

# **ЛЕКЦИЯ №14 ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД»**

**Тема: «Пуск, торможение  
и реверс асинхронного двигателя»**

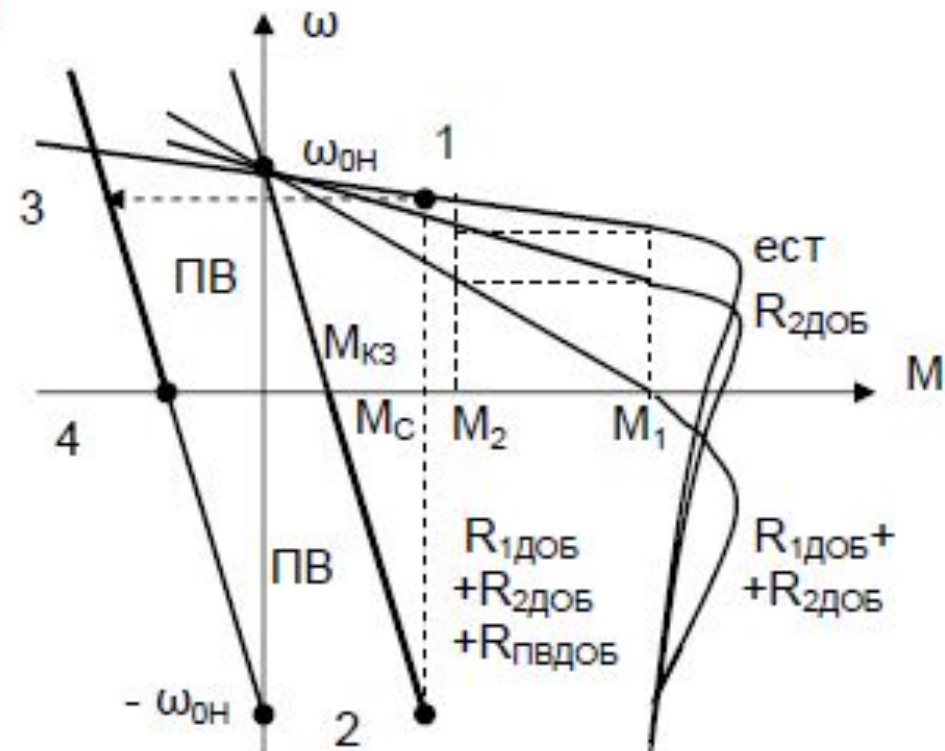
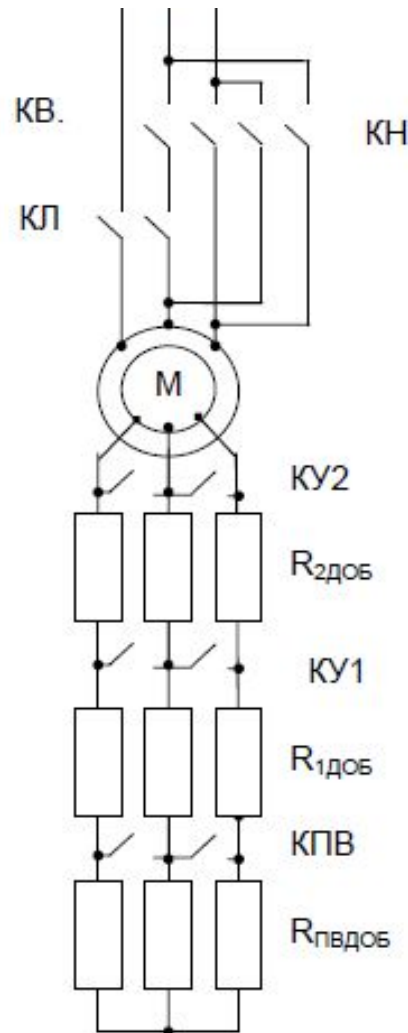
# СПОСОБЫ ПУСКА АД:

– прямой пуск – при питании двигателя от сети неизменного напряжения, напряжение на статор подается скачком. Пуск производится на естественной механической характеристике. При пусковом ( $s = 1$ ) моменте  $M_{\text{П}} = 0,8 \dots 1,8 M_{\text{Н}}$  пусковой ток статора  $I_{1\text{П}}$  достигает значения  $5 \dots 7 \cdot I_{1\text{Н}}$ . Падение напряжения в сети, питающей двигатель, при пуске может превысить допустимое по условиям эксплуатации  $-10\% U_{\text{Н}}$ .

– реакторный (реже автотрансформаторный) – в цепь статора на время пуска включают либо реакторы, либо автотрансформатор с целью ограничения пускового тока и достижения падением напряжения в сети допустимого значения. При пуске асинхронного двигателя с фазным ротором с целью обеспечения технологических требований, предъявляемых к пуску (форсированный, с ограничением по ускорению рабочего органа, нормальный пуск) в цепь ротора включают добавочные сопротивления  $R_{2\text{доб}}$ . Увеличение сопротивления ротора приводит к снижению тока ротора  $I_2$  при одновременном росте его активной составляющей  $I_{2\text{А}}$  и соответственно к увеличению пускового момента  $M_{\text{П}}$ .

# РЕОСТАТНЫЙ ПУСК АД:

**Реостатный пуск АДФР.** На рис. приведена схема силовых цепей реостатного пуска двигателя. Реостатный пуск предусматривает при подаче напряжения на статор введение добавочного сопротивления, ограничивающего величину тока ротора допустимым значением по технологическим условиям пуска. Также приведены механические характеристики, обеспечивающие пуск двигателя.



# РЕОСТАТНЫЙ ПУСК АД:

При замыкании контактов линейного контактора КЛ и одного из контакторов направления КВ (или КН) ток ротора  $I_2$  протекает через обмотку ротора и добавочные сопротивления  $R_{1\text{доб}}$  и  $R_{2\text{доб}}$ , создается момент  $M_1$ . Контактор режима противовключения КПВ во время пуска включен, и сопротивление  $R_{\text{ПВ ДОБ}}$  зашунтировано. Двигатель разгоняется по характеристике с  $R_{1\text{доб}} + R_{2\text{доб}}$ , ток ротора снижается, и моменте переключения  $M_2$  включается контактор КУ<sub>1</sub>, шунтируя  $R_{1\text{доб}}$ . Двигатель переводится на характеристику с  $R_{2\text{доб}}$ . Ток ротора вновь увеличивается, момент нарастает до значения  $M_1$ . Происходит разгон до скорости, где при моменте переключения  $M_2$  включается контактор КУ<sub>2</sub>, переводя двигатель на естественную характеристику. На этой характеристике продолжается разгон до скорости  $\omega_c$ , где при  $M = M_c$  двигатель переходит в установившийся режим работы (точка 1). В процессе разгона двигателя добавочное сопротивление уменьшают по величине, обеспечивая переключение ступеней пусковых сопротивлений по правильной пусковой диаграмме. Переключение ступеней выполняется автоматически в функции времени, тока, скорости.

# РЕОСТАТНЫЙ ПУСК АД:

Правильная пусковая диаграмма строится из условия поддержания постоянства среднего пускового момента двигателя, обеспечивая равенство максимальных моментов  $M_1$  на каждой из пусковых характеристик, а также равенство моментов переключения  $M_2$ .

Пусковые резисторы рассчитываются аналогично рассмотренному выше расчету для ДПТ:

- определяется полное сопротивление цепи ротора при пуске  $R_2$ ;
- выполняется разбиение  $R_2$  на ступени, обеспечивающие правильную пусковую диаграмму.

С учетом падения напряжения в сети при пуске ( $\Delta U_1 = 0,1 \cdot U_{1H}$ ) принимают максимальный пусковой момент  $M_1 \leq M_{\text{МАКС}} = 0,8 \cdot M_K$ . Момент переключения выбирают  $M_2 \geq 1,2 \cdot M_C$  для исключения застревания на промежуточной характеристике.

В связи с нелинейностью механических характеристик точные аналитические расчеты сложны и практически ими не пользуются.

# ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ АД:

Асинхронный двигатель является обратимой электрической машиной, способной работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. При появлении на валу избыточной механической энергии двигатель переходит в генераторный режим.

С точки зрения потребления избыточной электрической энергии АД работает в таких же тормозных режимах, как и рассмотренный ранее двигатель постоянного тока:

- рекуперативного торможения,
- динамического торможения,
- торможения противовключением.

# РЕКУПЕРАТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АД:

**Рекуперативное торможение (РТ)** асинхронного двигателя – избыточная активная электрическая энергия возвращается в сеть за вычетом потерь в статорных и роторных цепях машины. Избыточная мощность с вала двигателя увеличивает скорость двигателя до значений, превышающих скорость вращения магнитного потока (синхронную скорость). Проводники ротора опережают поле статора и в них наводится ЭДС, вектор которой меняет направление на обратное по отношению к двигательному режиму. Появляется ток ротора, от взаимодействия тока ротора с потоком возникает тормозной момент. Направление потока мощности по сравнению с двигательным режимом – обратное, с вала двигателя в сеть.

При переходе в режим рекуперативного торможения двигатель проходит характерные точки:

- 1) холостой ход ( $P_B = 0$ ) – потери мощности в машине покрываются со стороны сети;
- 2) идеальный холостой ход – ЭДС и ток ротора равны нулю,  $M_{ЭМ} = 0$ ,

# РЕКУПЕРАТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АД:

Режим рекуперативного торможения начинается при скорости  $\omega > \omega_{0H}$ , когда меняется направление активной мощности  $P_1 < 0$ . Варианты обеспечения рекуперативного торможения похожи на аналогичные для ДНВ, если рассматривать рабочий участок механической характеристики:

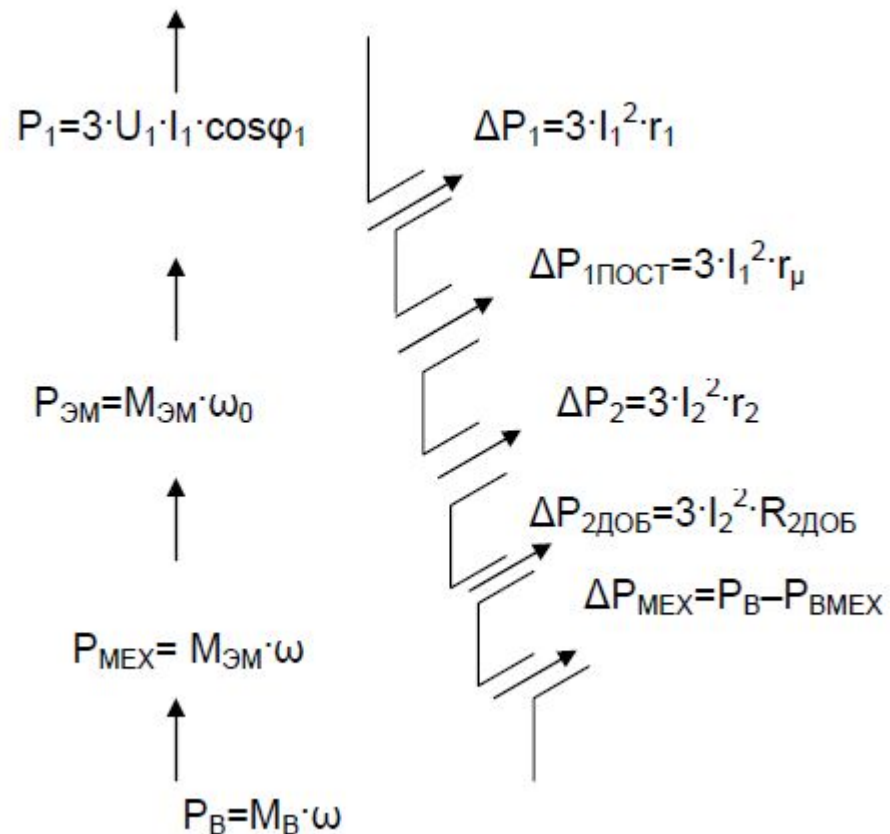
1) изменение знака статического момента от  $M_C$  на  $M_{C1} < 0$ , двигатель переходит из двигательного режима работы в режим рекуперации через точку синхронной скорости  $\omega_0$ ;

2) спуск груза – при неизменном знаке  $M_C$  двигатель вращается в обратную сторону, и под действием груза переходит в режим рекуперации со скоростью выше синхронной скорости ( $\omega > \omega_{0H}$ );

3) при снижении частоты напряжения на статоре (вариант питания двигателя от преобразователя частоты) снижается синхронная скорость  $\omega_0 < \omega_{0H}$ . Двигатель осуществляет переход из двигательного режима работы в режим рекуперации. На участке механической характеристики – от начальной скорости до  $\omega_0$  – двигатель работает в режиме рекуперативного торможения.



# РЕКУПЕРАТИВНОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АД:



Достоинства режима РТ аналогичны режиму РТ ДПТ НВ:

- 1) жёсткие механические характеристики;
- 2) высокая экономичность, избыточная электрическая энергия возвращается в сеть.
- 3) необходимость наличия потребителя энергии рекуперации отпадает при распределении электроэнергии на переменном токе.

Недостатком режима РТ является потребление из сети реактивной энергии при возвращении в сеть активной энергии, в результате токовая нагрузка сети практически не снижается.

Область применения рекуперативного торможения ограничена грузоподъемными механизмами и системами ПЧ – АД.

# ТОРМОЖЕНИЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ АД:

Это тормозной режим, когда двигатель включен для одного направления вращения, но под действием внешних сил вращается в противоположную сторону.

Двигатель получает избыточную механическую энергию с вала, преобразует ее в электрическую энергию. Статор двигателя для обеспечения режима ПВ подключен к сети, из сети потребляется энергия. Так избыточная механическая энергия с вала, преобразованная в электрическую, и электрическая энергия из сети рассеиваются на добавочных сопротивлениях.

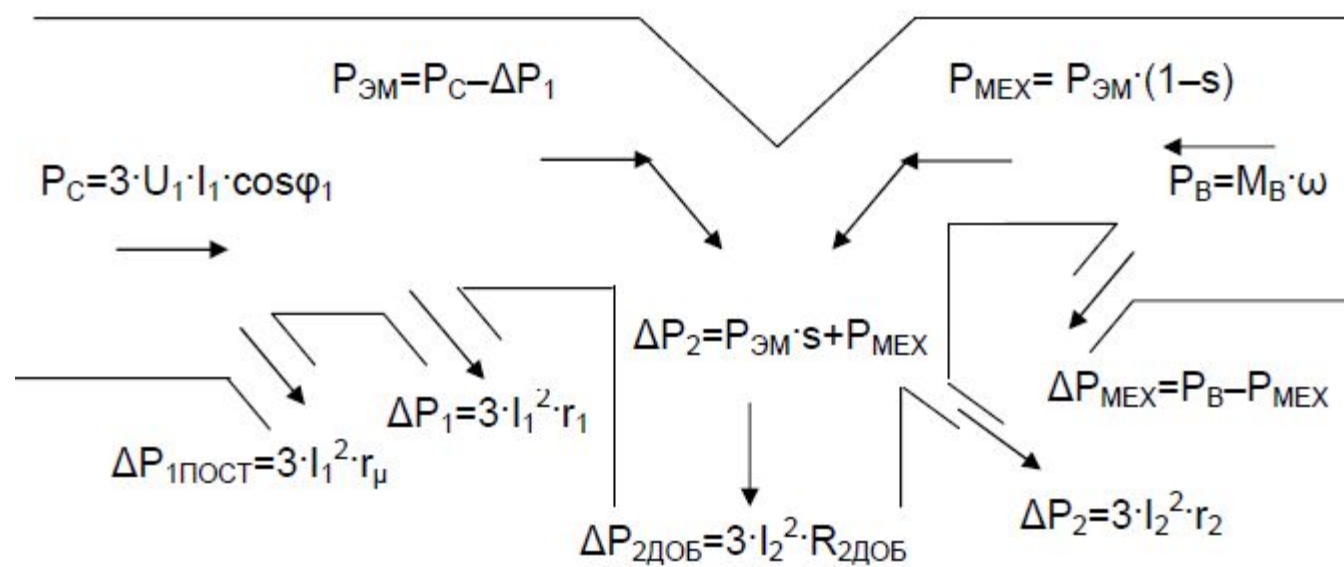
Режим ПВ обеспечивается:

– при активном статическом моменте  $M_C$  путем увеличения добавочного сопротивления в цепи ротора до значения  $R_{1ДОБ} + R_{2ДОБ} + R_{ПВДОБ}$ , когда момент короткого замыкания  $M_{КЗ}$  станет меньше статического момента  $M_C$  ( $M_{КЗ} < M_C$ ) – двигатель работает в точке 2;

– для остановки двигателя по окончании движения в одном направлении реверсируется напряжение на статоре, а в цепь ротора вводятся добавочные сопротивления. В результате этих переключений двигатель из точки 1

# ТОРМОЖЕНИЕ ПРОТИВОВКЛЮЧЕНИЕМ АД:

Достоинства режима торможения противовключением (интенсивное торможение до полной остановки, простота осуществления) и его недостатки (неудовлетворительная энергетика, мягкие характеристики, необходимость отключения привода при скорости, близкой к нулю) определяют область применения режима. Она распространяется на электроприводы относительно небольшой мощности, где потери относительно невелики, а простота осуществления режима имеет существенное значение.



# РЕЖИМ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АД:

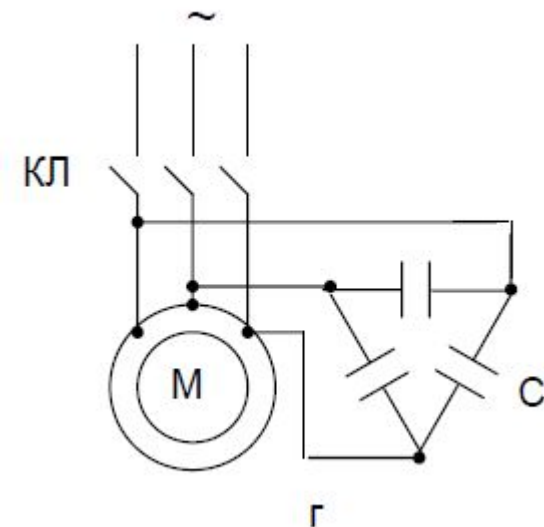
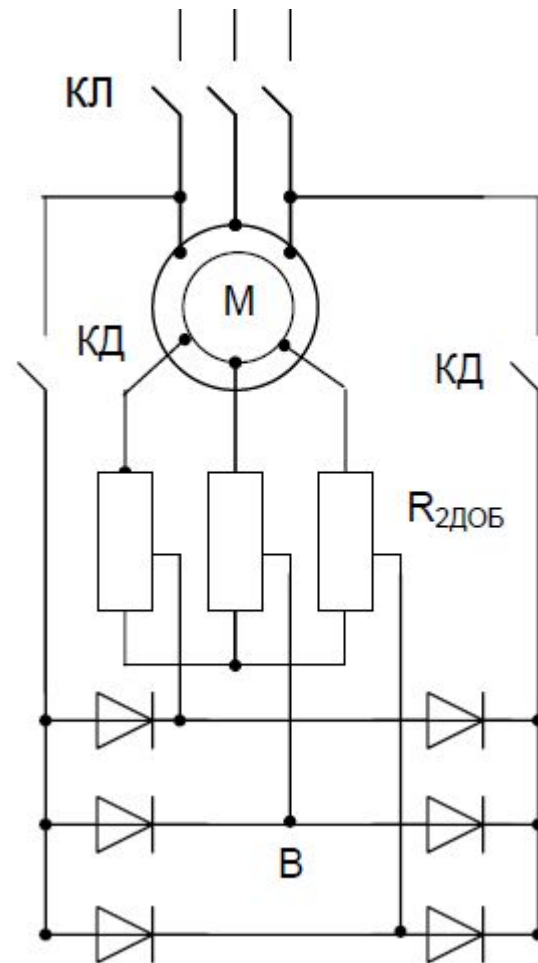
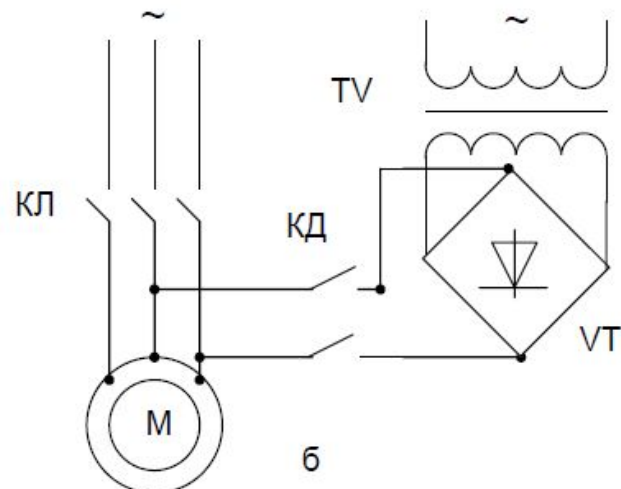
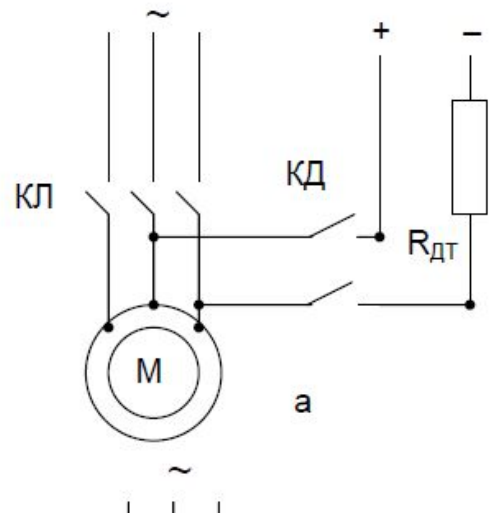
Режимом динамического торможения называют режим торможения, когда двигатель избыточную электрическую энергию рассеивает на отдельно включённый резистор. При этом обмотка статора обеспечивает поток в машине, а роторные обмотки замыкаются на добавочное сопротивление.

Для асинхронного двигателя разработано несколько вариантов схем. Их основное отличие – обеспечение независимого возбуждения или создание условий для самовозбуждения двигателя. На рис. приведены некоторые из них. Наиболее распространенными являются схемы с независимым возбуждением, когда обмотки статора подключаются к источнику постоянного тока:

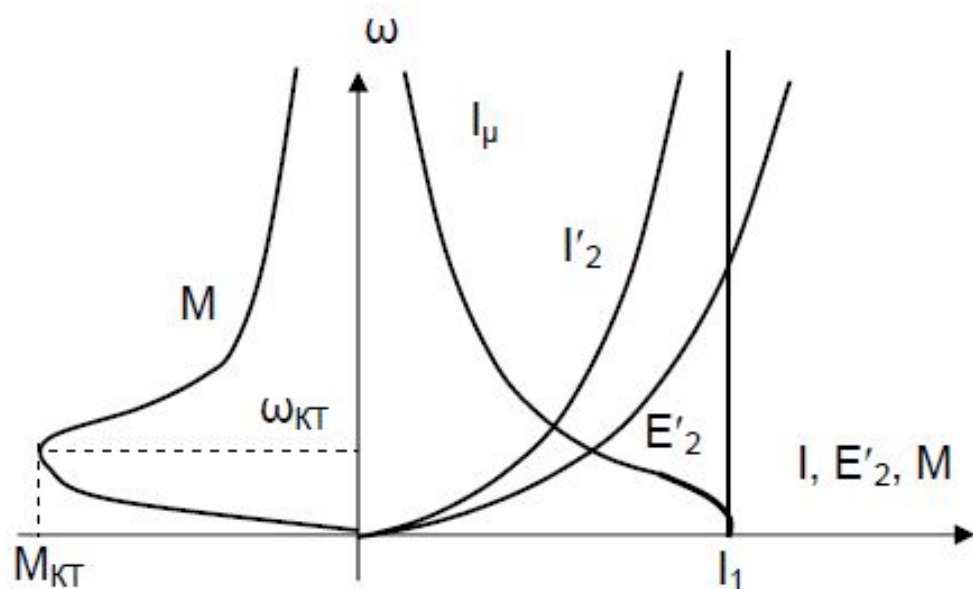
- к сети через добавочное сопротивление РДТ (схема а);
- через понижающий трансформатор TV и выпрямитель VT (схема б).

В схемах с самовозбуждением используется поток остаточного намагничивания с последующим ростом потока за счет подключения ЭДС ротора к обмоткам статора (схема в) или за счет создания колебательного контура индуктивного сопротивления обмоток с подключенными к обмоткам статора емкостями С.

# РЕЖИМ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АД:

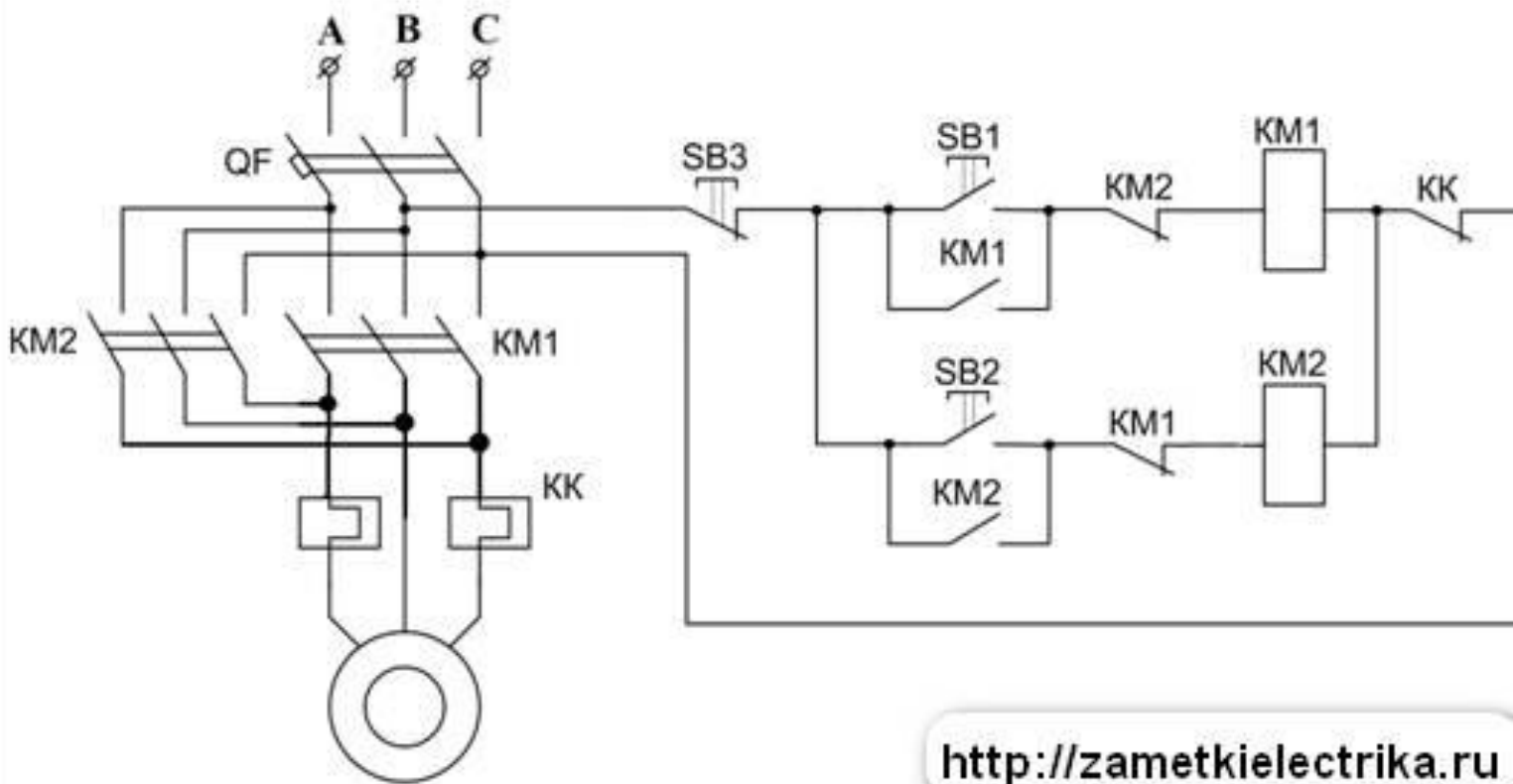


# РЕЖИМ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ АД:



Рассмотрим динамическое торможение с независимым возбуждением (схемы а, б). По обмоткам статора протекает постоянный ток, создавая неподвижное в пространстве магнитное поле. В обмотке ротора наводится ЭДС, амплитуда и частота которой соответствует скорости вращения ротора. В короткозамкнутом роторе (при замыкании фазного ротора на сопротивление) протекает ток, от взаимодействия которого с потоком создается тормозной момент. Под действием этого момента  $M$  и статического момента  $M_C$  скорость ротора снижается, уменьшается ЭДС, а вместе с ней – ток и момент двигателя. При  $\omega = 0$  ЭДС, ток ротора и момент двигателя отсутствуют.

# РЕВЕРС АД:



<http://zametkielectrika.ru>

Для смены направления вращения ротора двигателя, необходимо поменять местами две из трех фаз статорной обмотки. После этого вращающееся магнитное поле статора изменит свое направление вращения, но ротор вращаясь в прежнем направлении и обладая инерцией под действием магнитного поля статора начнет затормаживаться до полной остановки, а затем начнет вращаться в новом направлении.

# ЗАДАЧА:

Для двигателя типа 4А160S с параметрами:  $P_{\text{ном}} = 15$  кВт,  $n_{\text{ном}} = 1465$  об/мин,  $I_{1\text{ном}} = 29,3$  А,  $\lambda_k = M_k / M_{\text{ном}} = 2,3$ ,  $K_I = I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}} = 7$ ,  $p = 2$ ,  $f_{1\text{ном}} = 50$  Гц,  $U_{1\text{ном}} = 380$  В рассчитать добавочное сопротивление  $R_d$ , включение которого в три фазы двигателя уменьшит пусковой ток в 2 раза ( $\alpha = 0,5$ ).

## Решение:

1. Определяем пусковой ток статора без резистора:  $I_{\text{п.е}} = \lambda_1 I_{1\text{ном}} =$
2. Определим по формуле полное сопротивление КЗ:  $z_k = U_{1\text{ном}} / (\sqrt{3} I_{1\text{ном}}) =$
3. Принимая коэффициент мощности при пуске  $\cos \varphi_{\text{пуск}} = 0,4$  определим активное сопротивление КЗ:  $r_k = z_k \cos \varphi_{\text{п}} =$   
и индуктивное сопротивление КЗ:  $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} =$
4. Найдем искомое сопротивление:

$$R_{1d} = \sqrt{(z_k / \alpha)^2 - x_k^2} - r_k$$



# ЗАДАЧА. РЕШЕНИЕ:

## Решение:

1. Определяем пусковой ток статора без резистора:

$$I_{1п.е} = \lambda_1 I_{1ном} = 7 \cdot 29,3 = 205 \text{ А.}$$

2. Определим по формуле полное сопротивление КЗ:

$$z_k = U_{1ном} / (\sqrt{3} I_{1ном}) = 380 / (1,73 \cdot 205) = 1,08 \text{ Ом.}$$

3. Активное сопротивление КЗ:  $r_k = z_k \cos \phi_n = 1,08 \cdot 0,4 = 0,43 \text{ Ом}$   
и индуктивное сопротивление КЗ:  $x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{1,08^2 - 0,43^2} = 1 \text{ Ом.}$

4. Найдем искомое сопротивление:

$$R_{1д} = \sqrt{(z_k / \alpha)^2 - x_k^2} - r_k = \sqrt{(1,08 / 0,5)^2 - 1^2} - 0,43 = 1,5 \text{ Ом.}$$

# КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ:

1. Назовите виды пуска АД
2. Для каких АД используется реостатный пуск?
3. В чем заключается принцип рекуперативного торможения АД?
4. Назовите достоинства и недостатки рекуперативного торможения АД.
5. В чем заключается принцип торможения противовключением АД?
6. Назовите достоинства и недостатки торможения противовключением АД.
7. В чем заключается принцип динамического торможения АД?
8. Назовите 4 схемы, по которым можно осуществить динамическое торможение АД.
9. Как осуществить реверс АД?