = \pi/2$
- » возможно получить круговое поле
- » наибольший пусковой момент M_{II} (т.к. нет тормозного момента)



Сравнение свойств фазосдвигающих элементов

Конденсатор в качестве фазосдвигающего элемента позволяет

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



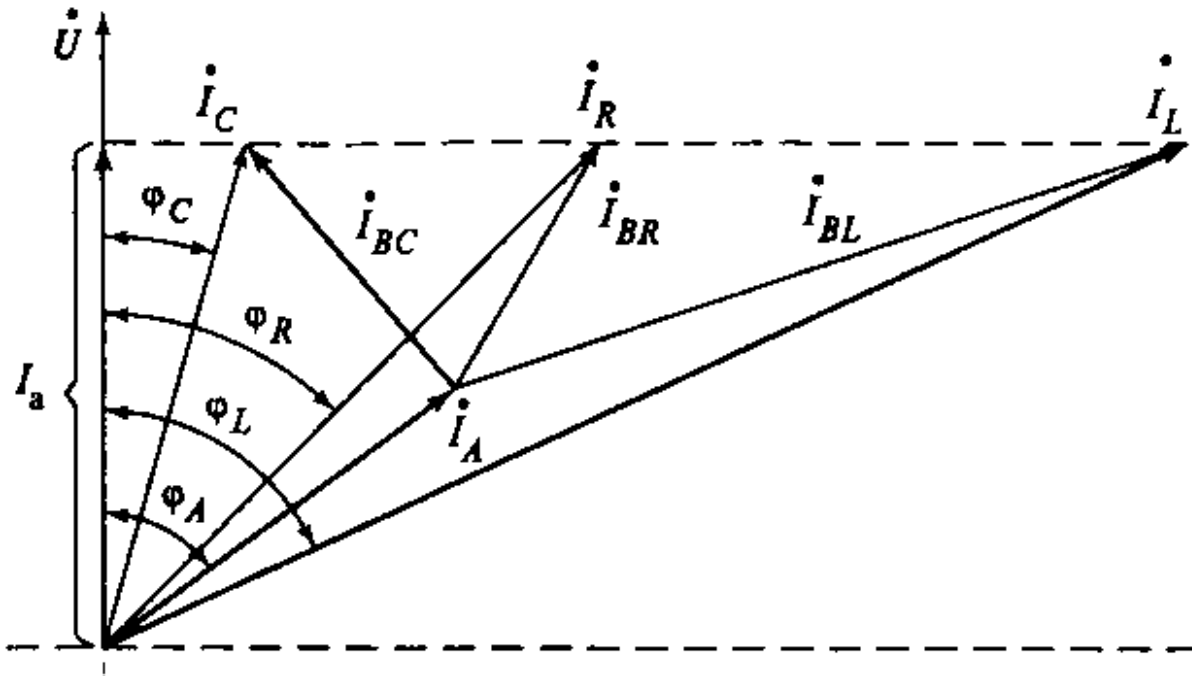
Сравним фазосдвигающие элементы при условии получения одинакового пускового момента

- » 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

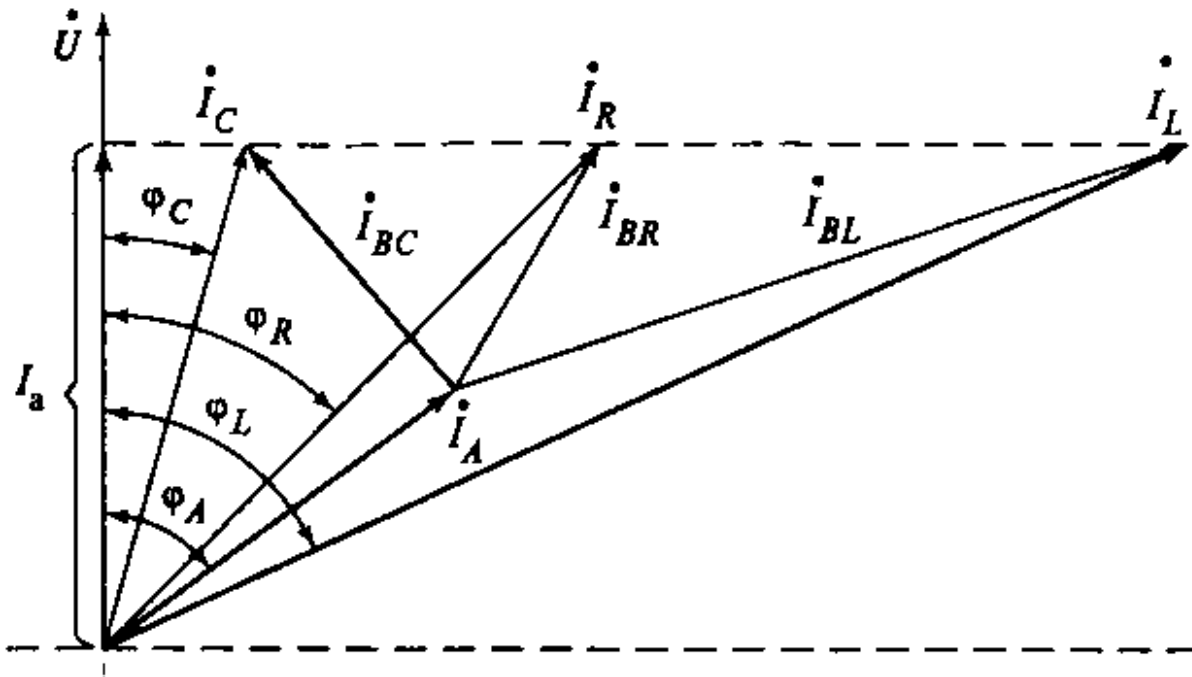
I_L – полный ток АД при использовании L

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

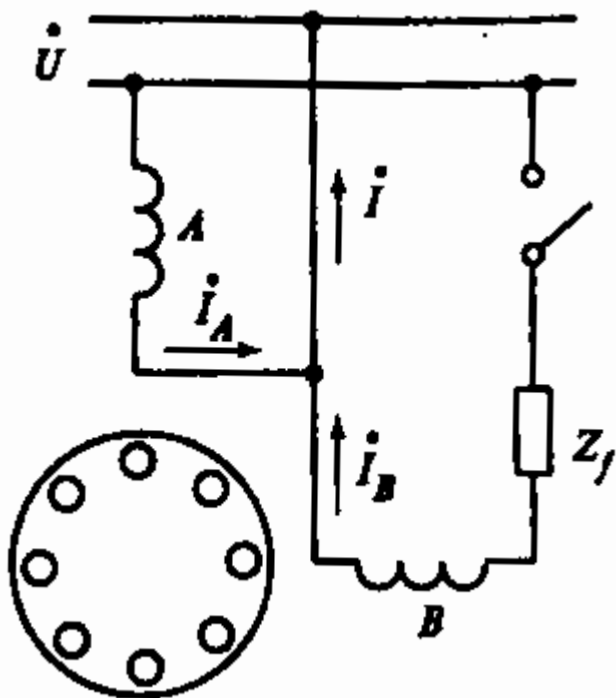
$$\cos \varphi_C > \cos \varphi_R > \cos \varphi_L$$

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

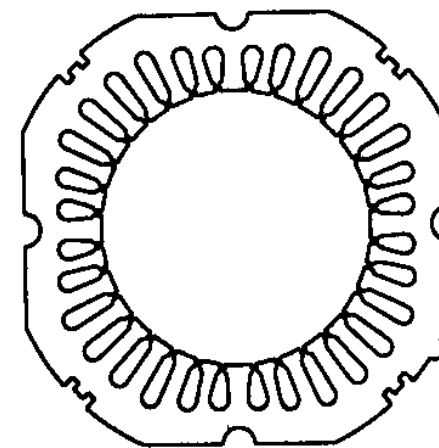
» пусковая обмотка – включается только на время пуска

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

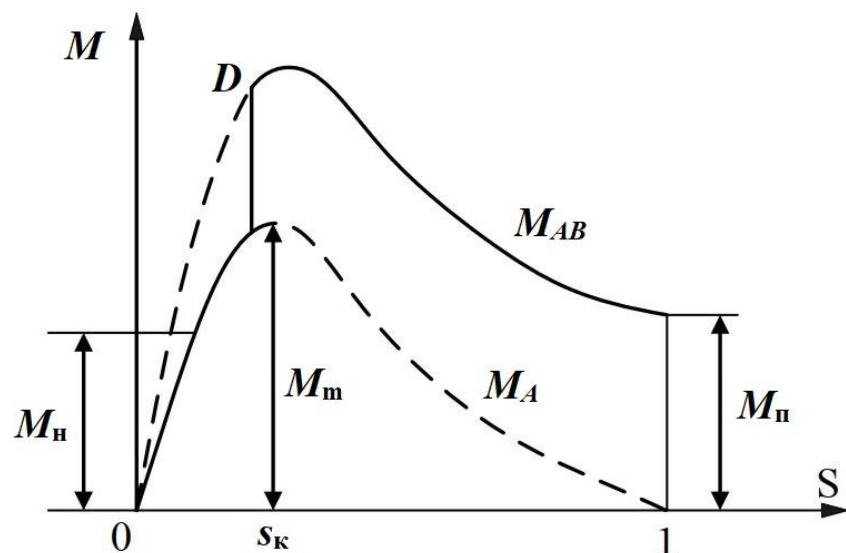
Применяют в случаях, когда не требуется большой пусковой момент

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 β 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/мм²
- » В результате частые пуски недопустимы
- » Для снижения нагрева лучше использовать обмоточный провод увеличенного сечения + дополнительный резистор за пределами АД

Энергетические показатели невысоки

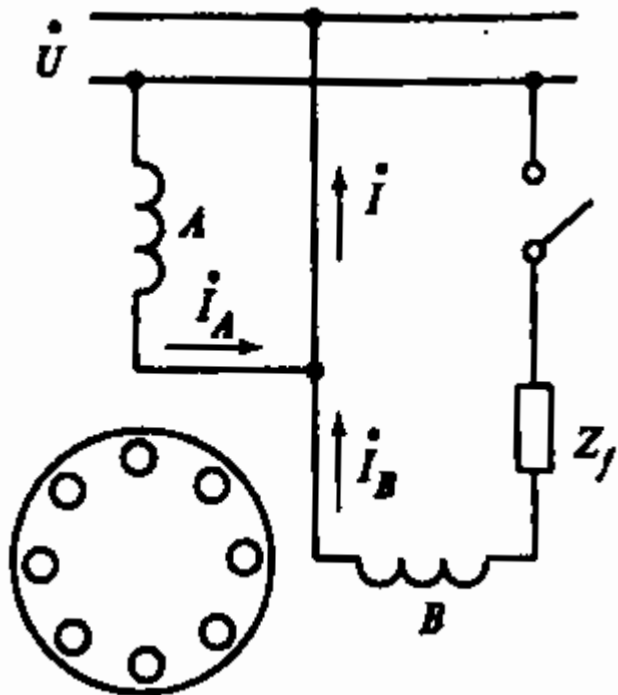
- » КПД $0,4 \dots 0,7$
- » Коэффициент мощности $0,5 \dots 0,6$
- » Перегрузочная способность $1,4 \dots 2,0$

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

Асинхронные двигатели с пусковым конденсатором

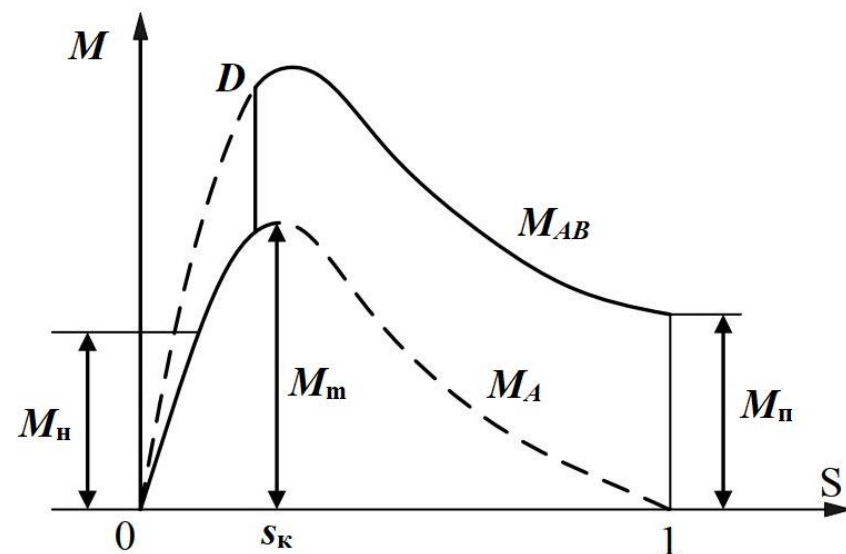
– применяют при повышенных требованиях к пусковым свойствам

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

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

(одновременно)

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}

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

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 $y \approx 2/3 \tau$

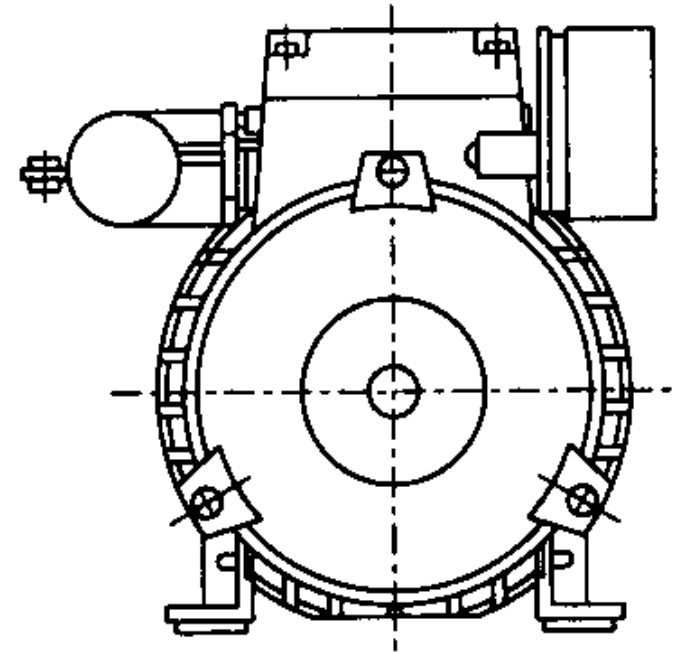
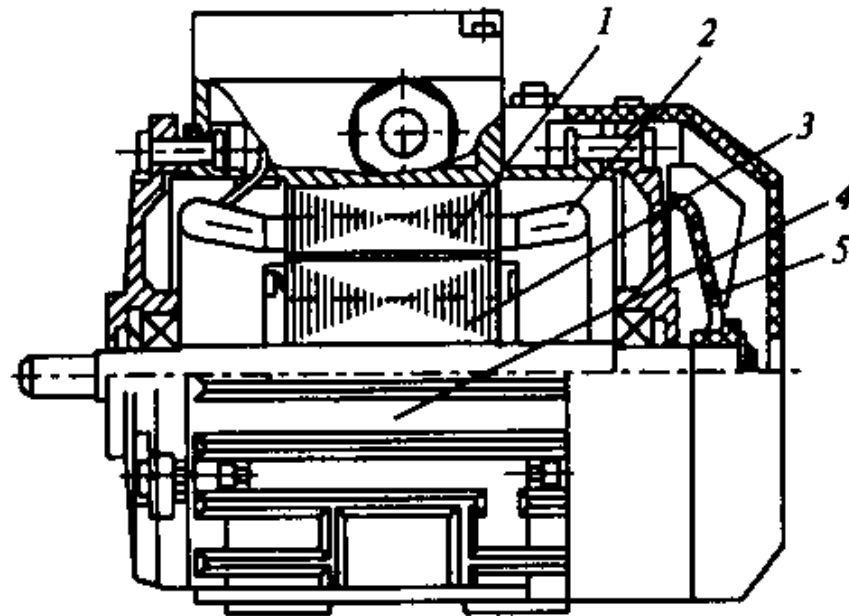
Конструкция АКД мощностью 60...550 Вт аналогична трехфазным АД



Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

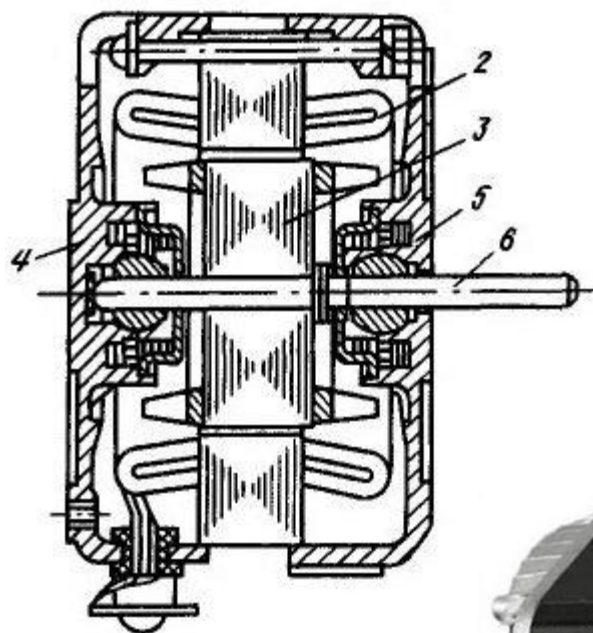
Конструкция АКД мощностью 60...550 Вт аналогична трехфазным АД

- » 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



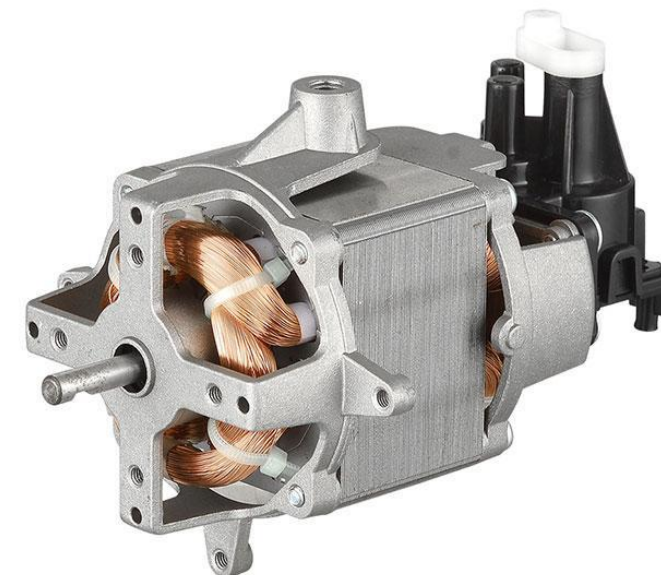
Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

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



АКД серии КД

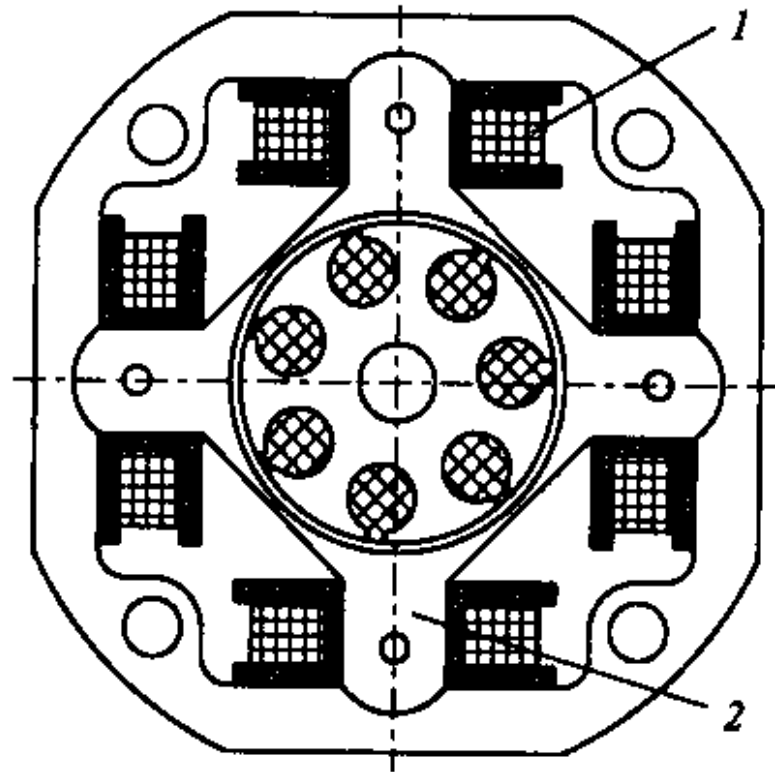
- » Двухфазная обмотка статора – однослойная катушечная
- » Обмотка ротора – короткозамкнутая
- » Подшипники скольжения – металлокерамика



Конструкция асинхронного конденсаторного двигателя

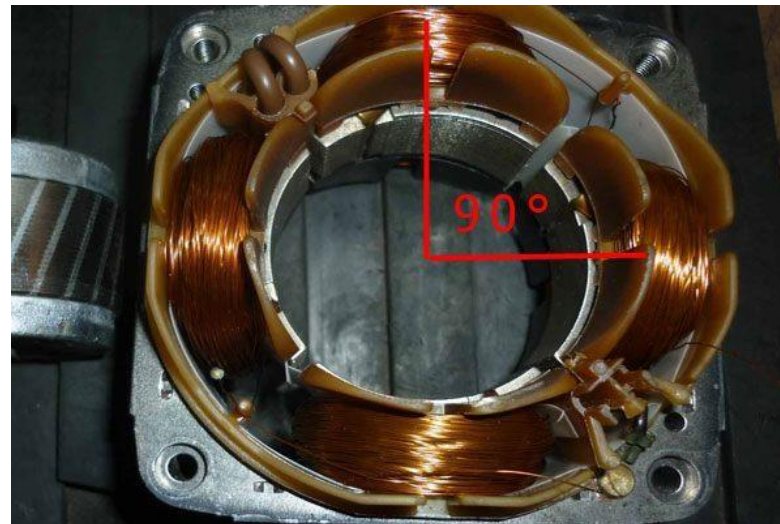
АКД мощностью < 25 Вт:

сосредоточенные обмотки на явно выраженных полюсах (для простоты)



АКД серии ДКВ:

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

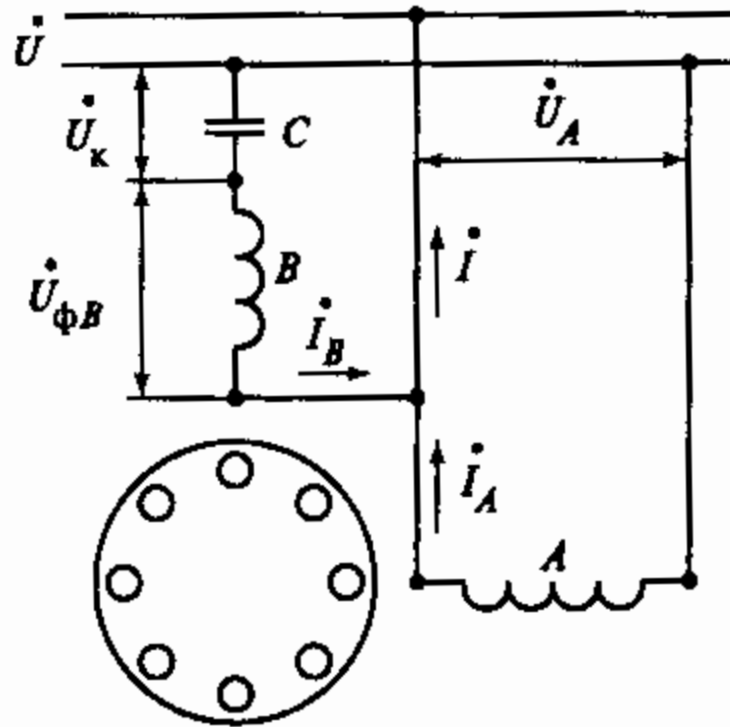


ЭМАУ

Ширинский С.В., каф.ЭМЭА, НИУ «МЭИ»

Двигатель с рабочим конденсатором

Применяют в случаях, когда требуются высокие энергетические показатели (η , $\cos\varphi$), 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

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

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

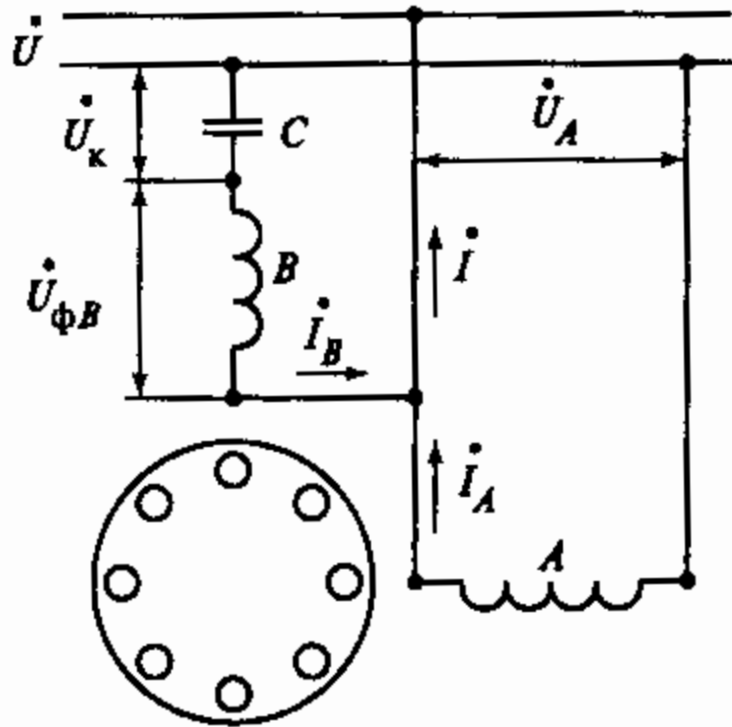
Здесь $Z_C = -jx_C$

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 φ_A – угла между U_A и I_A

» при изменении нагрузки изменяется угол φ_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

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

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

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

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

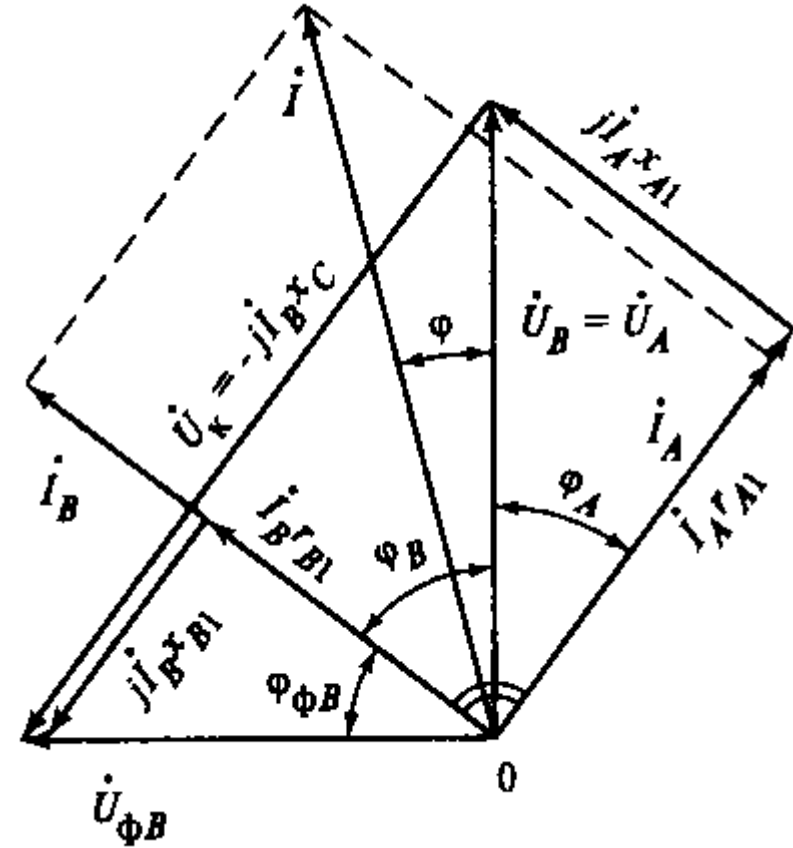
$$\dot{I}_A + \dot{I}_B = \dot{I}$$

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

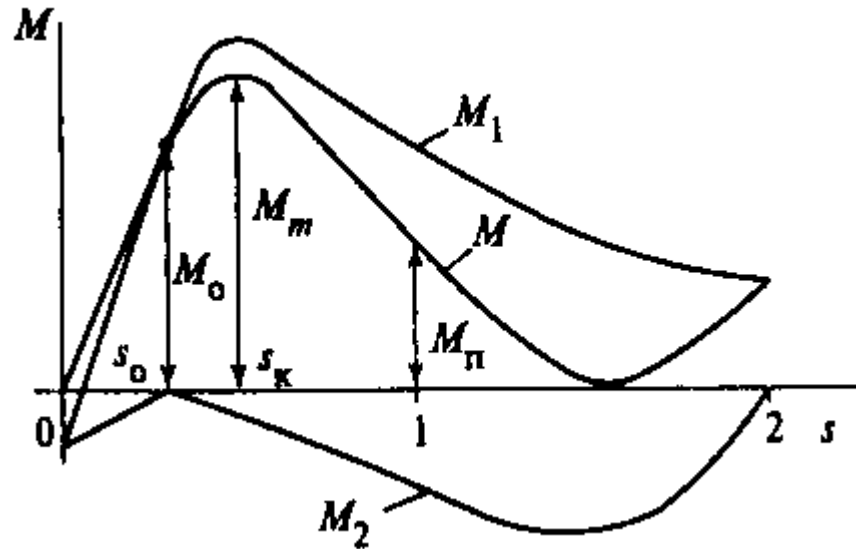
- » U_K всегда больше U сети и увеличивается с ростом k
- » надо это учитывать при выборе конденсатора



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)

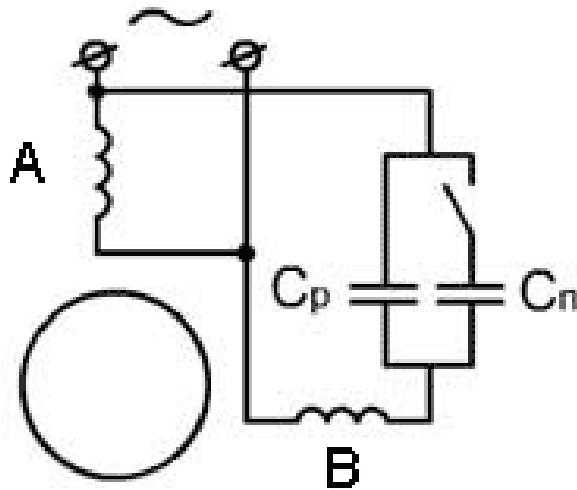
При этом АКД имеет хорошие рабочие свойства
 $\eta = 0,5 \dots 0,8$ $\cos \varphi = 0,8 \dots 0,95$ $M_m = (1,8 \dots 2,2)M_H$

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

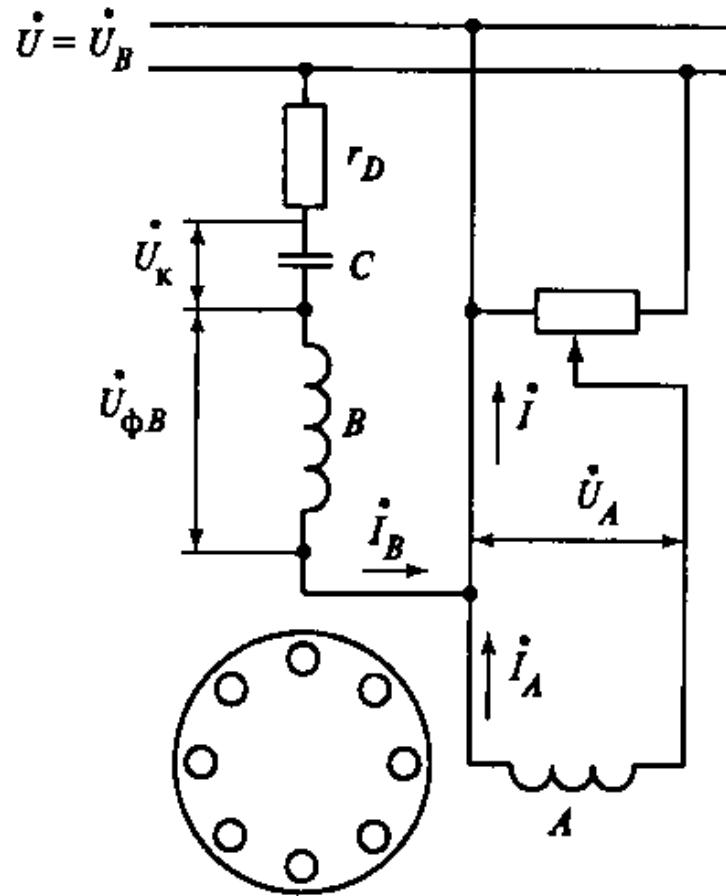


Другой способ повышения M_{II} – получение кругового поля при $s_0 > s_H$

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 α)



Здесь α – 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

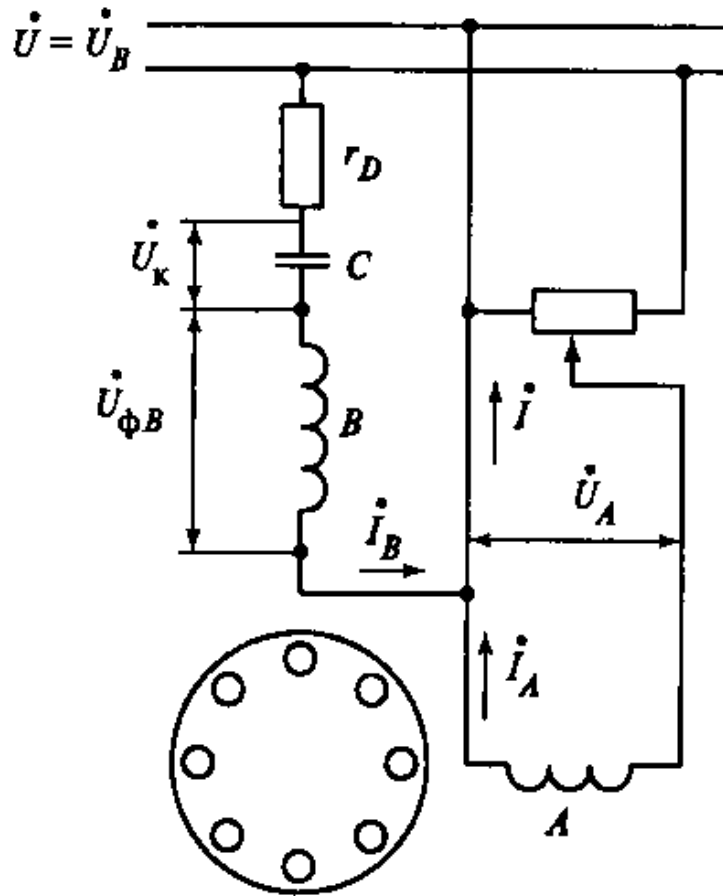
На практике применяют следующие варианты

Вариант 1. Выбор x_C и коэффициента сигнала α (полагая $r_D = 0$)

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

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

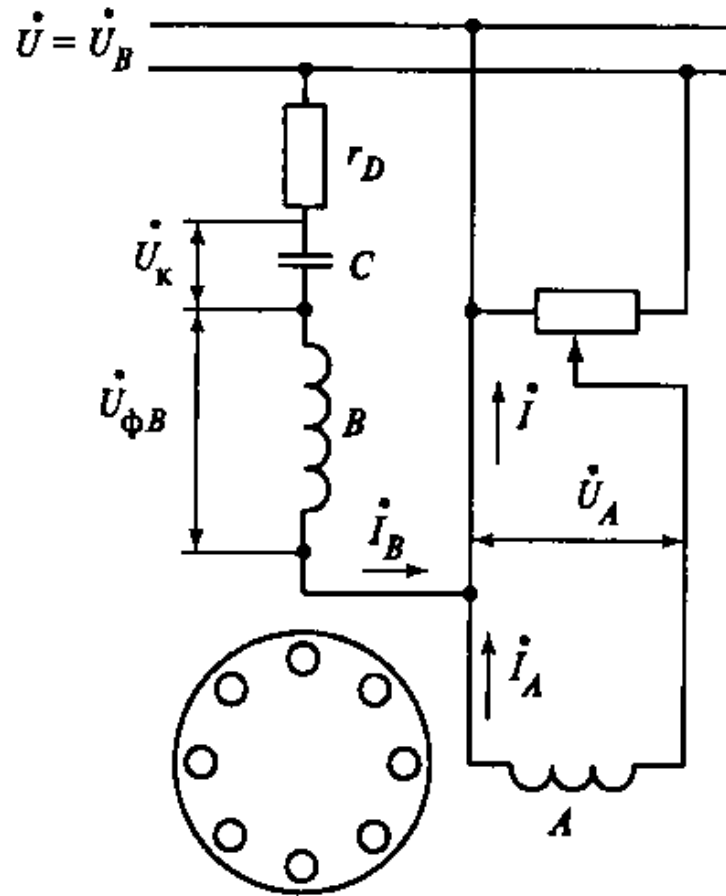
Путем выбора α и x_C можно получить круговое поле в АКД с заданным k в любом режиме работы
(ограничение – напряжение на конденсаторе)



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

- » Если известна геометрия АД и обмоточные данные – можно рассчитать параметры схемы замещения и по ней найти r_A , x_A , φ_A для любого режима работы (любого s)
- » Если есть готовый АД – можно определить r_A , x_A , φ_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 , φ_A и Z_B , r_B , x_B , φ_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

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

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

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

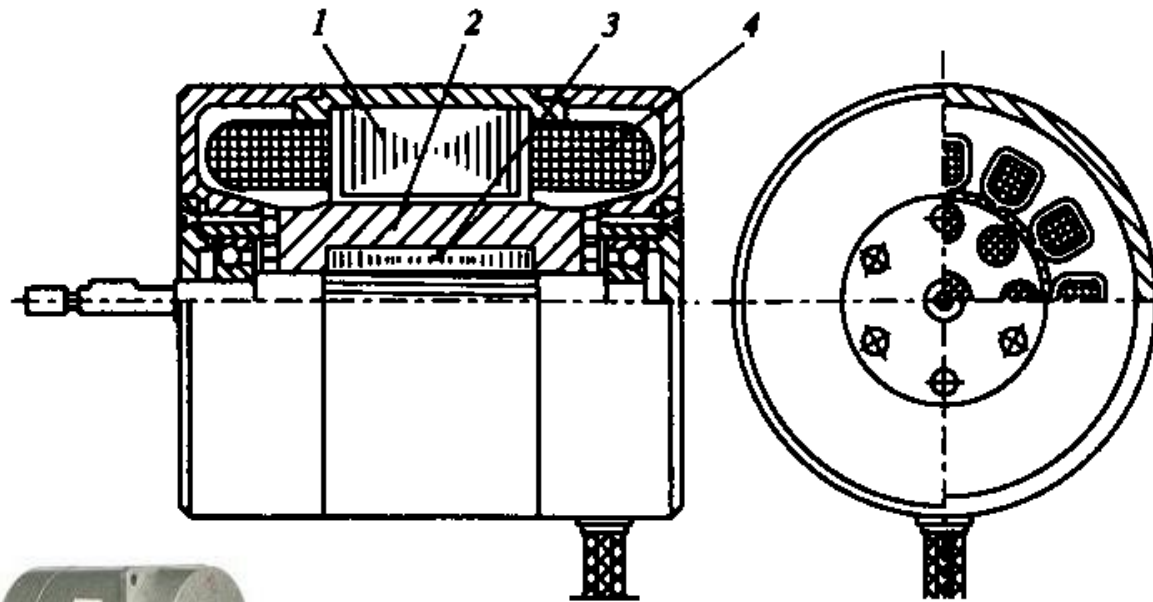
Избыточность – только для примера

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

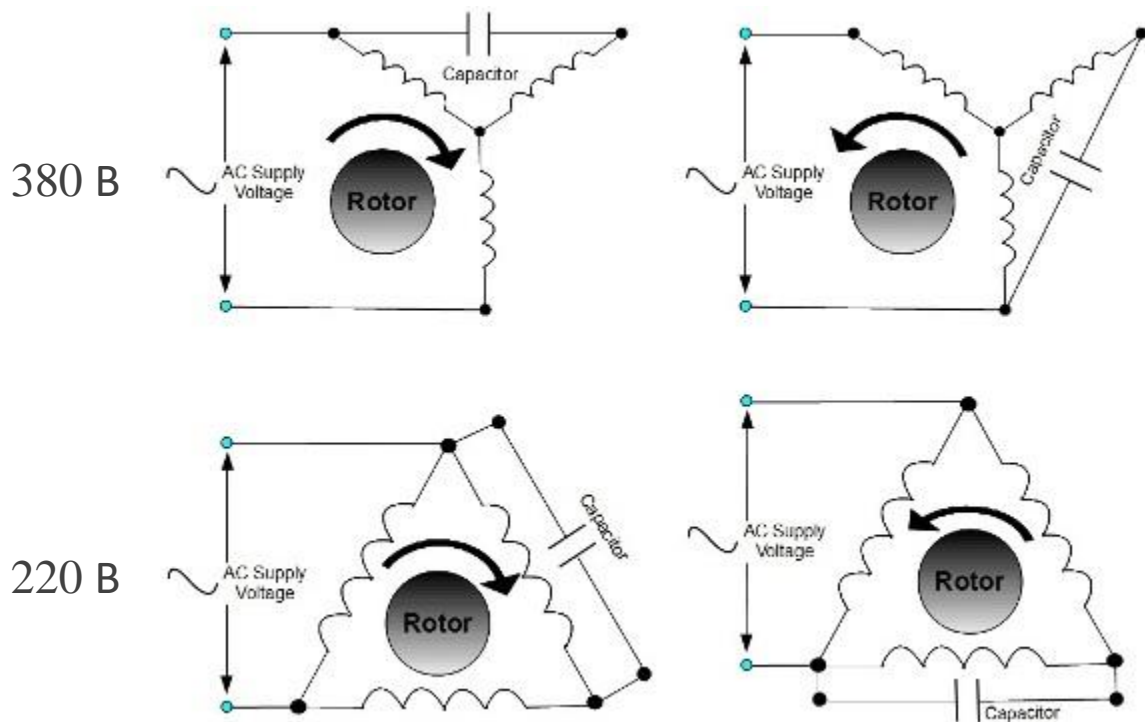


Двигатели 10...500 Вт



Универсальный асинхронный двигатель

Типичные схемы включения УАД в 1-фазную сеть



Популярные эмпирические формулы расчета емкости рабочего конденсатора

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

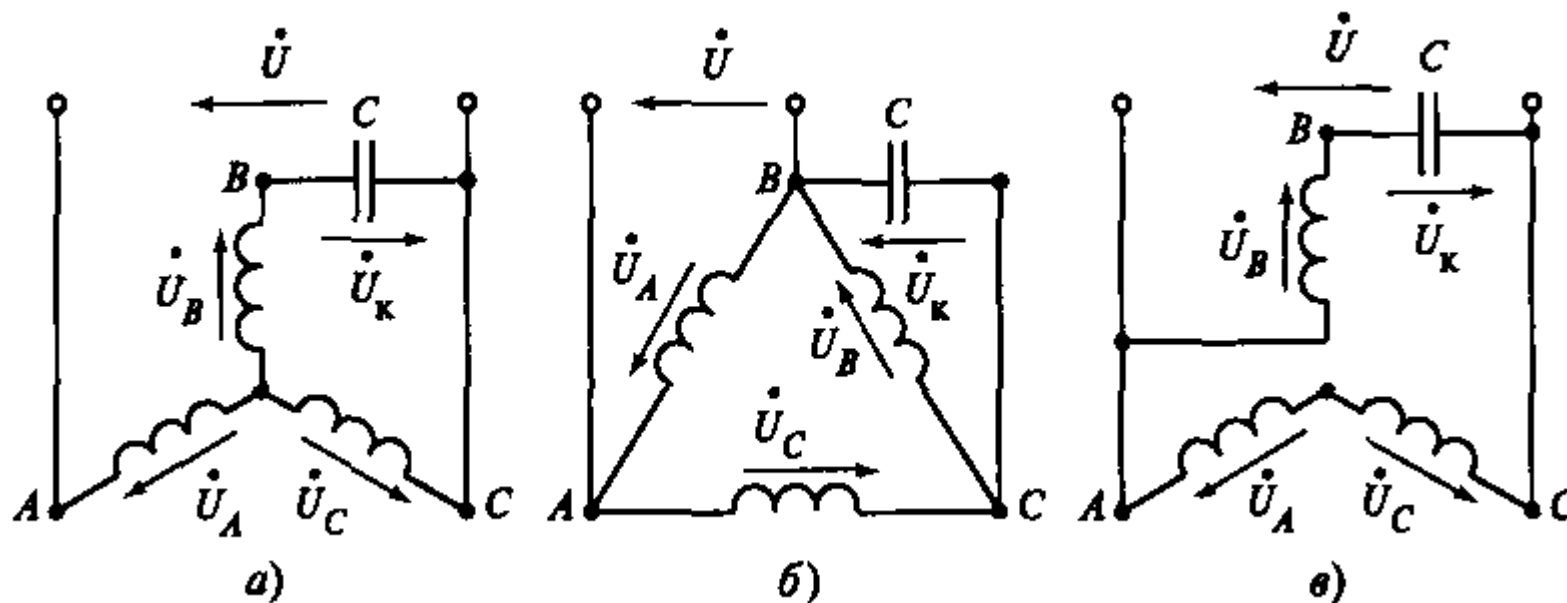
$$C_{\Delta} = 4800 \frac{I_H}{U}$$

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

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

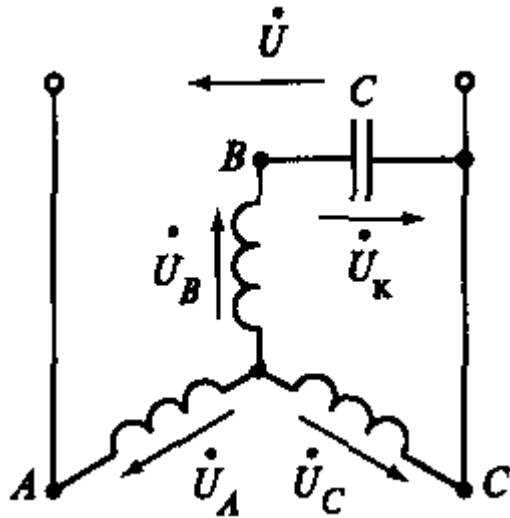
$$C_p \approx 2800 \frac{I_H}{U}$$

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

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

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 токак 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

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

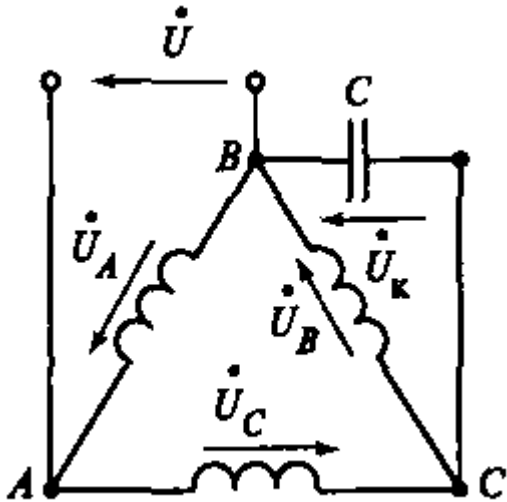
Потребляемый из сети ток $I = I_A$

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

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

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

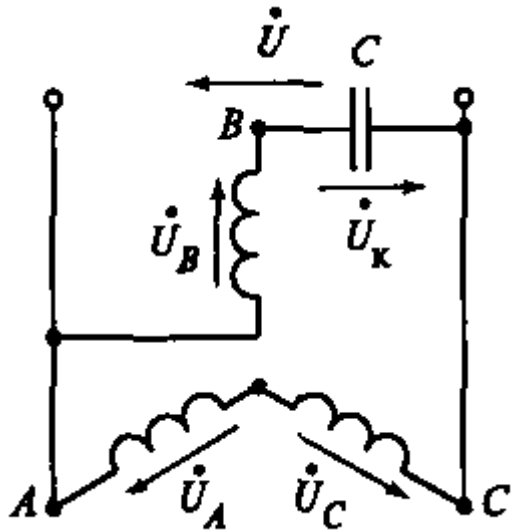
Симметричные составляющие тока статора

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

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:

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

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

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

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

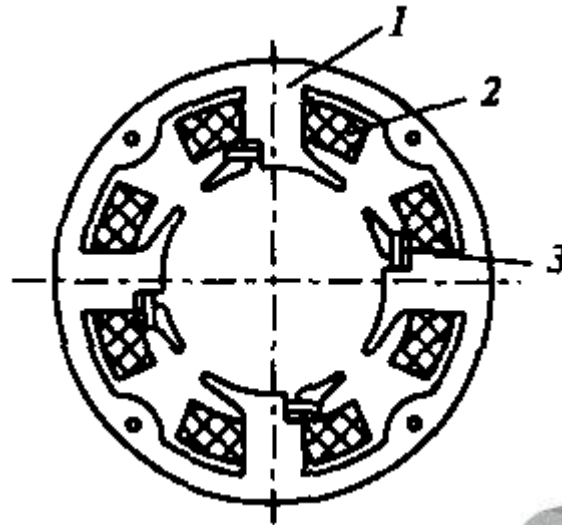
Здесь круговое поле можно получить только при такой n , когда $\cos\varphi_{3\phi} = \sqrt{3}/2$

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 ОВ

3 – КЗ виток вокруг части полюса

Чередующаяся полярность полюсов

Ротор – обычный с КЗ обмоткой

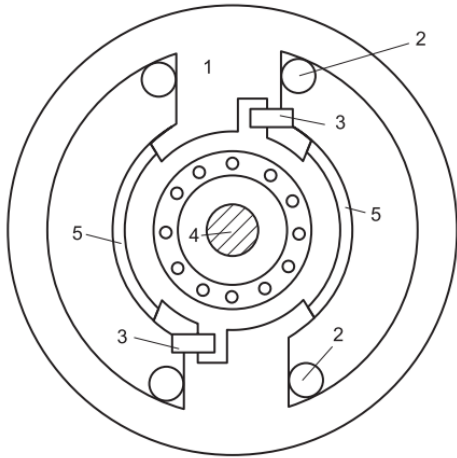


ЭМАУ

Ширинский С.В., каф.ЭМЭА, НИУ «МЭИ»

Особенности конструкции АДЭП

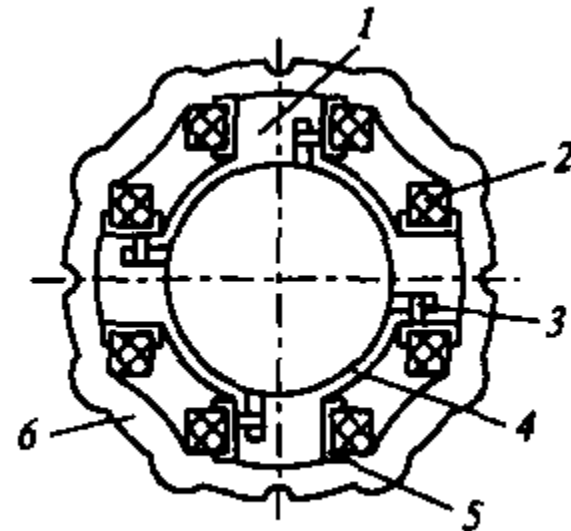
Статор может иметь магнитные шунты между полюсами (узкие – мостики насыщения)



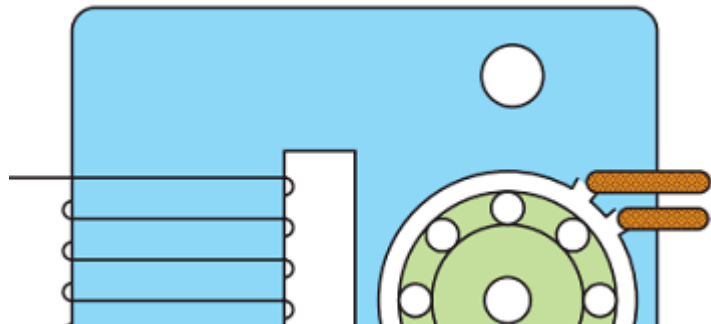
- » «оттягивают» поток к краям полюсов
- » улучшают форму поля в зазоре
- » уменьшается число высших гармоник поля
- » увеличивается момент

Иногда статор с магнитными шунтами делают составным

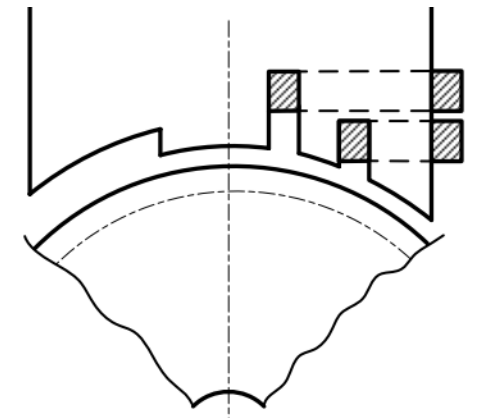
- » 5 – внутренняя крестовина
- » 6 – внешнее ярмо (технологичность)



АДЭП может иметь несколько КЗ витков – несколько экранированных частей полюса

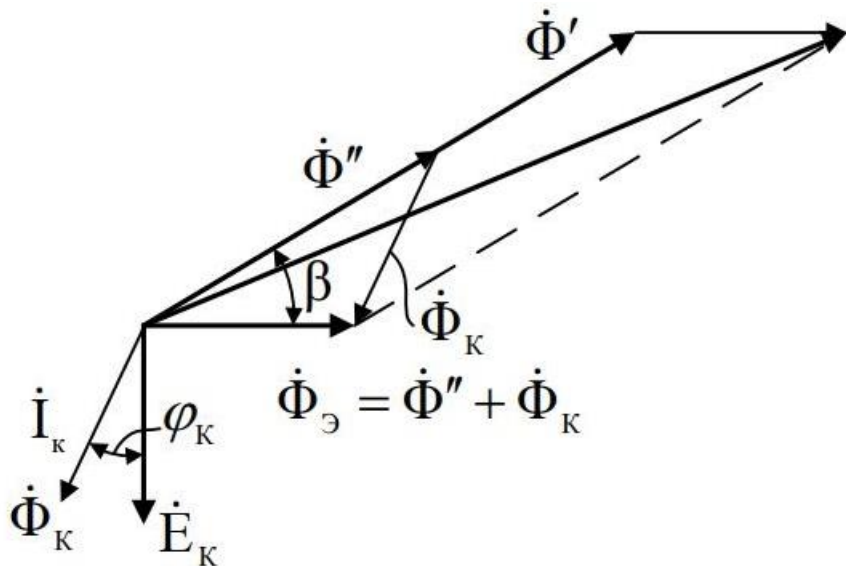
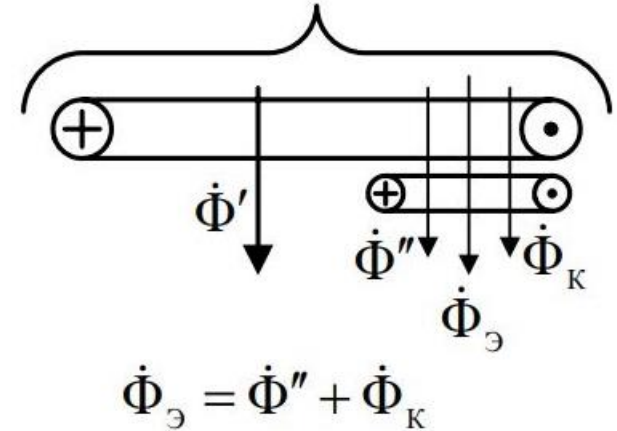


Это улучшает форму поля, как и ступенчатый зазор под неэкранированной частью полюса



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 φ_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 $\dot{\Phi}_\Delta = \dot{\Phi}'' + \dot{\Phi}_K$



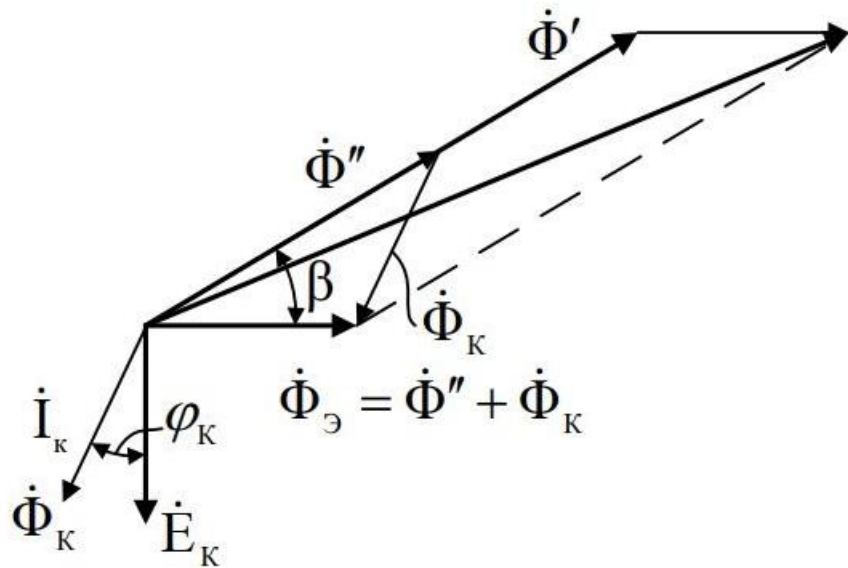
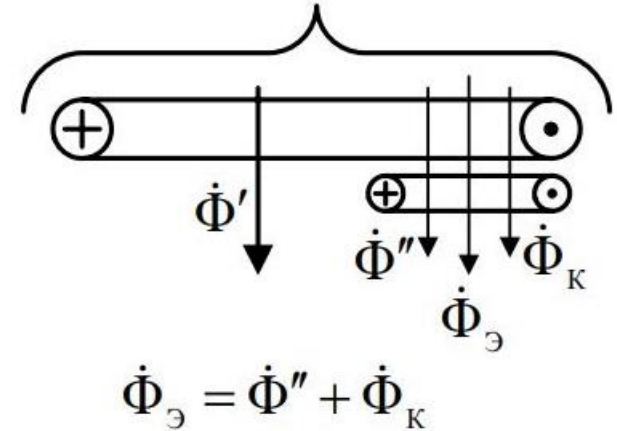
- » поток экранированной части полюса $\dot{\Phi}_\Delta$ сдвинут во времени относительно потока неэкранированной части полюса $\dot{\Phi}'$ на угол β
- » также поток $\dot{\Phi}_\Delta$ сдвинут в пространстве относительно $\dot{\Phi}'$ на угол θ
- » два потока, сдвинутые во времени и в пространстве создают вращающееся магнитное поле

Принцип действия АДЭП

потоки $\Phi_{\text{э}}$ и Φ' неравны, углы сдвига β и θ невелики

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

→ создает вращающий момент (в том числе пусковой)



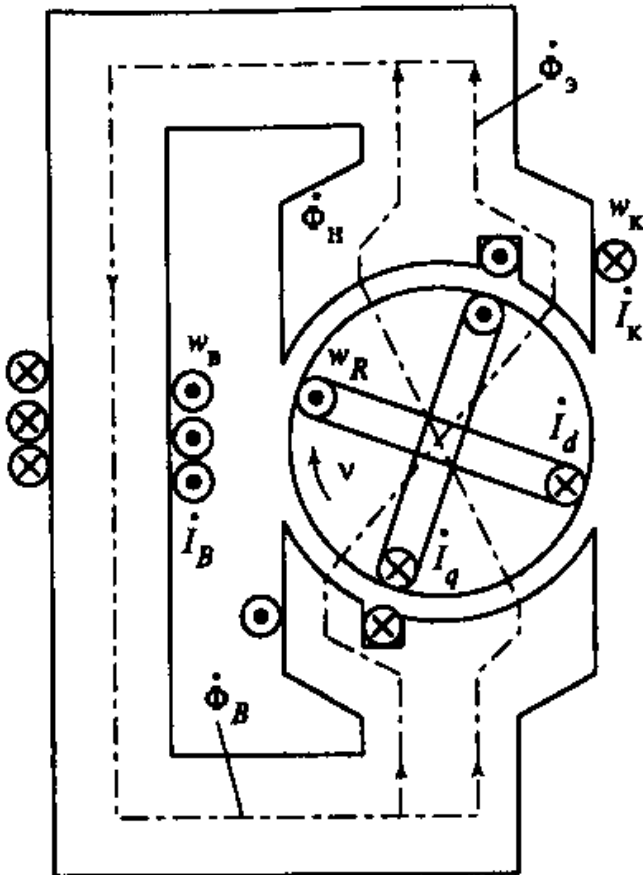
Поле вращается в сторону отстающего потока

→ 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

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

- » Φ_H – поток незранированной части полюса
- » Φ_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

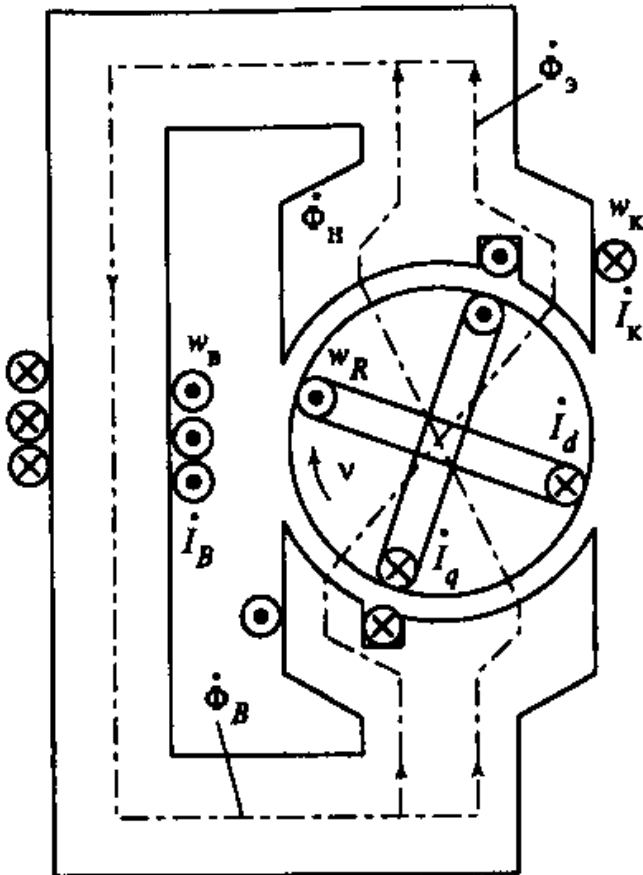
$$2\dot{\Phi}_{\delta_H} \frac{\delta_H}{\mu_0 S_H} = \sqrt{2} [\dot{I}_B w_B + (\dot{I}_d - \dot{I}_q) w_R]$$

Здесь δ_3, δ_H – зазор под соответствующей частью полюса

S_3, S_H – площадь соответствующей части полюса

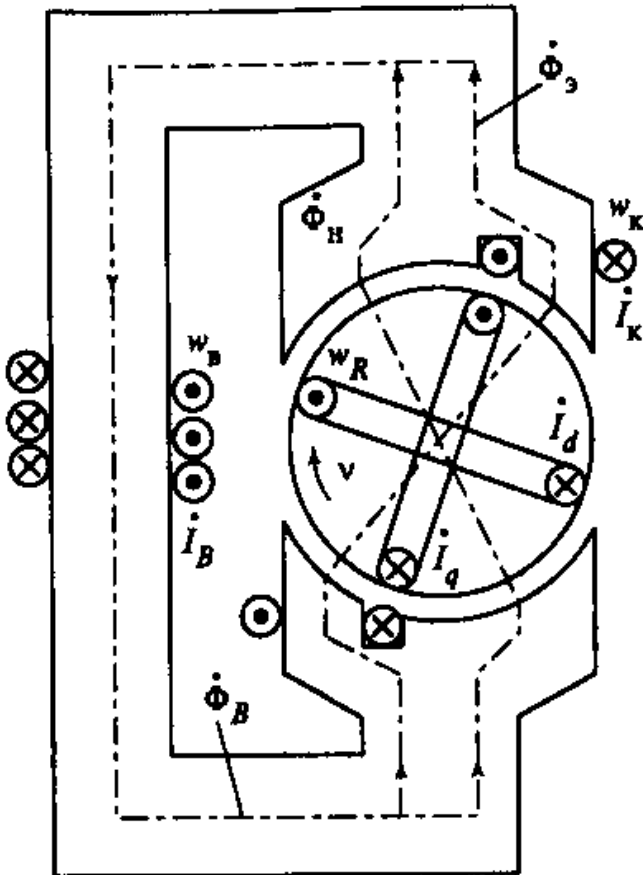
$\mu_0 S/\delta$ – магнитная проводимость зазора

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



Способ расчета АДЭП

Выразив потоки, найдем наведенные ЭДС



» Трансформаторные ЭДС в обмотках статора

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

» Трансформаторные ЭДС в обмотках ротора

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

» 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

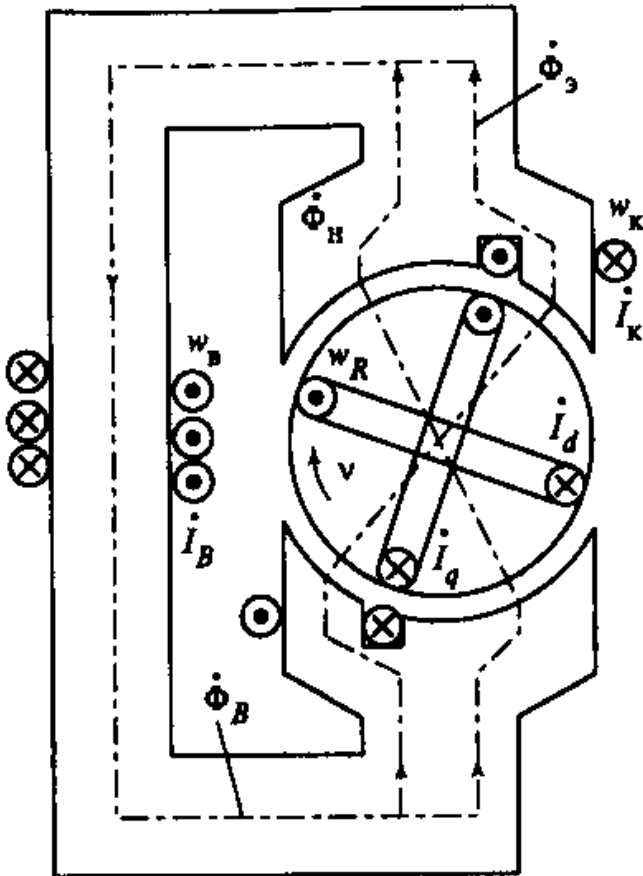
Тогда уравнения равновесия напряжений можно записать в виде

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

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

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

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



x_m – индуктивное сопротивление взаимной индукции обмотки возбуждения и обмоток ротора

$$x_m = \omega_1 \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{S_3}{\delta_3} + \frac{S_H}{\delta_H} \right) w_B^2$$

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

$$x_{mK} = \omega_1 \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{S_3}{\delta_3} \right) w_B^2$$

x_p – реактивное сопротивление $x_p = \omega_1 \frac{\mu_0}{2} \left(\frac{S_3}{\delta_3} - \frac{S_H}{\delta_H} \right) w_B^2$

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

» 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

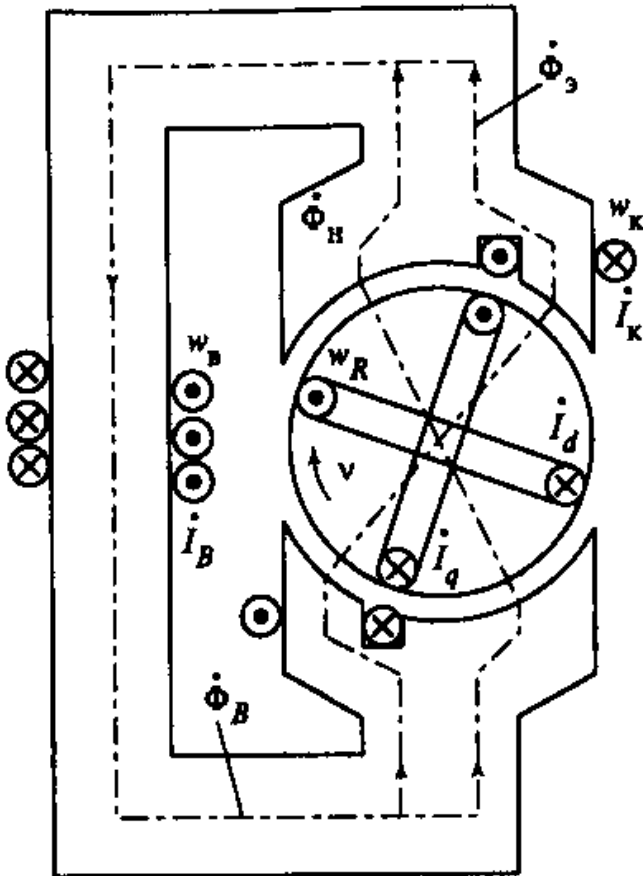
Тогда уравнения равновесия напряжений можно записать в виде

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

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

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

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



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 ($M = M_1 + M_2$)

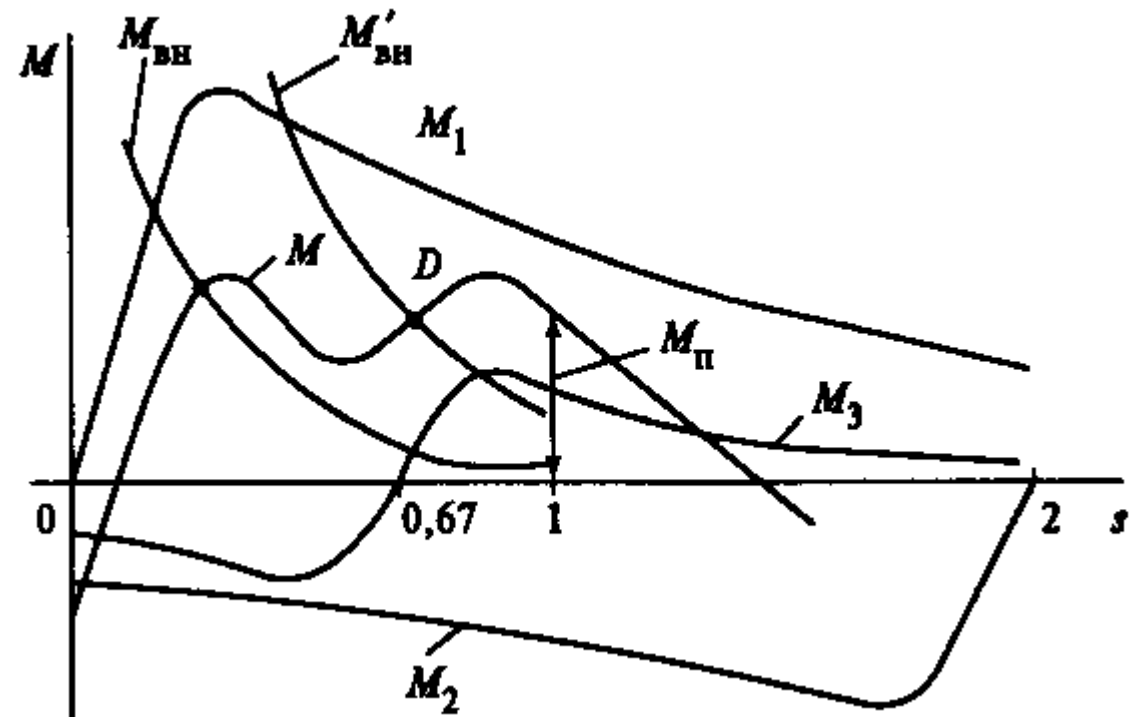
Однако, значительные высшие гармоники (из-за сосредоточенной обмотки) создают моменты, которые вносят искажения в результирующую кривую $M(s)$

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

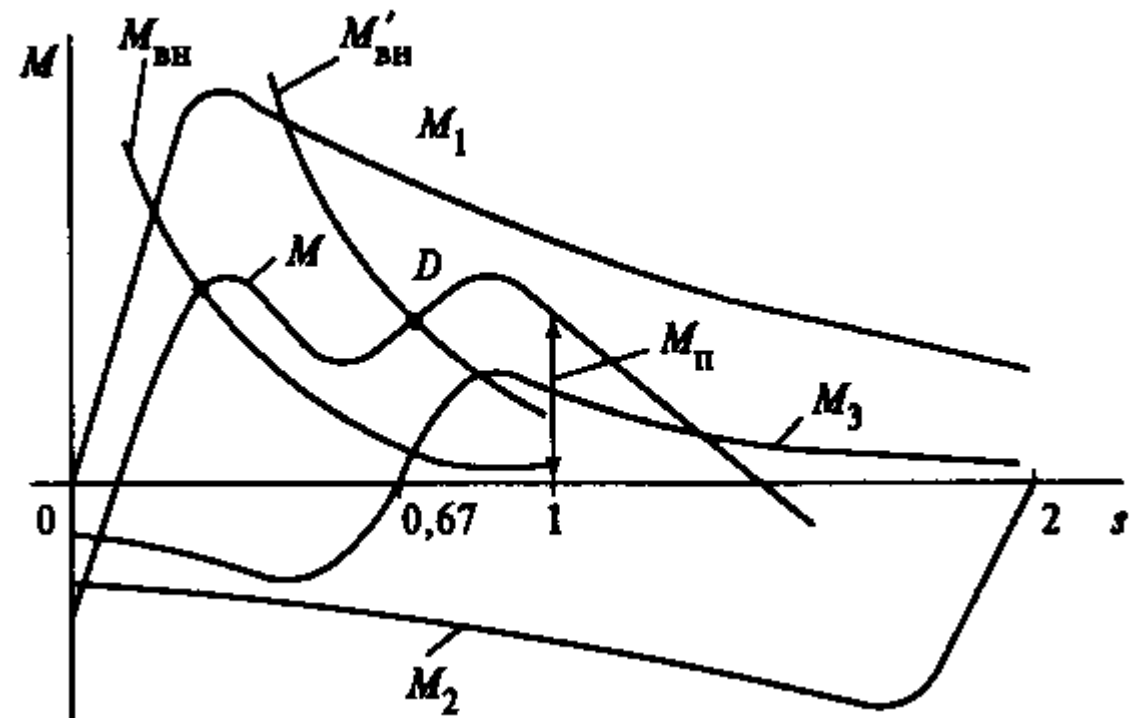
→ перегрузочная способность $M_m/M_H = 1,1 \dots 1,25$

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

elmech.mpei.ac.ru/EMAU/
(srv0-5.mpei.ac.ru/EMAU/)

