

# АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

ЭП с трехфазным асинхронным двигателем (АД) является самым массовым видом привода в промышленности, коммунальном и сельском хозяйстве:

- простотой изготовления и эксплуатации АД,
- меньшими по сравнению с ДПТ массой,
- габаритными размерами и стоимостью,
- высокой надежностью в работе.

Общепромышленную серию:

- 4А входят АД с мощностью от 0,06 до 400 кВт;
- высотами осей вращения от 50 до 355 мм.

Выпускаются самых различных модификаций и конструктивных исполнений:

- с повышенными пусковым моментом и скольжением;
- с фазным ротором;
- встраиваемые;
- малошумные;
- со встроенной температурной защитой;
- с электромагнитным тормозом;
- с подшипниками скольжения;
- химостойкие.

АД различаются также по климатическому исполнению и категории размещения.

Для комплектации ЭП большой мощности выпускаются АД:

- серий АН-2 (мощностью до 2000 кВт),
- АВ (мощностью до 8000 кВт),
- ДАЗО (мощностью до 1250 кВт) и ряд других.

**Для ЭП крановых механизмов:**

- специализированные АД серий МТФ (с фазным ротором);
- (с короткозамкнутым ротором).

**Для рабочих машин и механизмов металлургического производства:**

- АД серий МТН (с фазным ротором);
- МТКН (с короткозамкнутым ротором).

**Крановые и металлургические АД новой серии 4МТ, отличаются:**

- повышенной механической прочностью,
- большими пусковыми моментами при сравнительно небольших пусковых токах, хорошими динамическими показателями;
- улучшенными технико-экономическими показателями работы;
- расширенной шкалой мощностей;
- более высоким уровнем стандартизации.

**В составе этих серий выпускаются и многоскоростные.**

**Двигатели серии АИ с мощностью от 0,75 до 160 кВт имеют унифицированные по международным стандартам параметры.**

**Электротехническая промышленность выпускает АД серий В и ВР для работы во взрывоопасных и пожароопасных средах.**

# Электромеханическая характеристика

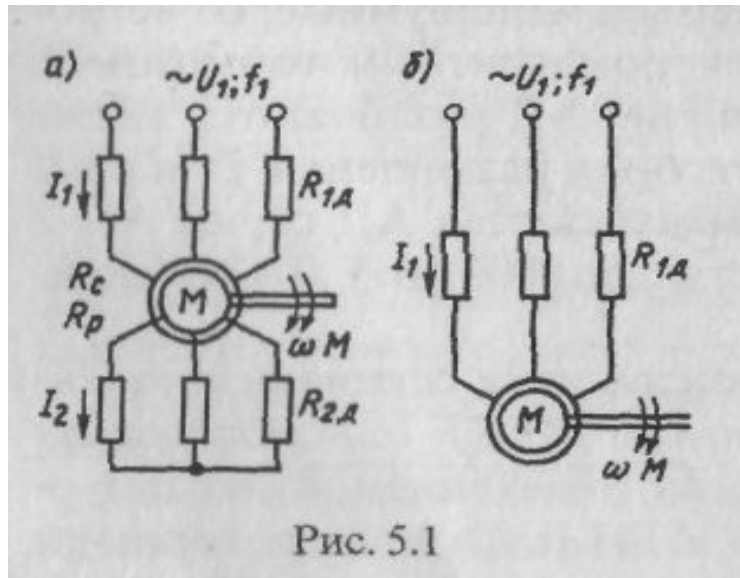
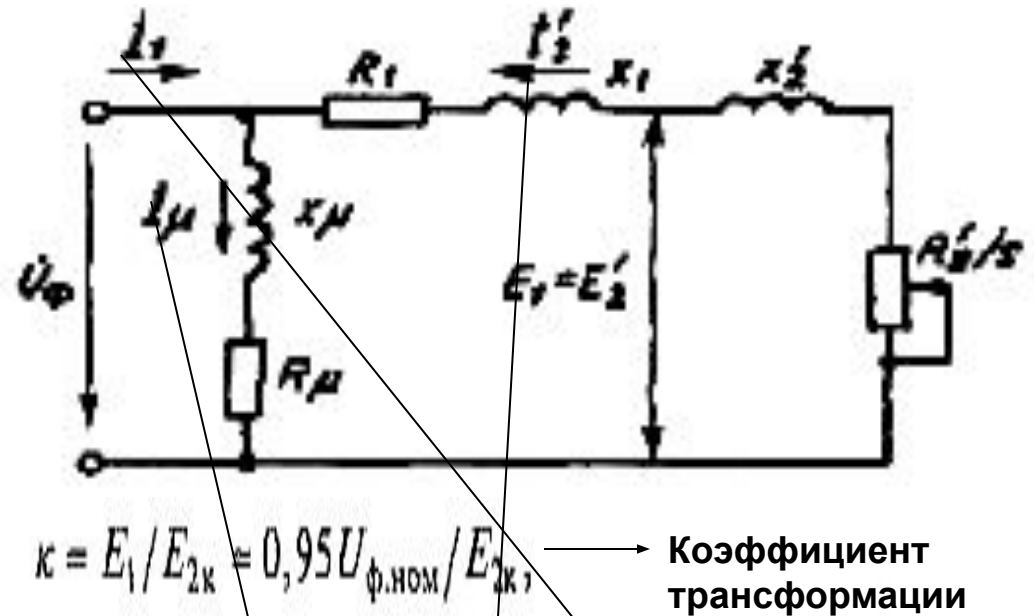


Рис. 5.1



где  $E_1$  и  $E_{2\kappa}$  – фазные ЭДС статора и ротора при неподвижном роторе;  $U_{\phi, \text{ном}}$  – фазное номинальное напряжение сети,

$$E'_2 = E_{2\kappa} \kappa = E_1; I'_2 = I_2 / \kappa; R'_2 = R_{2\kappa} \kappa^2; x'_2 = x_{2\kappa} \kappa^2,$$

$$I'_2 = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + x_{\kappa}^2},$$

$$\omega = \omega_0(1-s), \leftrightarrow s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$$

Комплексные фазные токи статора, намагничивания и приведенный ток ротора

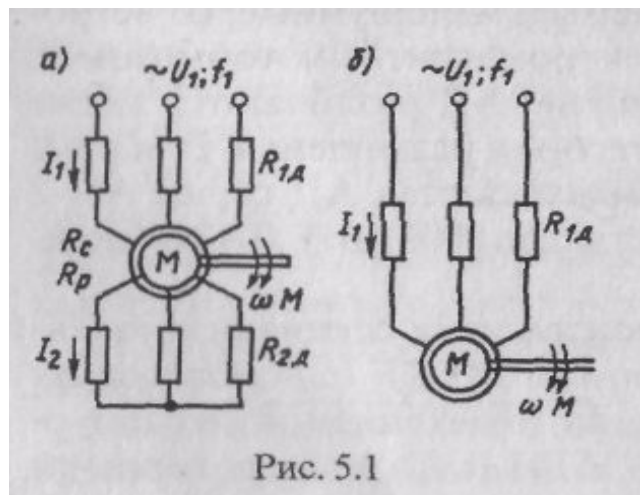
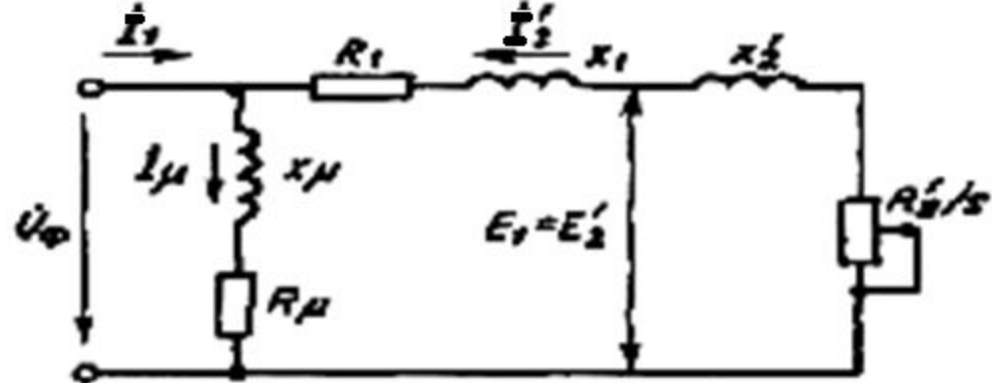


Рис. 5.1

$U_1, U$  – соответственно действующее значение линейного и комплексное фазного напряжения сети;

$I_1, I_\mu, I_2'$  – соответственно комплексные фазные токи статора, намагничивания и приведенный ток ротора;

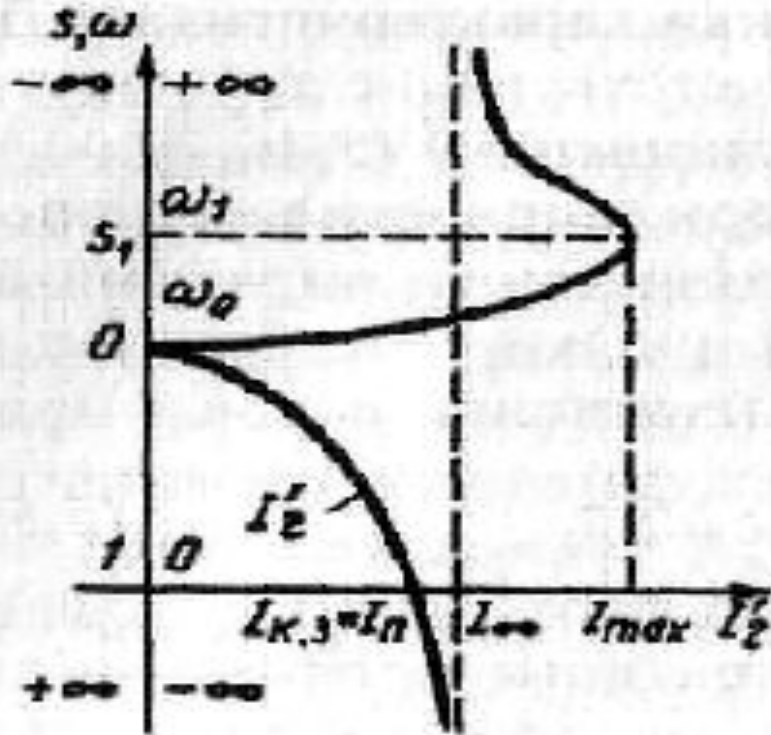
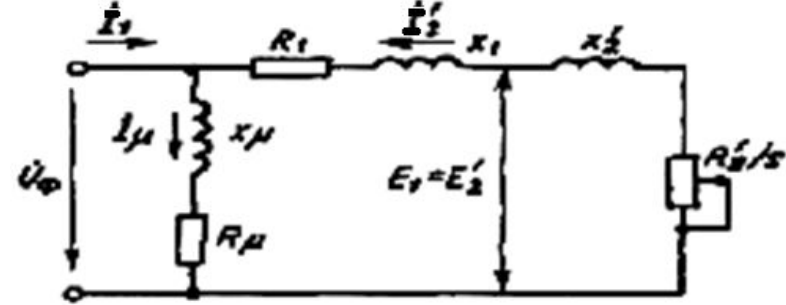
$x_1, x_2'$  – соответственно индуктивные сопротивления от потоков рассеяния фазы обмотки статора и приведенное фазы ротора;

$x_\mu$  – индуктивное сопротивление контура намагничивания;

$R_c, R_{1\Delta}, R_1 = R_c + R_{1\Delta}$  – соответственно активные фазные сопротивления обмотки статора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы статора;

$R_p, R_{2\Delta}, R_2 = R_p + R_{2\Delta}$  – соответственно активные приведенные к обмотке статора фазные сопротивления обмотки ротора, добавочного резистора и суммарное сопротивление фазы ротора;

# Электромеханическая характеристика



$$I'_2 = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2}$$

$$\omega = \omega_0(1 - s).$$

$x_k = x_1 + x'_2$  - индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания.

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$$

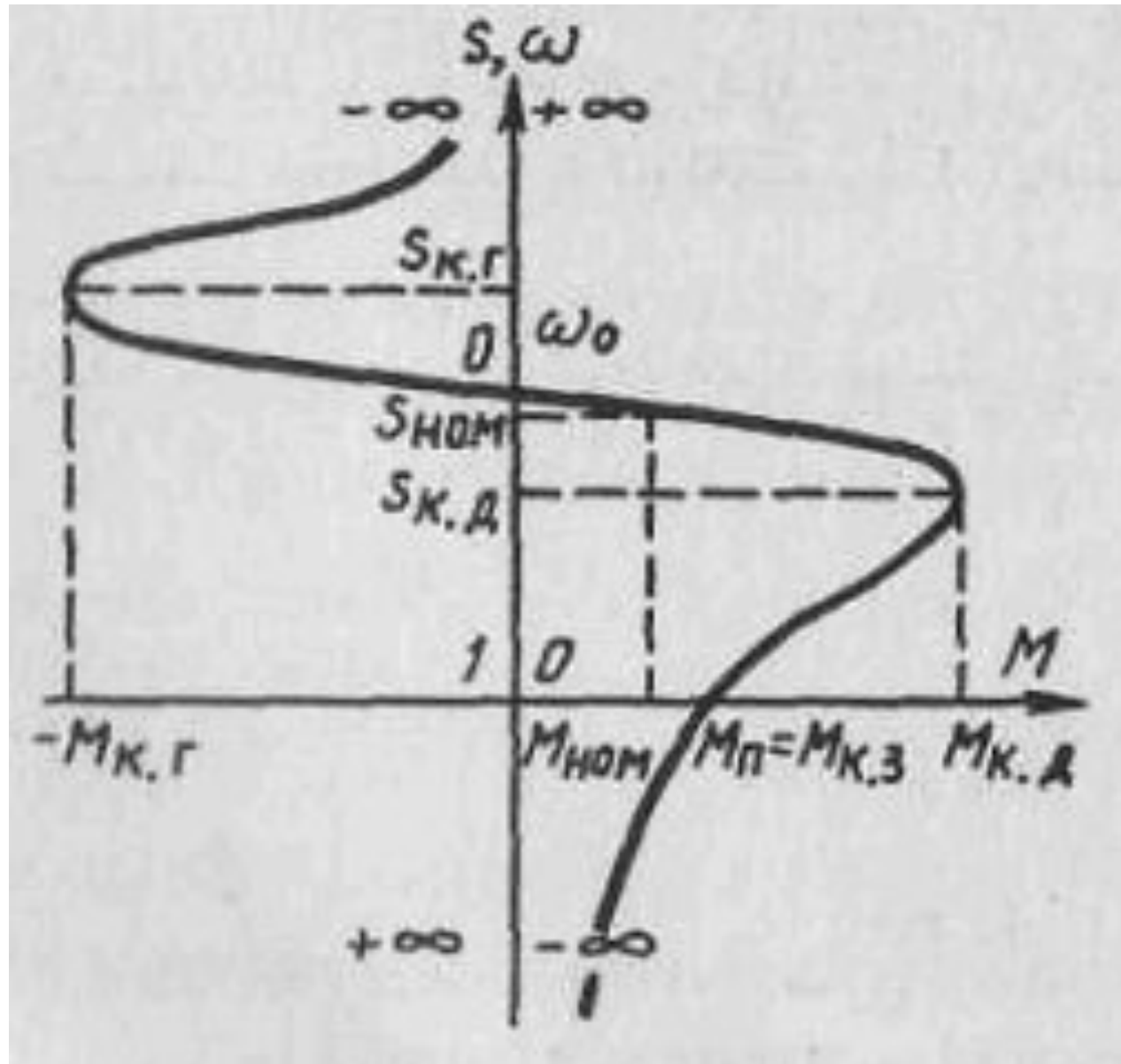
$s = 0, \omega = \omega_0, I'_2 = 0$  - точка идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0, I'_2 = I_{кз} = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + x_k^2}$  - точка короткого замыкания;

$s_1 = -R'_2/R_1, \omega_1 = \omega_0(1 + s_1), I'_2 = I_{max} = U_{\phi} / x_k$  - точка максимального значения тока ротора, лежащая в области отрицательных скольжений;

$s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \pm\infty, I'_2 \rightarrow I_{\infty} = U_{\phi} / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$  - асимптота тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

# Механическая характеристика



$$\Delta P_2 = P_{эм} - P_2 = M\omega_0 - M\omega = M\omega_0 s.$$

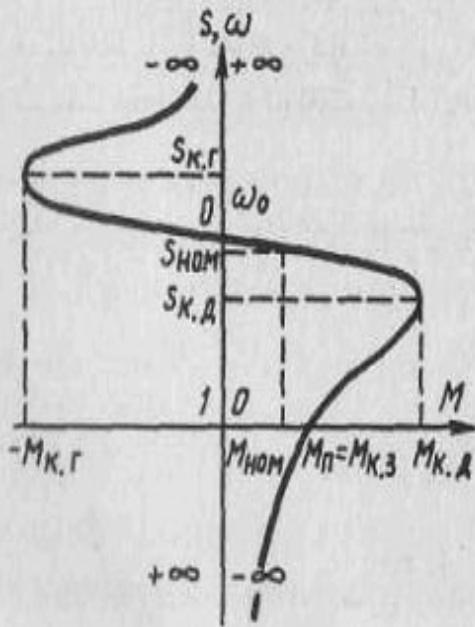
$$\Delta P_2 = 3 I_2'^2 R_2'.$$

$$M = 3 I_2'^2 R_2' / (\omega_0 s).$$

$$M = 3 U_\Phi^2 R_2' / [\omega_0 s ((R_1 + R_2'/s)^2 + x_k^2)].$$

$$M_k = 3 U_\Phi^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})];$$

$$s_k = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_k^2},$$



$$M = 2M_k (1 + as_k) / (s_k/s + s/s_k + 2as_k),$$

где  $a = R_1/R_2'$ .

Характерные точки механической характеристики следующие:

$s = 0, \omega = \omega_0, M = 0$  – точка идеального холостого хода;

$s = 1, \omega = 0, M = M_{кз} = M_{п}$  – точка короткого замыкания;

$s = s_{к.д}, M = M_{к.д}$ ;  $s = -s_{к.г}, M = -M_{к.г}$  – критические точки соответственно в двигательном и генераторном режимах;

$s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \pm\infty, M \rightarrow 0$  – асимптота механической характеристики, которой является ось скорости.

$$M = 2M_K / (s/s_K + s_K/s);$$

$$M_K = 3U_{\Phi}^2 / (2\omega_0 x_K);$$

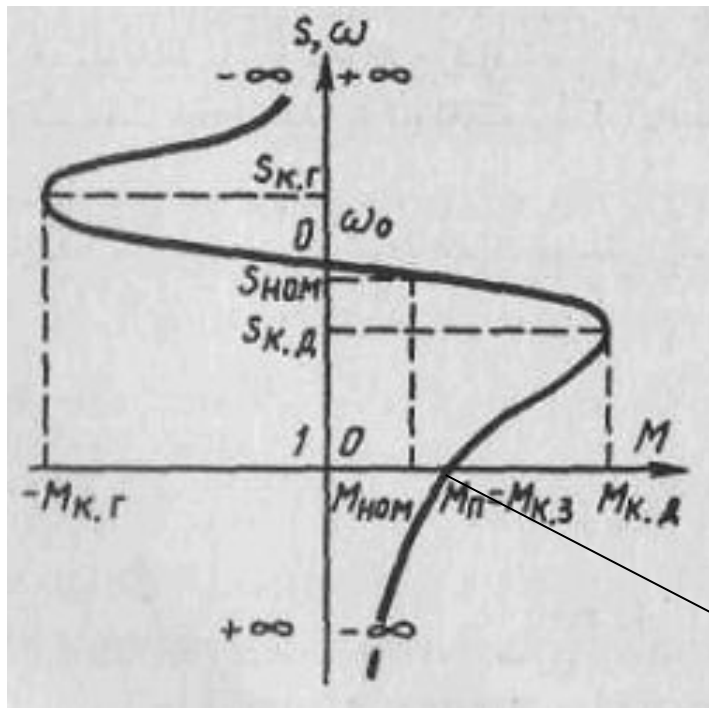
$$s_K = R'_2 / x_K.$$

$$\lambda_m = M_K / M_{НОМ}$$

$$s_K = s_{НОМ} \left( \lambda_m \pm \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right)$$

$$M = 2M_K s / s_K.$$

$$a = R_1 / R'_2$$



АД может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяются значением и знаком скольжения, а именно:

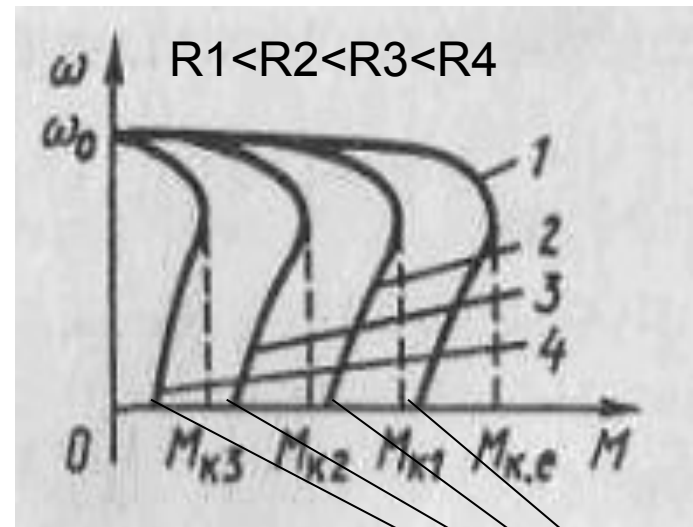
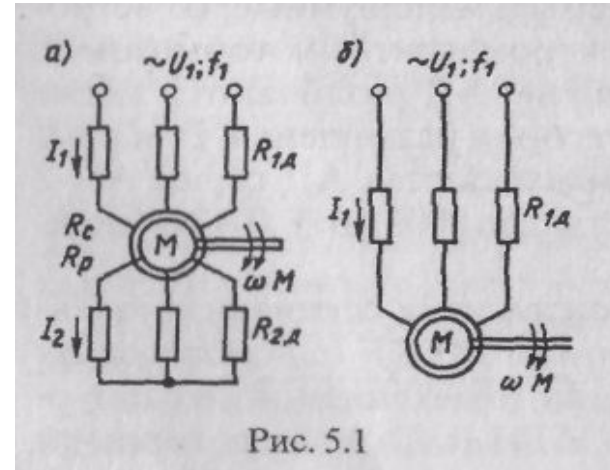
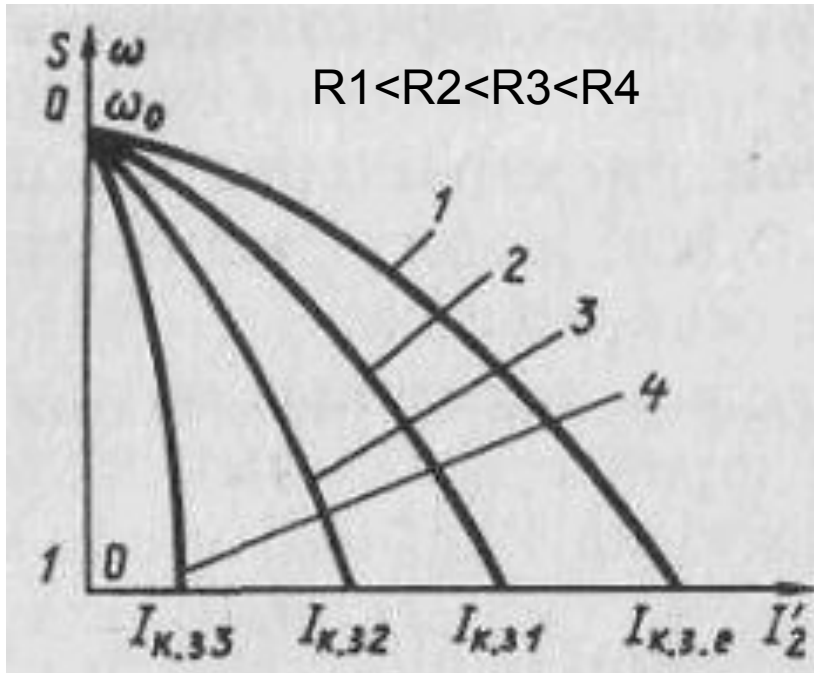
- $s = 0, \omega = \omega_0$  – режим идеального холостого хода;
- $s = 1, \omega = 0$  – режим короткого замыкания;
- $0 < s < 1, 0 < \omega < \omega_0$  – двигательный режим;
- $s < 0, \omega > \omega_0$  – генераторный режим при работе АД параллельно с сетью (рекуперативное торможение);
- $s > 1, \omega < 0$  – генераторный режим при работе АД последовательно с сетью (торможение противовключением).

Пусковой момент



# Регулирование координат АД с помощью резисторов

Включение резисторов в цепь статора



Пусковой момент

$$I'_2 = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2}$$

$$M = 3U_\phi^2 R'_2 / [\omega_0 s ((R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2)]$$

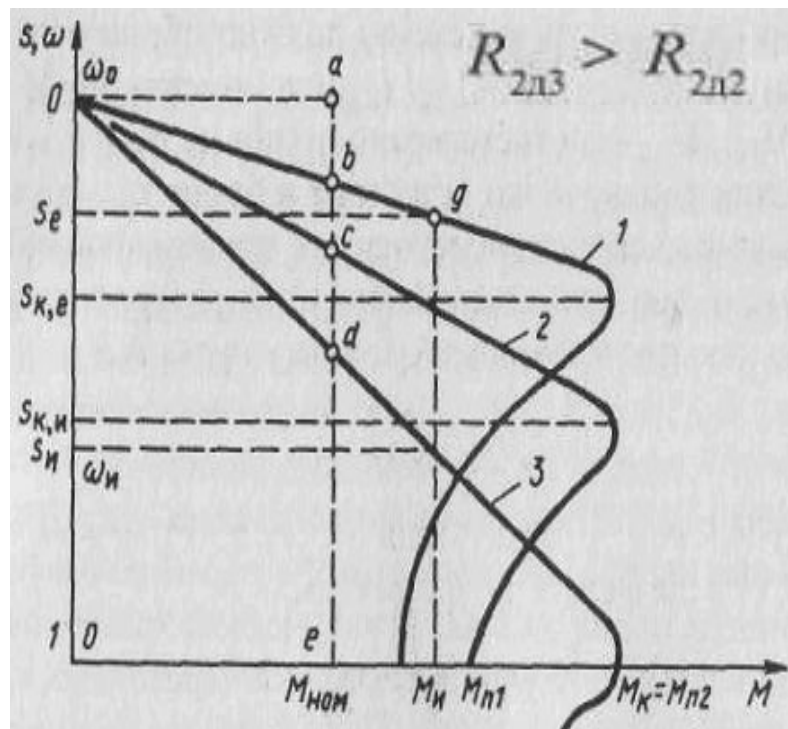
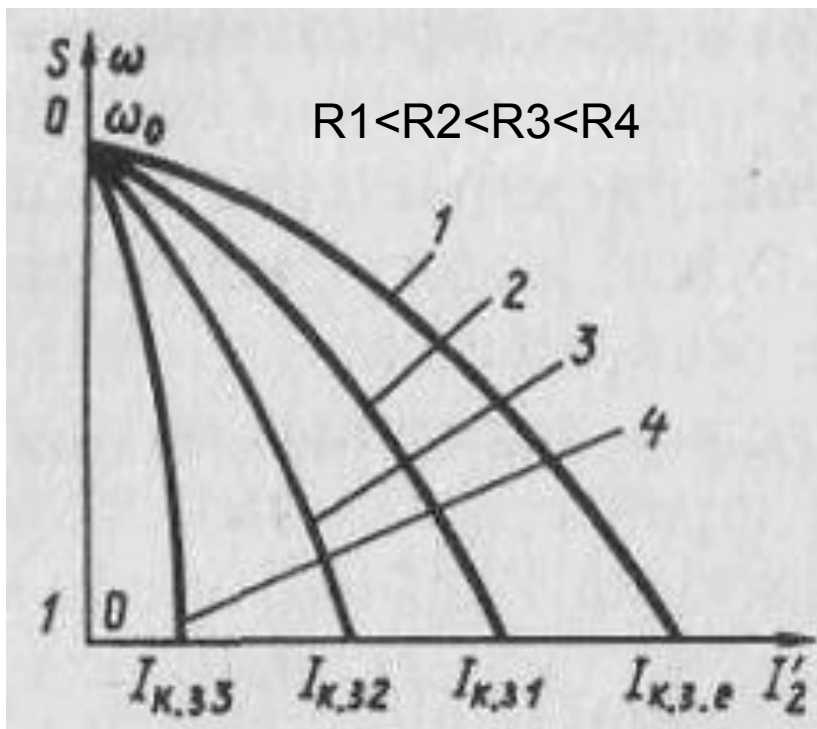
$$M_k = 3U_\phi^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})]$$

$$s_k = \pm R'_2 / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$$

$$M = 2M_k (1 + as_k) / (s_k/s + s/s_k + 2as_k)$$

# Включение резисторов в цепь ротора

$$\omega = \omega_0(1 - s), \quad s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$$



$$I'_2 = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2}$$

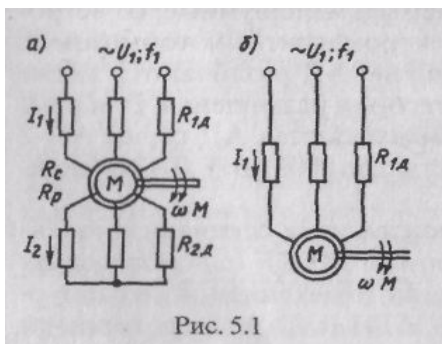


Рис. 5.1

$$M = 3U_\phi^2 R'_2 / [\omega_0 s ((R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2)]$$

$$M_K = 3U_\phi^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})]$$

$$s_K = \pm R'_2 / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$$

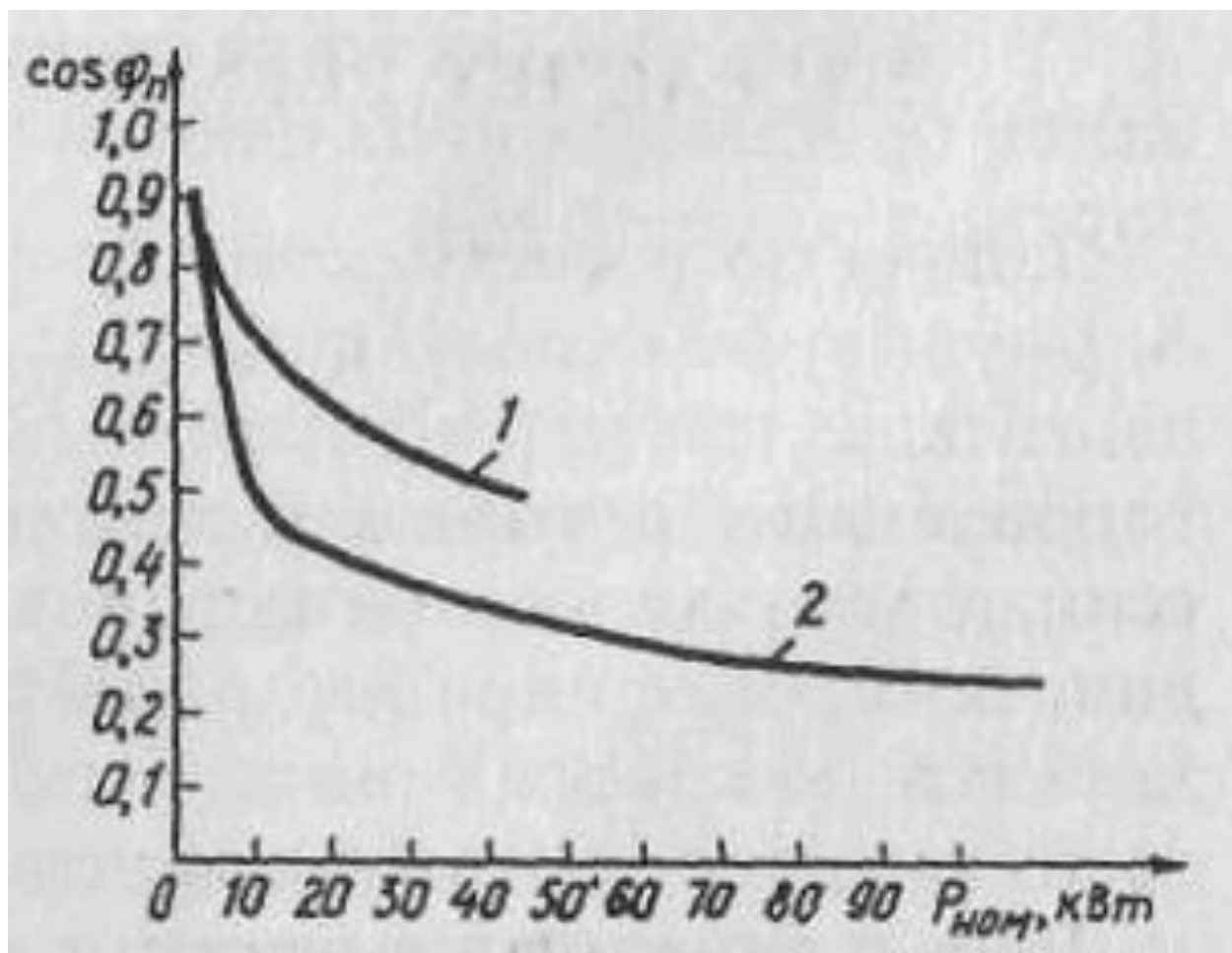
$$z_K = U_{1\phi} / \sqrt{3} I_{1n.c.}$$

$$r_K = z_K \cos \varphi_{\Pi},$$

$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2},$$

$$R_{1Д} = \sqrt{(z_K / \alpha)^2 - x_K^2} - r_K;$$

$$R_{1Д} = \sqrt{(z_K / \mu)^2 - x_K^2} - r_K.$$



$$s_{к.е} / s_{к.н} = R'_p / (R'_p + R'_{2д1}) = R_p / (R_p + R_{2д1}),$$

$$R_{2д1} = R_p (s_{к.н} / s_{к.е} - 1).$$

$$R_{2д2} = R_p (s_{н} / s_{е} - 1),$$

$$R_p = E_{2к} s_{НОМ} / (\sqrt{3} I_{2НОМ}).$$

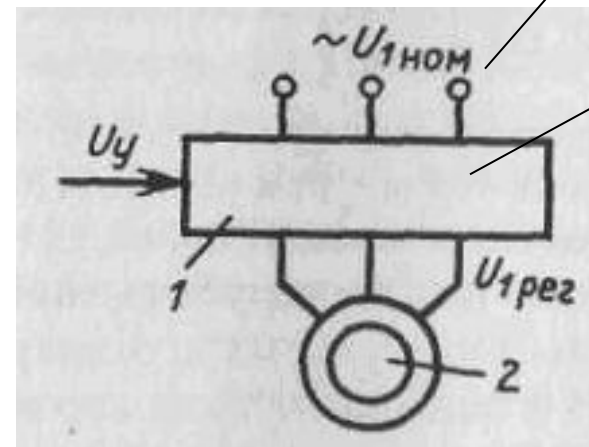
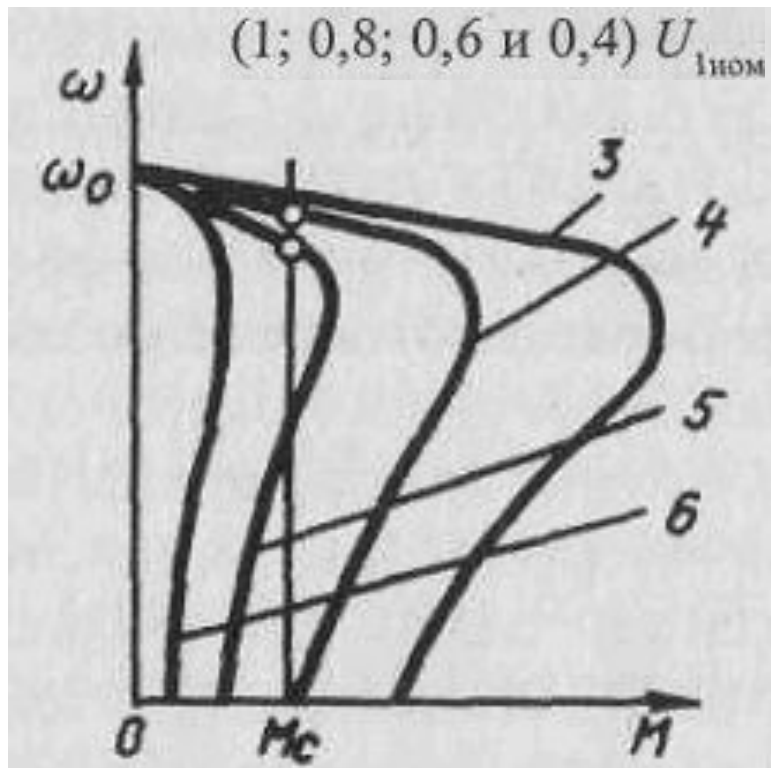
$$R_{2д1} = R_{НОМ} bc/ae,$$

$$R_{НОМ} = E_{2к} / (\sqrt{3} I_{2НОМ})$$

$$R_p = R_{2НОМ} ab/ae.$$

$$m = \lg(1/s_{НОМ} M_1) / \lg(M_1/M_2).$$

## Регулирование координат АД изменением напряжения



Разомкнутая схема

ТРП, а/тр., м.у.

$$M = 3U_{\phi}^2 R_2' / [\omega_0 s ((R_1 + R_2'/s)^2 + x_k^2)].$$

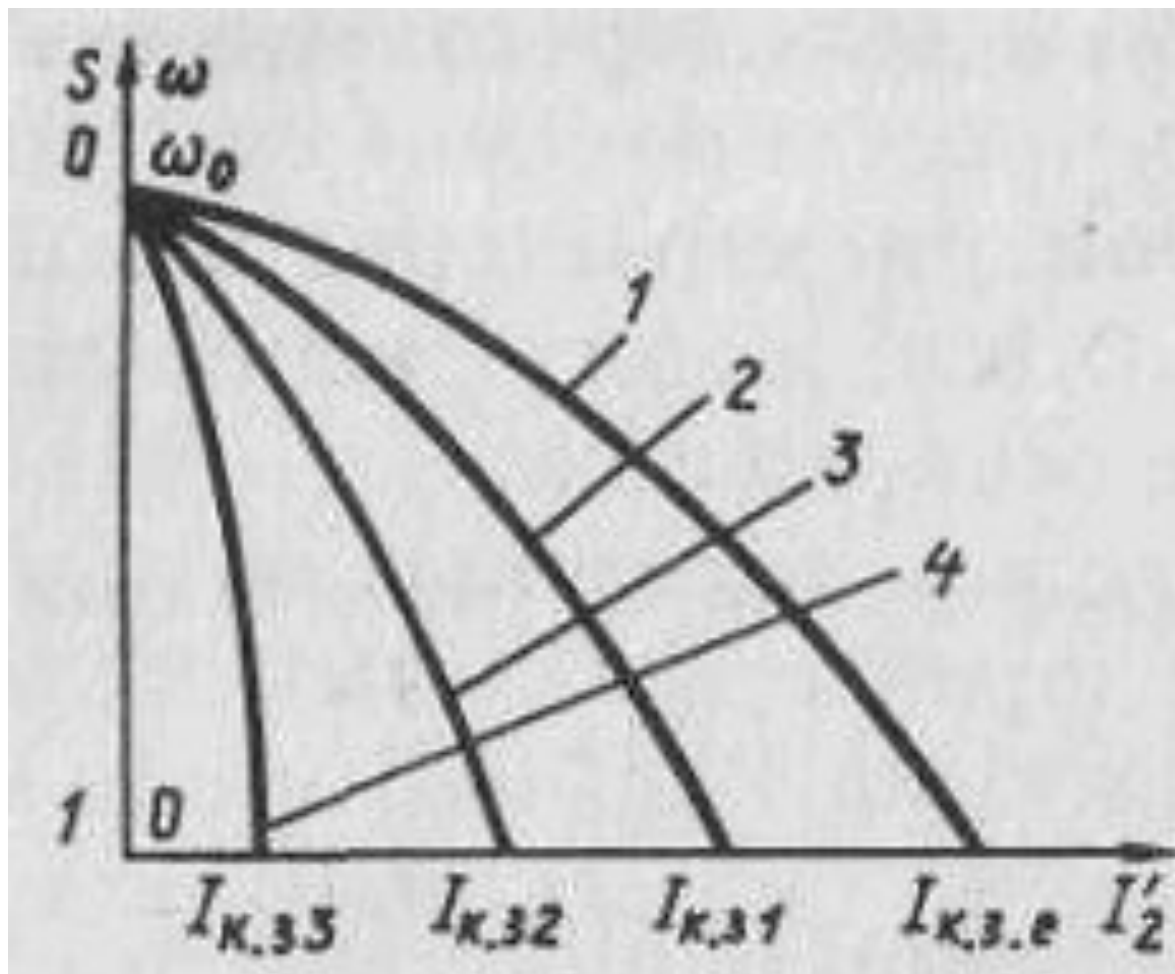
$$M_k = 3U_{\phi}^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})];$$

$$s_k = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_k^2},$$

Регулирование мало пригодно, т.к. резко снижается критический момент и тем самым перегрузочная способность. (Под перегрузочными свойствами электродвигателей следует понимать способность двигателя к перегрузкам по моменту и по величине тока. Обычно перегрузочные свойства характеризуются **отношением максимального момента (тока) к номинальному его значению.**)

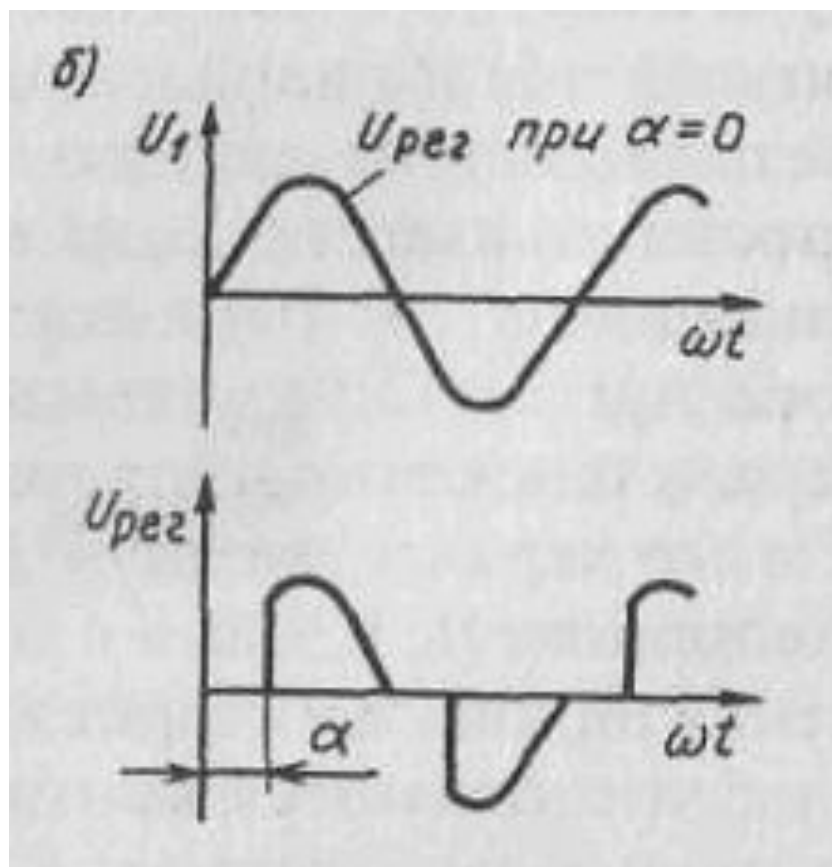
**Используют лишь для воздействия в переходных процессах, например, для регулирования заданного ускорения или натяжения на исполнительном органе машины.**

$$I'_2 = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + X_{K2}^2}$$

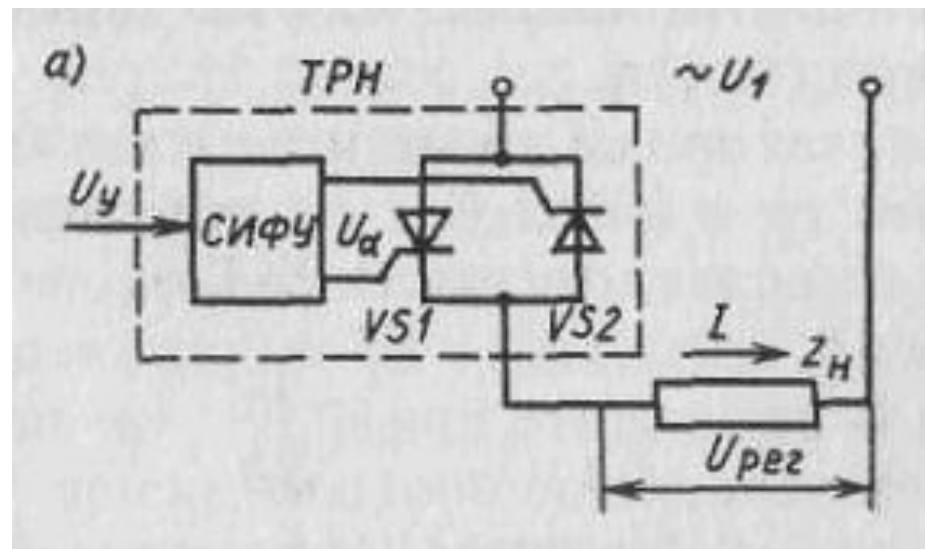




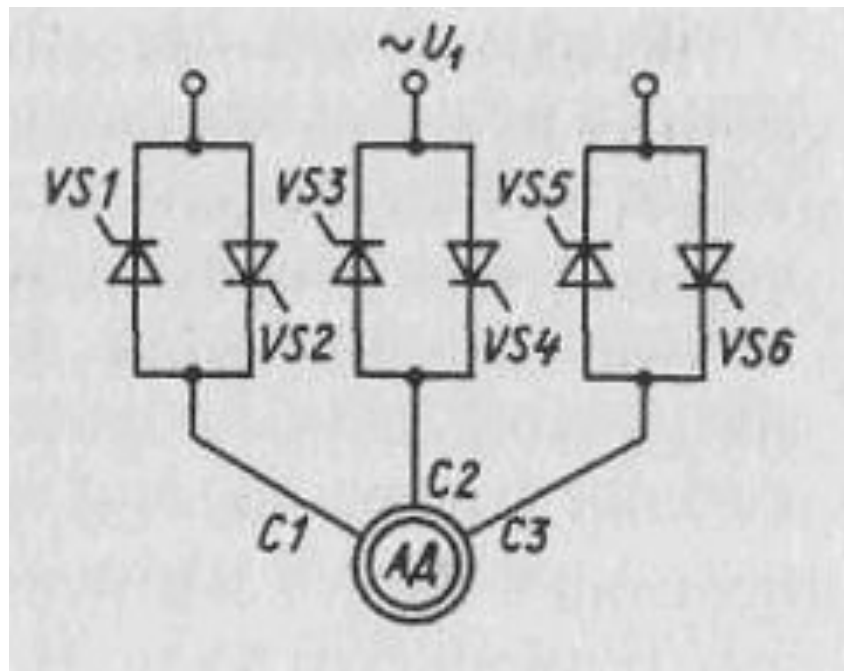
## Силовая часть однофазного ТРН



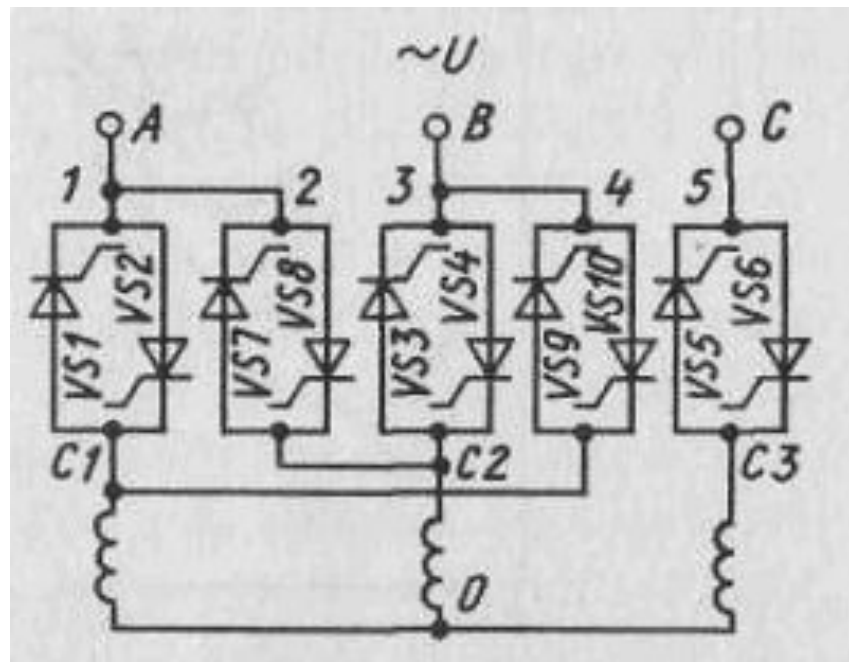
Встречно-параллельная схема



Трехфазная схема ТРН



Реверсивная схема ТРН



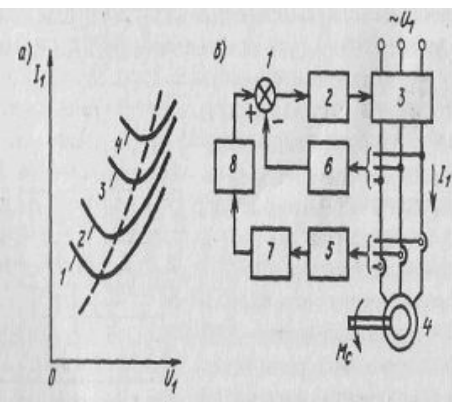
# Повышение экономичности АД с помощью регулятора напряжения

Как известно из теории электрических машин, при небольших нагрузках КПД асинхронного двигателя и коэффициент мощности снижаются, что ухудшает экономические показатели его работы.

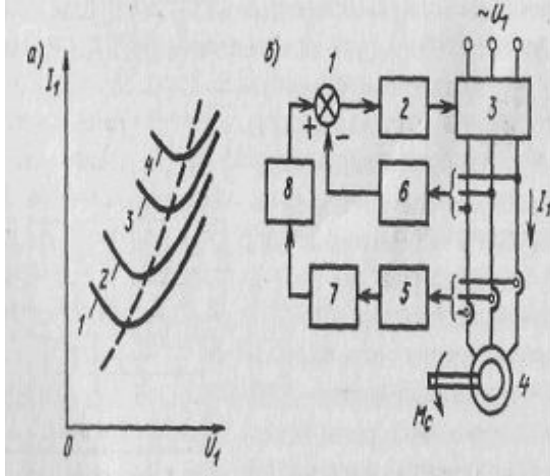
**Регулирование напряжения на статоре АД в сторону его уменьшения позволяет повысить экономичность его работы при небольших механических нагрузках и холостом ходе ЭП.**

Поскольку число асинхронных ЭП в промышленности и коммунальном хозяйстве очень велико, то эффект от регулирования напряжения с целью повышения их энергетических показателей может быть весьма значительным.

Рассмотрим принципы построения ЭП, в котором минимизируется потребляемый АД ток и тем самым потери электроэнергии в нем. Обратимся к зависимостям тока статора, от напряжения, (рис.) при разных моментах нагрузки.



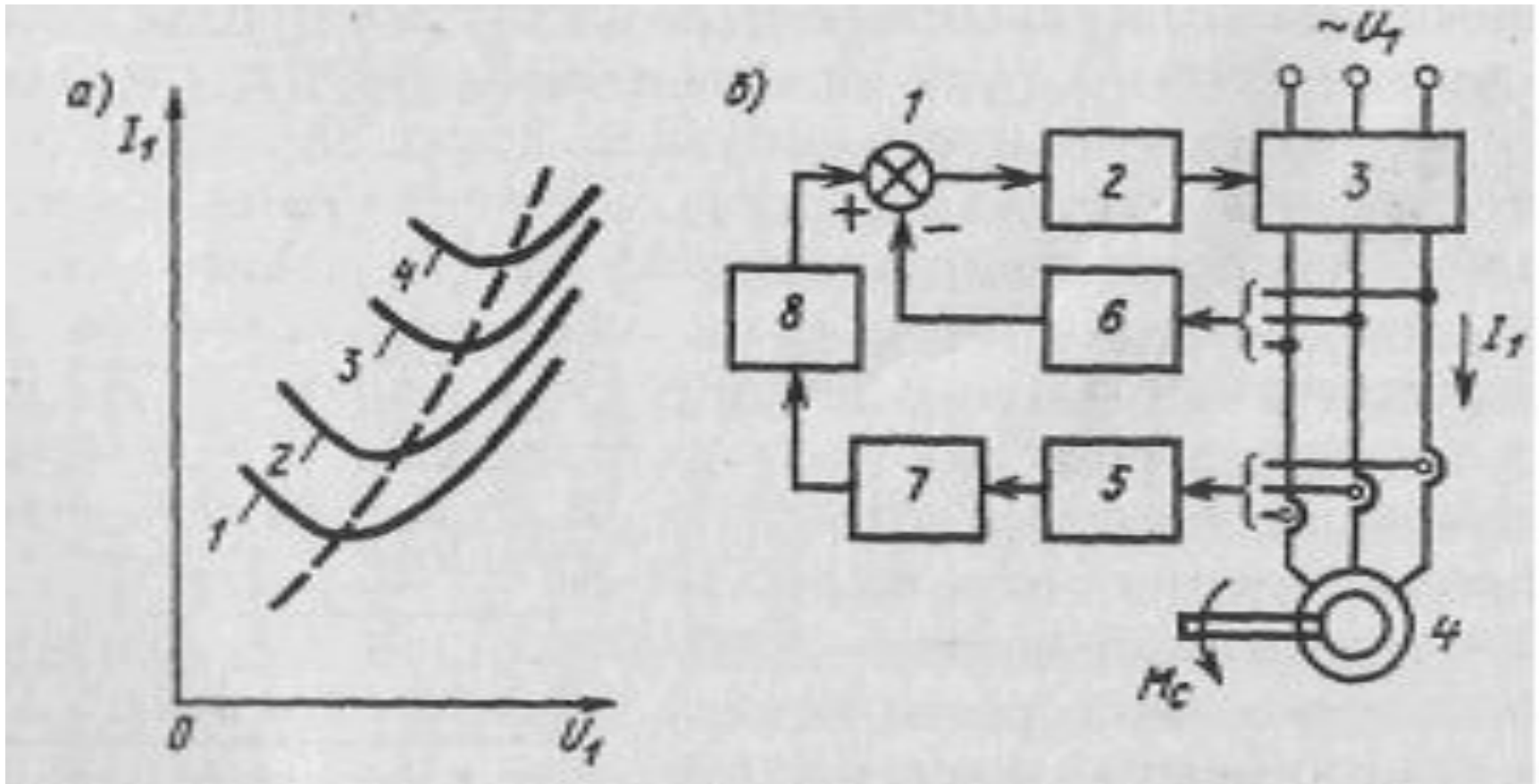
Как видно из графиков 1... 4, построенных соответственно при  $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$ , для каждого момента имеется такое напряжение, при котором потребляемый АД ток из сети минимален. Штриховая линия, проведенная через точки минимумов тока для каждой нагрузки, определяет закон регулирования напряжения в функции тока, при реализации которого при любом  $M_c$  из сети потребляется минимальный ток.



Как видно из графиков 1... 4, построенных соответственно при  $M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$ , для каждого момента имеется такое напряжение, при котором потребляемый АД ток из сети минимален. Штриховая линия, проведенная через точки минимумов тока для каждой нагрузки, определяет закон регулирования напряжения в функции тока, при реализации которого при любом  $M_c$  из сети потребляется минимальный ток.

Схема ЭП с минимизацией потребляемого двигателем тока приведена на рис. 5.13, б. Она включает в себя двигатель 4, регулятор напряжения 3 с СИФУ 2, датчики тока 5 и напряжения 6, функциональный преобразователь 7, инерционное звено 8 и элемент сравнения 1. Требуемый закон управления ЭГТ реализуется с помощью положительной обратной связи по току. Трехфазный датчик 5 вырабатывает пропорциональный току сигнал, поступающий на вход функционального преобразователя 7, который обеспечивает требуемую зависимость между напряжением на АД и моментом нагрузки на его валу (штриховая линия на рис. 5.13, а). В схеме используется вспомогательная отрицательная обратная связь по напряжению (звено 8), с помощью которой обеспечивается необходимое качество переходных процессов. Кроме минимизации потерь электроэнергии, простыми средствами в такой схеме осуществляется повышение КПД и коэффициента мощности асинхронного ЭП. Как показывают теоретические расчеты и экспериментальные данные, регулирование напряжения на статоре позволяет повысить энергетические показатели ЭП на несколько процентов, что при широком применении асинхронных двигателей дает возможность получить большой экономический эффект.

# Повышение экономичности АД с помощью регулятора напряжения



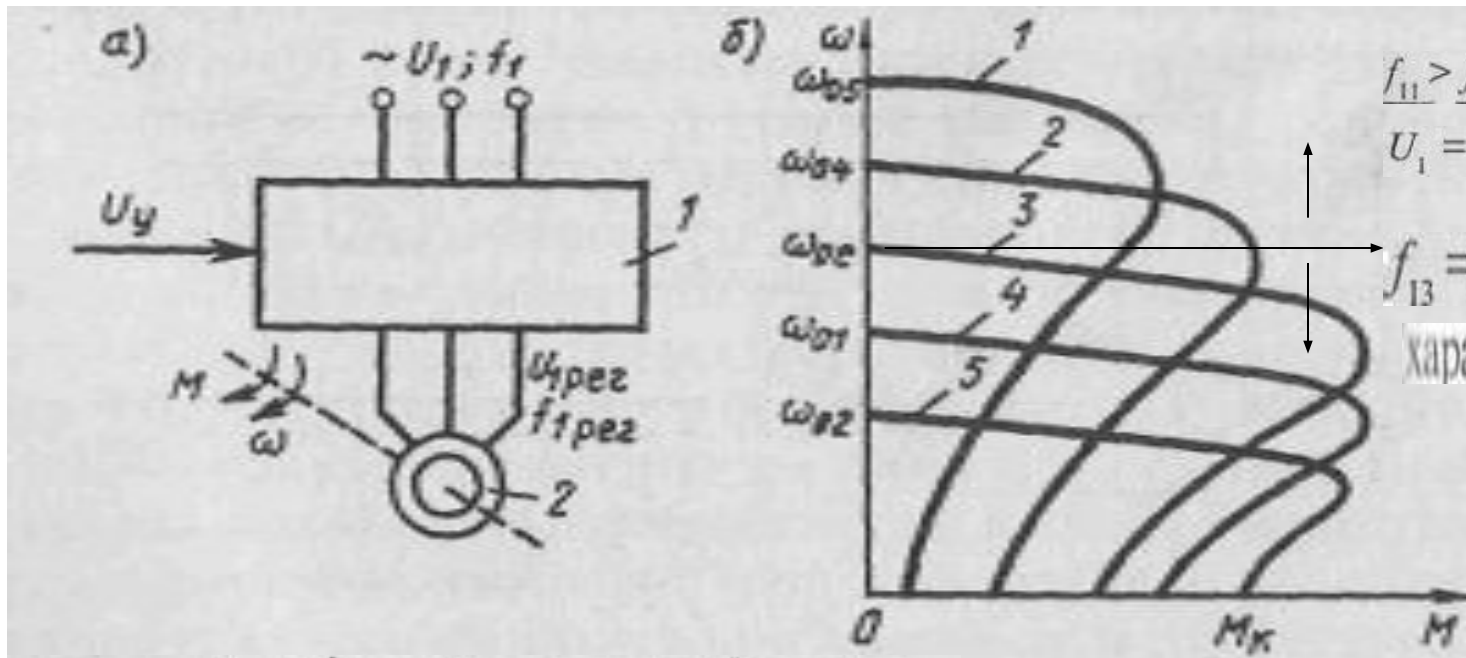
$$M_{c1} < M_{c2} < M_{c3} < M_{c4}$$

4- двигатель; 2- СИФУ; 3- ТРН; 5, 6- датчик тока и напряжения; 7- функциональный преобразователь; 8- инерционное звено; 1- элемент сравнения.

# Регулирование скорости изменением частоты

$$\omega_0 = 2\pi f/p$$

Обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне; высокая жесткость получаемых характеристик; регулирование скорости не сопровождается увеличением скольжения, поэтому потери мощности ( $\Delta = M\omega_0 s$ ) не велики.



$f_{11} > f_{12} > f_{1ном}$   
 $U_1 = U_{1ном} = const$   
 $f_1 > f_{1ном}$   
 $f_{13} = f_{1ном} > f_{14} > f_{15}$   
 характеристики 3...5

$$M = 3U_{\phi}^2 R_2' / [\omega_0 s ((R_1 + R_2'/s)^2 + x_k^2)].$$

$$I_2' = U_{\phi} / \sqrt{(R_1 + R_2'/s)^2 + x_k^2}$$

$$U_1 / f_1 = const \quad U_1 / f_1^2 = const \quad U_1 / \sqrt{f_1} = const$$

$$M_k = 3U_{\phi}^2 / (2\omega_0 x_k);$$

$$\omega_0 \sim f_1 \text{ и } x_k \sim f_1$$

$$M_k = U_1 / f_1^2 = U_1 / f_1 = const.$$

$$M_k = 3U_{\phi}^2 / [2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2})];$$

$$s_k = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + x_k^2},$$

$$M = 2M_k / (s/s_k + s_k/s);$$

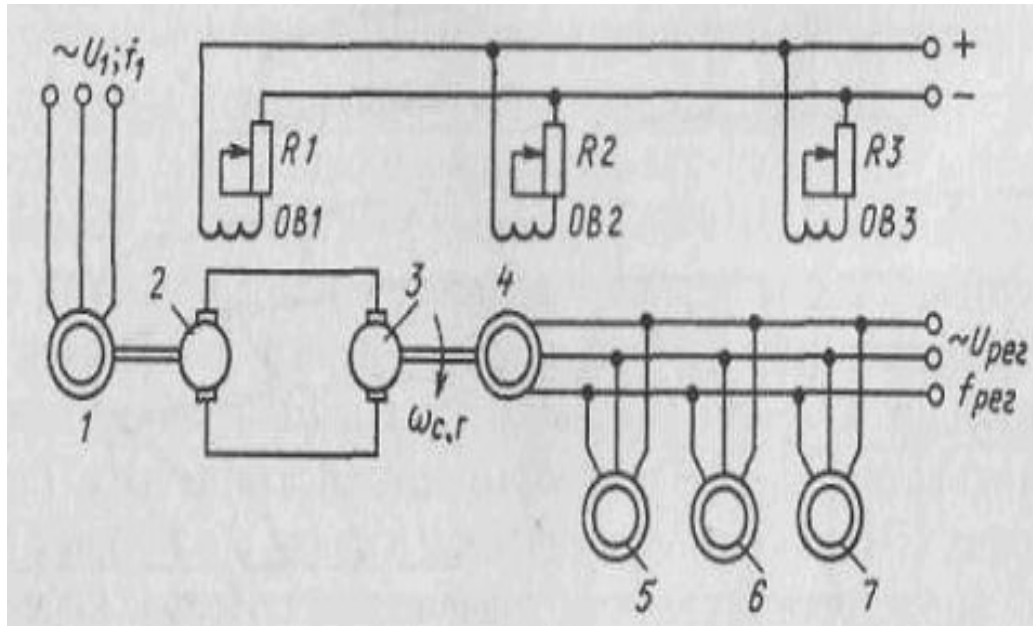
$$M_k = 3U_{\phi}^2 / (2\omega_0 x_k);$$

$$s_k = R_2' / x_k.$$

# Принцип действия ПЧ

Различные ПЧ, которые нашли применение в частотных асинхронных ЭП, можно разделить на две группы, отличающиеся используемыми техническими средствами и структурой.

Первую группу составляют так называемые электромашинные вращающиеся ПЧ, в которых для получения переменной частоты используются обычные или специальные электрические машины.



$$f_{\text{рег}} = p \omega_{\text{ср}} / (2\pi)$$

Преобразователь состоит из двух частей:

- агрегата постоянной скорости, включающего в себя асинхронный двигатель 1 (вместо него может быть использован двигатель любого типа) и приводимый им во вращение генератор постоянного тока 2,
- и агрегата переменной скорости, состоящего из регулируемого двигателя постоянного тока 3, приводящего во вращение синхронный генератор переменной частоты 4.

Двигатель 1 питается от сети со стандартной частотой  $f = 50$  Гц, а на выводах синхронного генератора 4 частота и напряжение могут регулироваться. С помощью резистора R1, в цепи обмотки возбуждения генератора 2 изменяется напряжение, подводимое к якорию двигателя 3, и тем самым его скорость и скорость генератора 4. При этом меняется частота напряжения на выводах синхронного генератора 4, определяемая выражением  $f = p \omega_{\text{ср}} / (2\pi)$ , а значит, и на двигателях 5...7. Напряжение на этих двигателях регулируется с помощью резистора R3 включенного в цепь обмотки возбуждения синхронного генератора 4.

Применение ПЧ позволяет плавно регулировать скорость двигателей 5...7 в широком диапазоне

## Недостатки:

- Для создания такого преобразователя необходимы четыре электрические машины, рассчитанные на полную мощность потребителей (группы АД), что определяет его громоздкость и высокую цену, особенно при больших мощностях нагрузки.
- Двойное преобразование энергии - энергии переменного тока с частотой  $f = 50$  Гц в энергию постоянного тока и затем опять в энергию переменного тока регулируемой частоты - сопровождается потерей энергии во всей цепи, определяя невысокий КПД системы.
- Коллекторные машины постоянного тока требуют непрерывного надзора и ухода при эксплуатации, а их работа сопровождается шумом.
- Процесс изменения частоты в электромашинном ПЧ инерционен, что объясняется механической инерцией электромашинного агрегата.



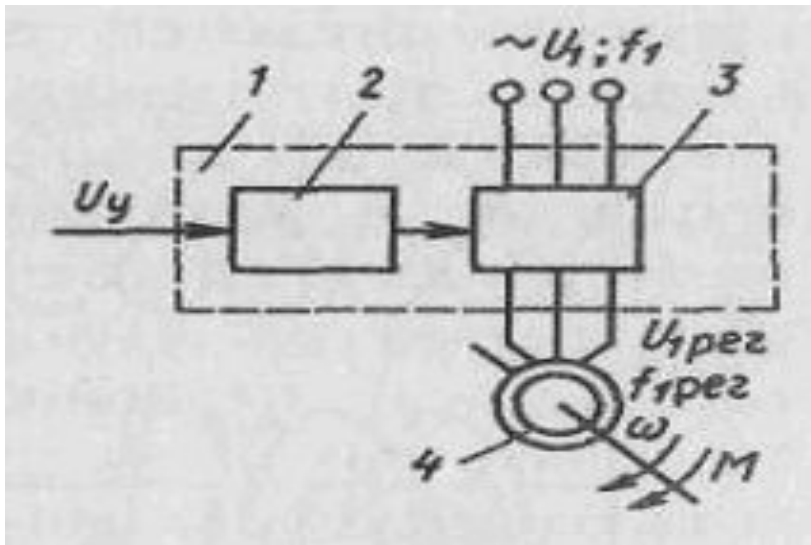
# Статические ПЧ

В настоящее время большое распространение получили статические ПЧ (вторая группа), названные так потому, что в них используются не имеющие движущихся частей элементы и устройства, такие как полупроводниковые приборы, реакторы, конденсаторы и др. Развитие статических ПЧ особенно ускорилось в связи с массовым производством тиристоров и силовых транзисторов.

Использование статических ПЧ позволило повысить технико-экономические показатели регулируемого частотного ЭП: увеличить его КПД и быстродействие, устранить шум и упростить обслуживание.

Статические ПЧ могут быть без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки и с промежуточным звеном постоянного тока. Рассмотрим схемы и принцип действия каждого вида ПЧ.

## Статические ПЧ без звена постоянного тока

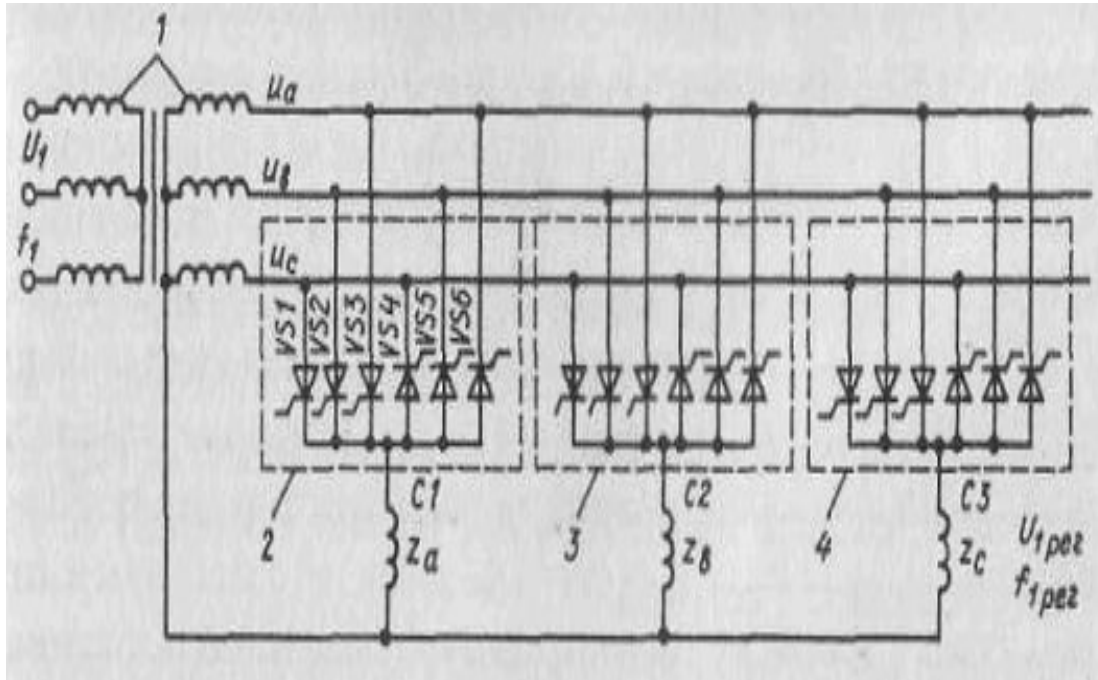


Упрощенная функциональная схема ПЧ без звена постоянного тока (позиция 1) включает в себя:

- силовую часть 3,
- асинхронный двигатель 4,
- блок управления 2.

# Тиристорный преобразователь частоты

## Пример схемы ПЧ без звена постоянного тока



Одна из распространенных схем тиристорного трехфазного ПЧ непосредственной связью (НПЧ), состоящая из трех одинаковых комплектов тиристоров 2, 3, 4, обеспечивающих питание обмоток статора АД  $z_a$ ,  $z_b$  и  $z_c$ , показана на данном рисунке.

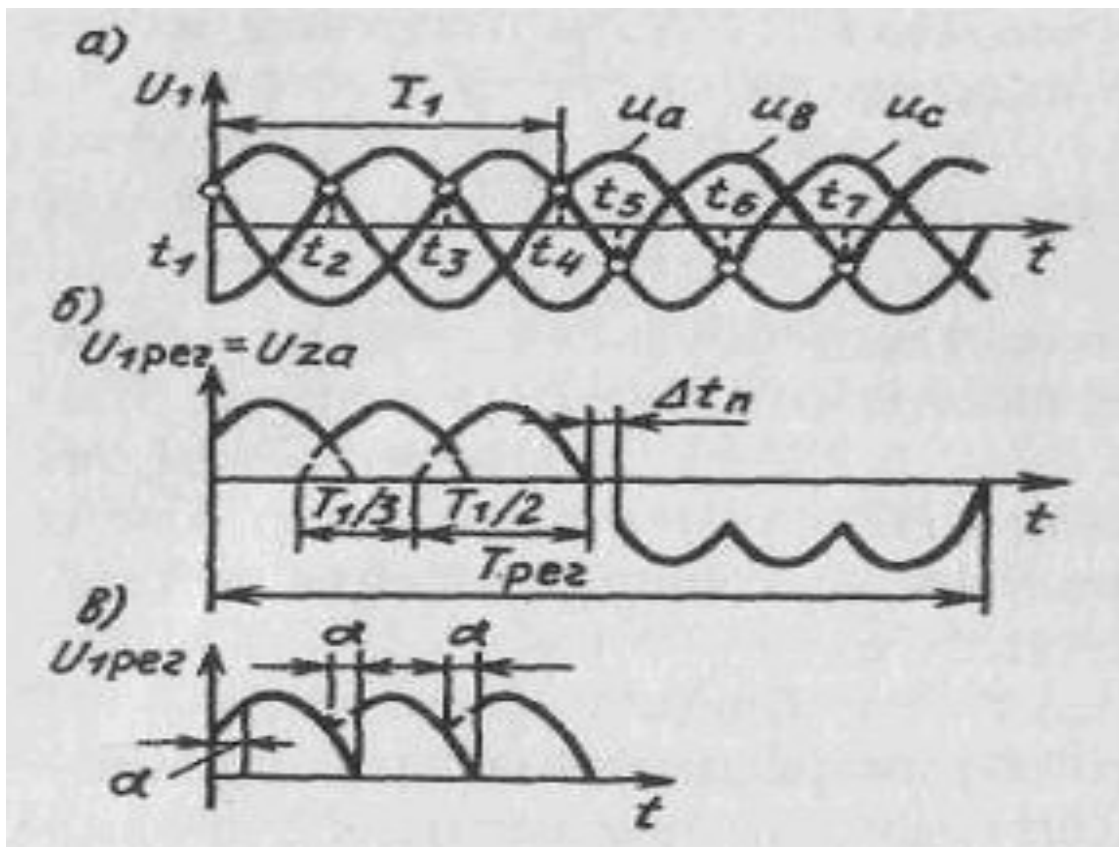
К комплектам тиристоров подсоединены начала фазных обмоток  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , а концы этих обмоток подключены к нулевой точке трансформатора 1.

Каждый из трех комплектов содержит шесть тиристоров, из которых три анодами и три катодами подсоединены к вторичным обмоткам трансформатора 1.

Нулевая точка трансформатора соединена с общей точкой трехфазной обмотки статора, поэтому схема называется нулевой.

Каждая фаза этой схемы работает независимо от остальных, поэтому для пояснения принципа ее действия можно рассмотреть работу одной из фаз, например А, управляемую комплектом 2 тиристоров  $VS_1... VS_6$ .

## Пример схемы ПЧ без звена постоянного тока



$$f_{пер} = 1/T_{пер}$$

$$T_{пер} = T_1 [3 + 2(h-1)]/3$$

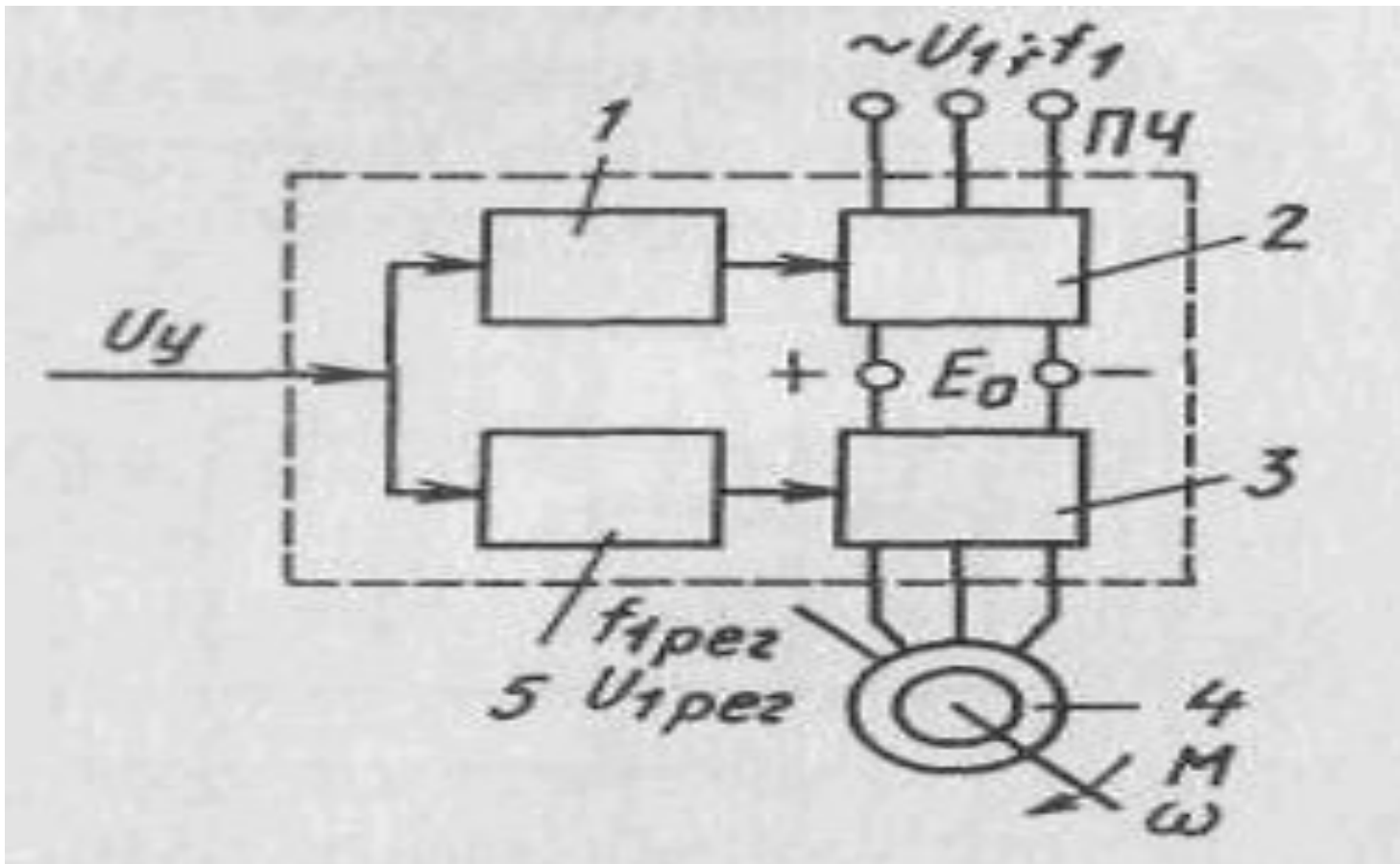
$$f_{пер} = 3f_1 / (3 + 2(h-1) + \Delta t_n f_1)$$

$$U_{пер} = \sqrt{2} m_1 U_\phi \sin(\pi/m_1) \cos(\alpha/\pi) = U_{перmax} \cos \alpha$$

$T_{пер} = T_1 [3 + 2(h-1)]/3$  - где  $h = 2, 3, \dots$  - число открываемых тиристоров в комплекте

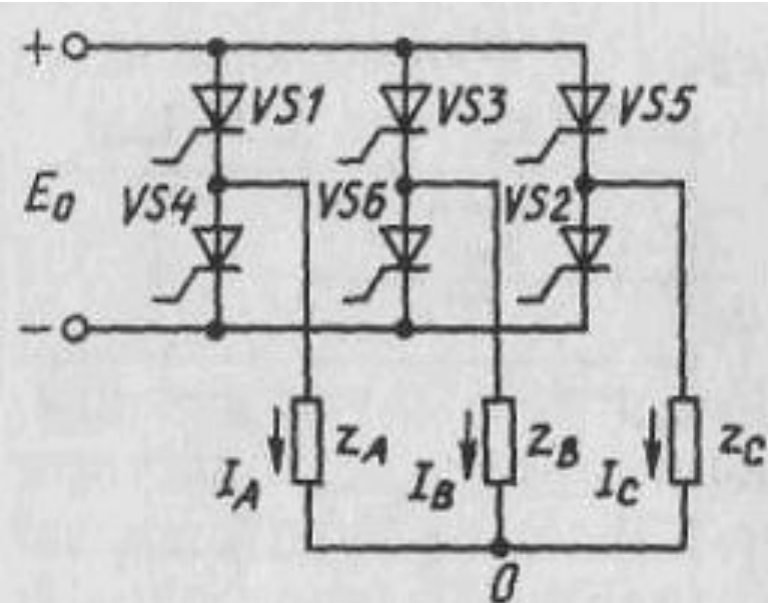
Из уравнений следует, что ПЧ без звена постоянного тока с непосредственной связью питающей сети и нагрузки может обеспечивать регулирование частоты на статоре АД только в сторону ее уменьшения по сравнению с сетевой. Расширение диапазона регулирования частоты на выходе ПЧ достигается введением паузы  $\Delta t_n$  между моментом снятия импульсов управления с тиристоров VS1... VS3 и подачей их на тиристоры VS4... VS6.

## Схема ПЧ со звеном постоянного тока



- 2 - управляемый выпрямитель
- 3 - управляемый инвертора
- 1 и 5 - блоки управления

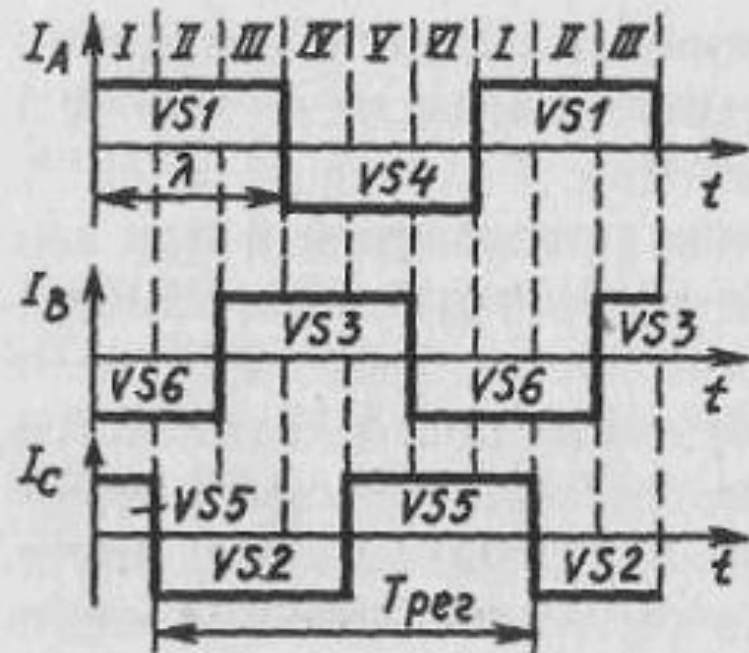
## Управляемый инвертор



Рассмотрим работу управляемого инвертора. Полагаем, что с помощью того или иного управляемого выпрямителя на его вход подается постоянное напряжение  $E_0$ .

Предположим, что трехфазная нагрузка  $Z_A$ ,  $Z_B$  и  $Z_C$  (обмотки статора АД) соединена в звезду, а тиристоры  $VS_1 \dots VS_6$ , на которых выполнен инвертор, соединены по мостовой схеме и по сигналам с блока управления открываются в требуемой последовательности. Обычно продолжительность открытого состояния каждого тиристора  $\lambda$  составляет половину или треть периода  $T_{рег} = 1/f_{рег}$ , а сдвиг моментов открытия тиристоров  $VS_1 \dots VS_6$  – шестую часть этого периода.

Рассмотрим работу схемы со временем открытия тиристоров  $\lambda = T_{рег} / 2$ .



Временная токовая диаграмма работы тиристоров, для этого случая, показана на рисунке 2, где токи фаз  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ , проходящие через нечетные тиристоры, отложены в положительном направлении, а через четные – в отрицательном.

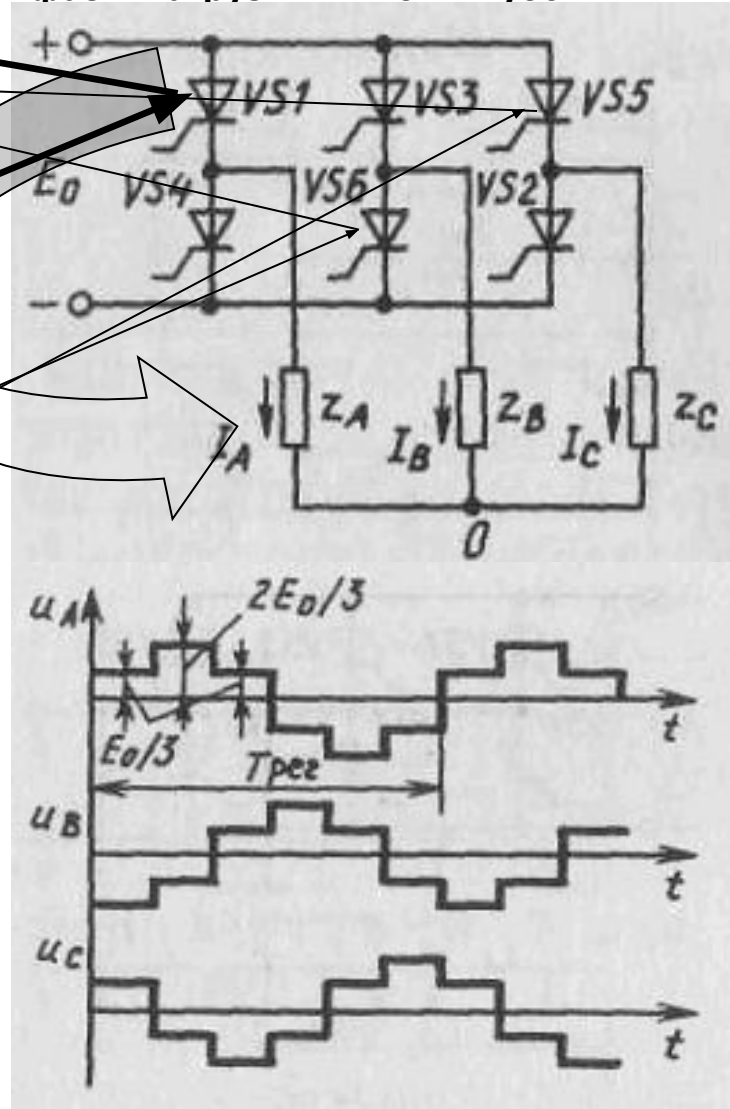
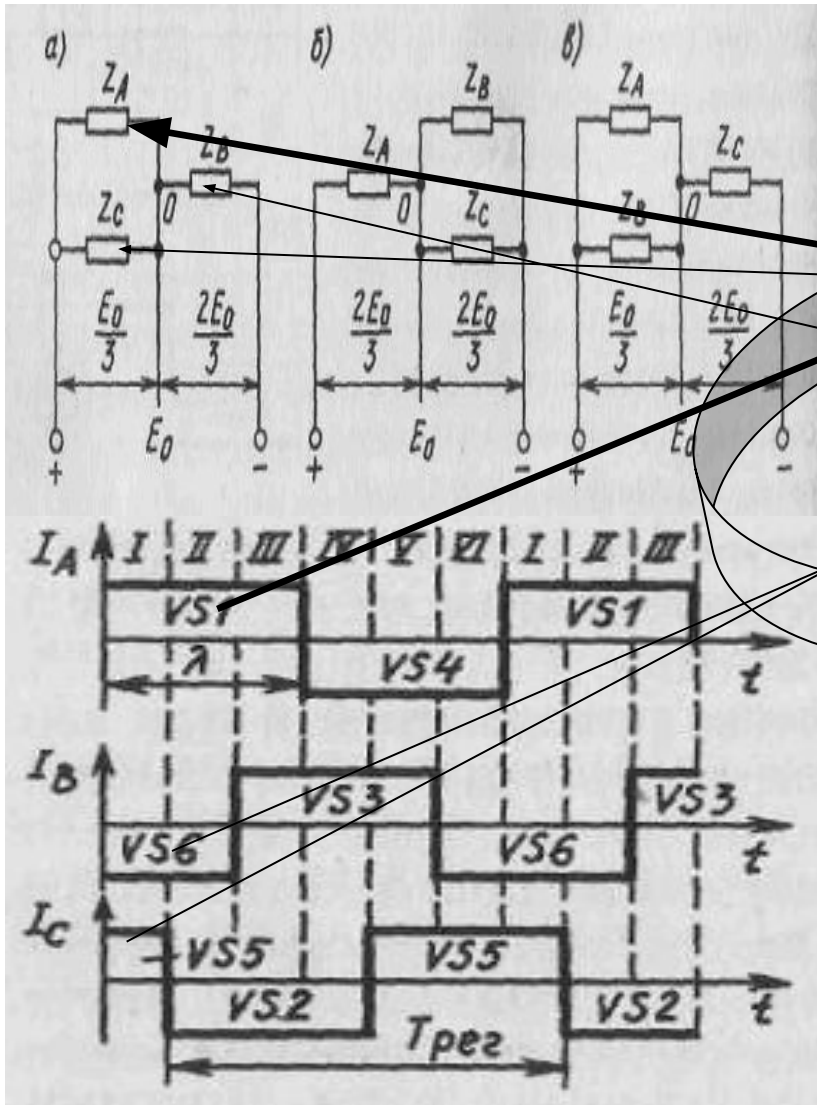
В каждый момент времени включены (открыты) три тиристора.

За время периода можно выделить шесть интервалов (I, II, III, IV, V, VI) различных сочетаний открытых и закрытых состояний тиристоров.

Для определения формы напряжения на нагрузке рассмотрим схемы включения фаз статора АД на каждом из шести временных интервалов.

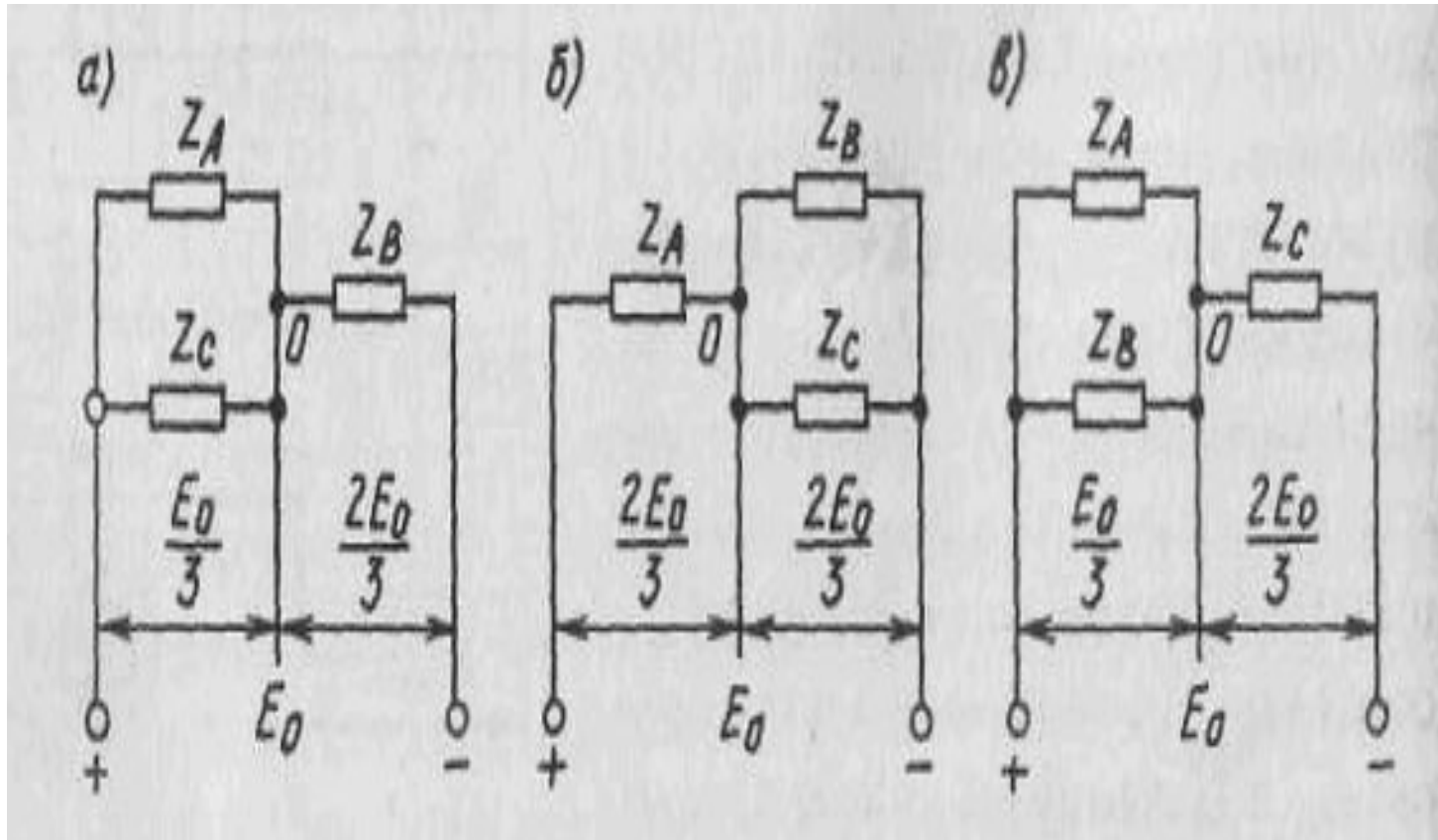
# ВРЕМЕННАЯ ТОКОВАЯ ДИАГРАММА

В течение интервала I открыты тиристоры VS1, VS5 и VS6, начала фаз нагрузок ZA и ZC соединены с плюсовым выводом источника + E0, а начало фазы нагрузки ZB – с минусовым выводом - E0

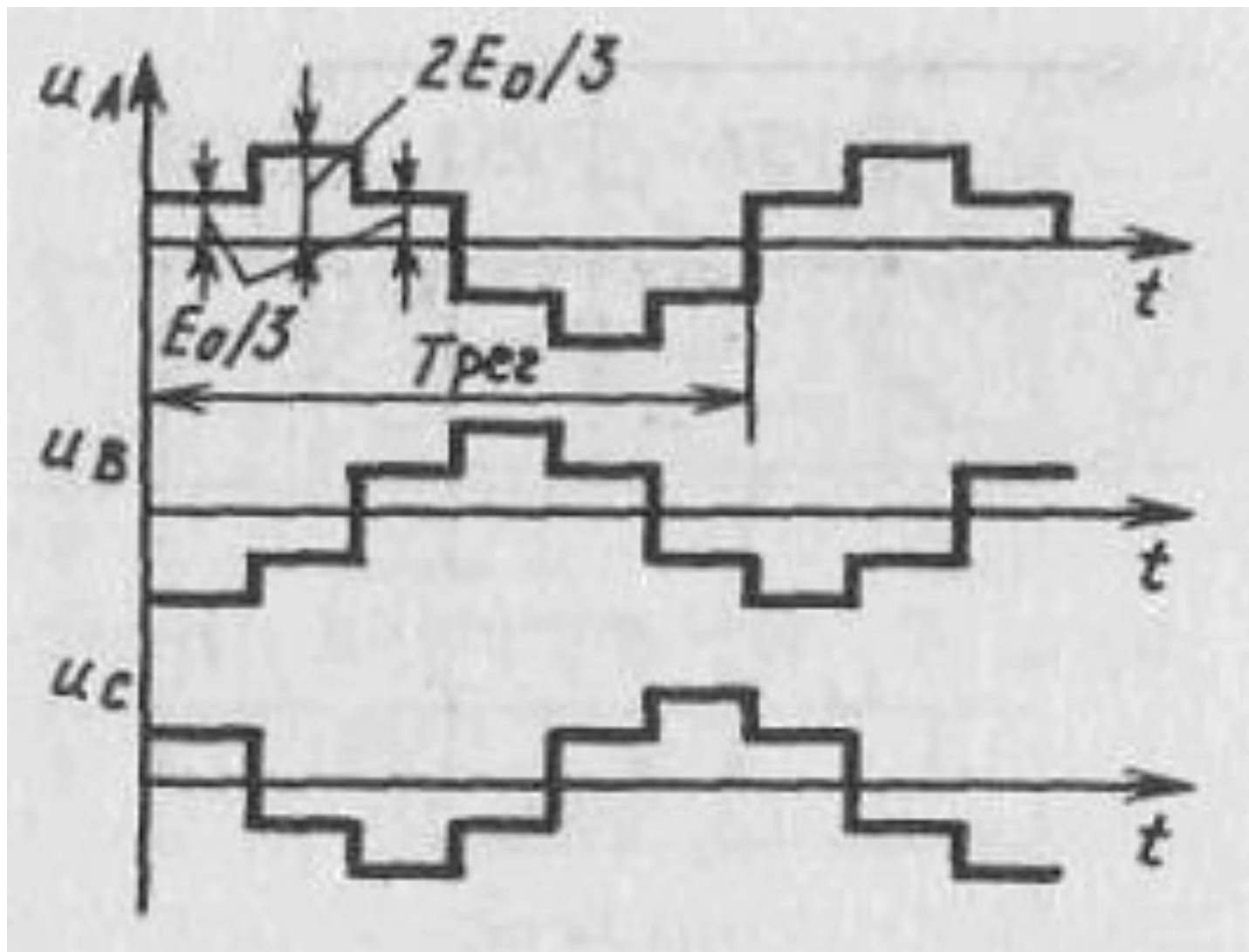


$$T_{pez} = 1/f_{pez} \quad \lambda = T_{pez} / 2$$

# СХЕМА СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТКОВ СТАТОРА В РАЗНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ПЕРИОДА

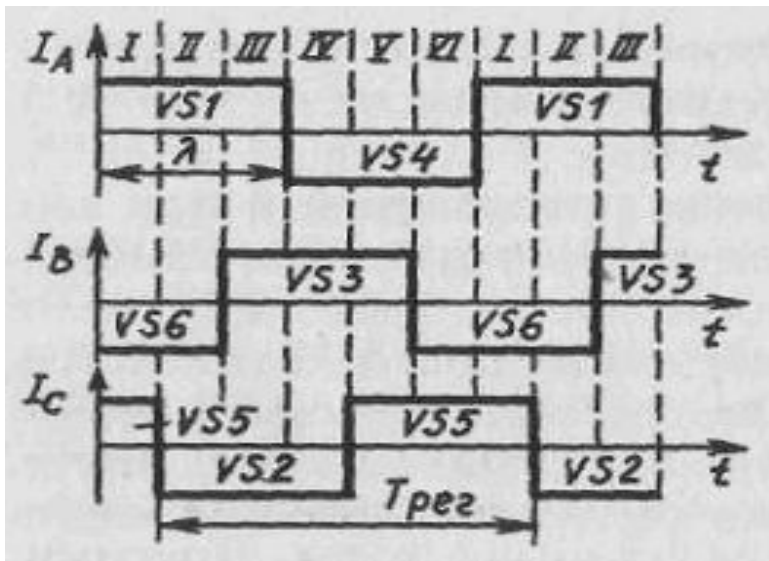
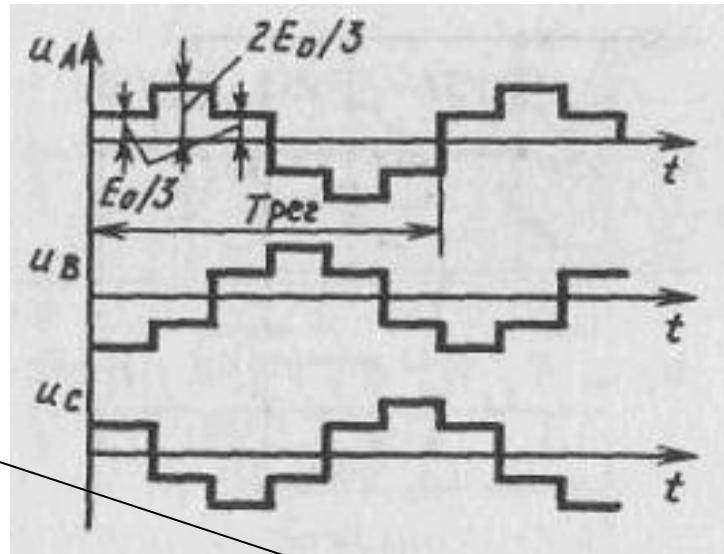
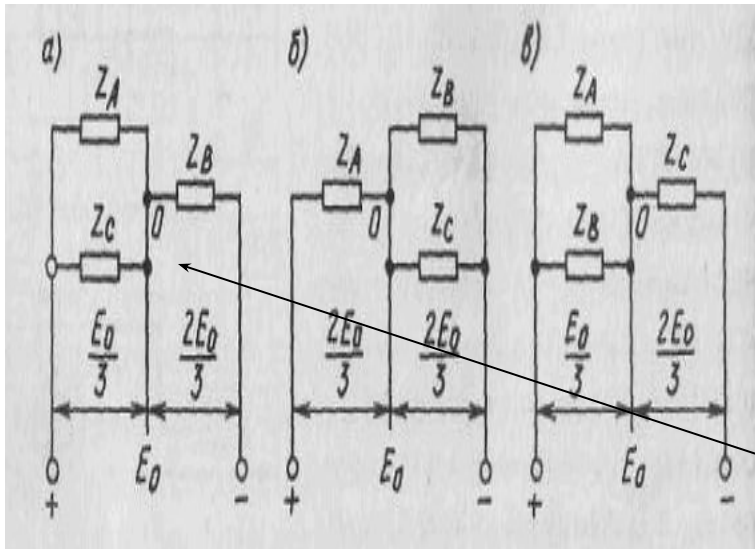


# НАПРЯЖЕНИЯ НА ОБМОКАХ СТАТОРА В РАЗНЫЕ ВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРВАЛЫ ПЕРИОДА



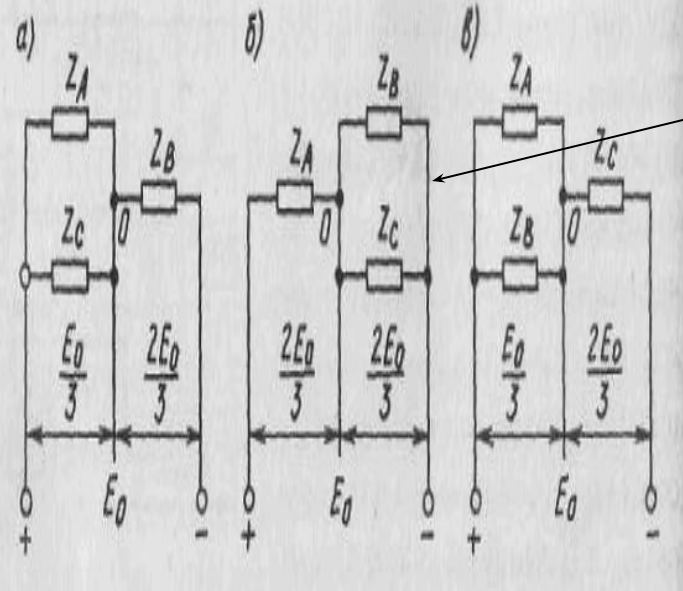


$$T_{\text{рег}} = 1/f_{\text{рег}} \quad \lambda = T_{\text{рег}} / 2$$



В течение интервала I открыты тиристоры VS1, VS5 и VS6, начала фаз нагрузок ZA и ZC соединены с плюсовым выводом источника + E<sub>0</sub>, а начало фазы нагрузки ZB – с минусовым выводом – E<sub>0</sub>. Если при этом сопротивления всех трех фаз одинаковы, то эквивалентное сопротивление параллельно соединенных фаз нагрузок ZA и ZC будет в два раза меньше сопротивления фазы нагрузки ZB.

Тогда и напряжение на параллельно соединенных фазах нагрузок ZA и ZC будет в два раза меньше, чем на фазе нагрузки ZB, и составит E<sub>0</sub>/3.



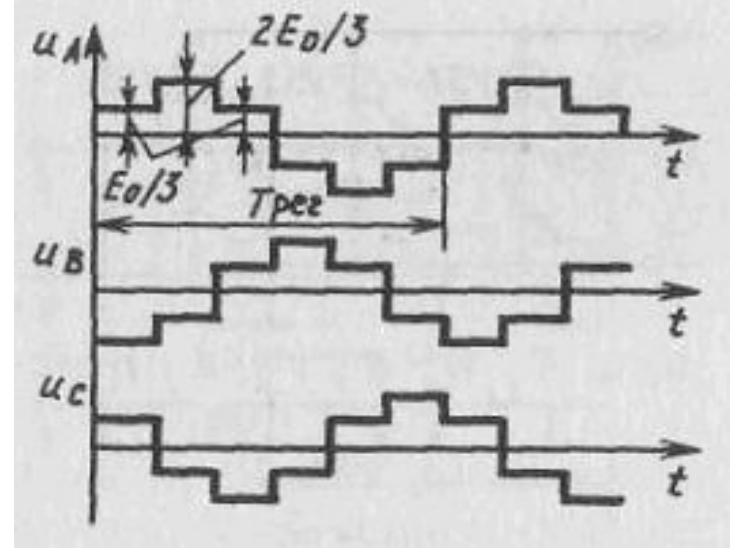
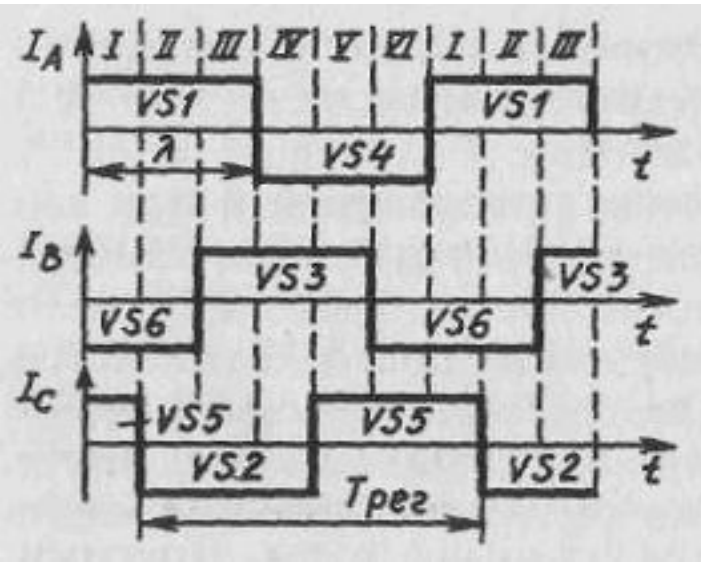
На интервале II открыты тиристоры VS1, VS6 и VS2 (тиристор VS5 закрыт), фазы нагрузок ZB и ZC включены параллельно, к ним прикладывается напряжение  $E_0/3$ , а к фазе нагрузки ZA – напряжение  $2E_0/3$ .

При переходе к интервалу III закрывается тиристор VS6 и открывается тиристор VS3 (тиристоры VS1 и VS2 по-прежнему открыты), в соответствии с чем фазы нагрузок ZA и ZB включаются параллельно.

Аналогично можно изобразить схемы соединения фаз обмотки статора для интервалов IV, V и VI, которые будут соответствовать схемам для интервалов I, II и III, но иметь другую полярность напряжения на началах фаз.

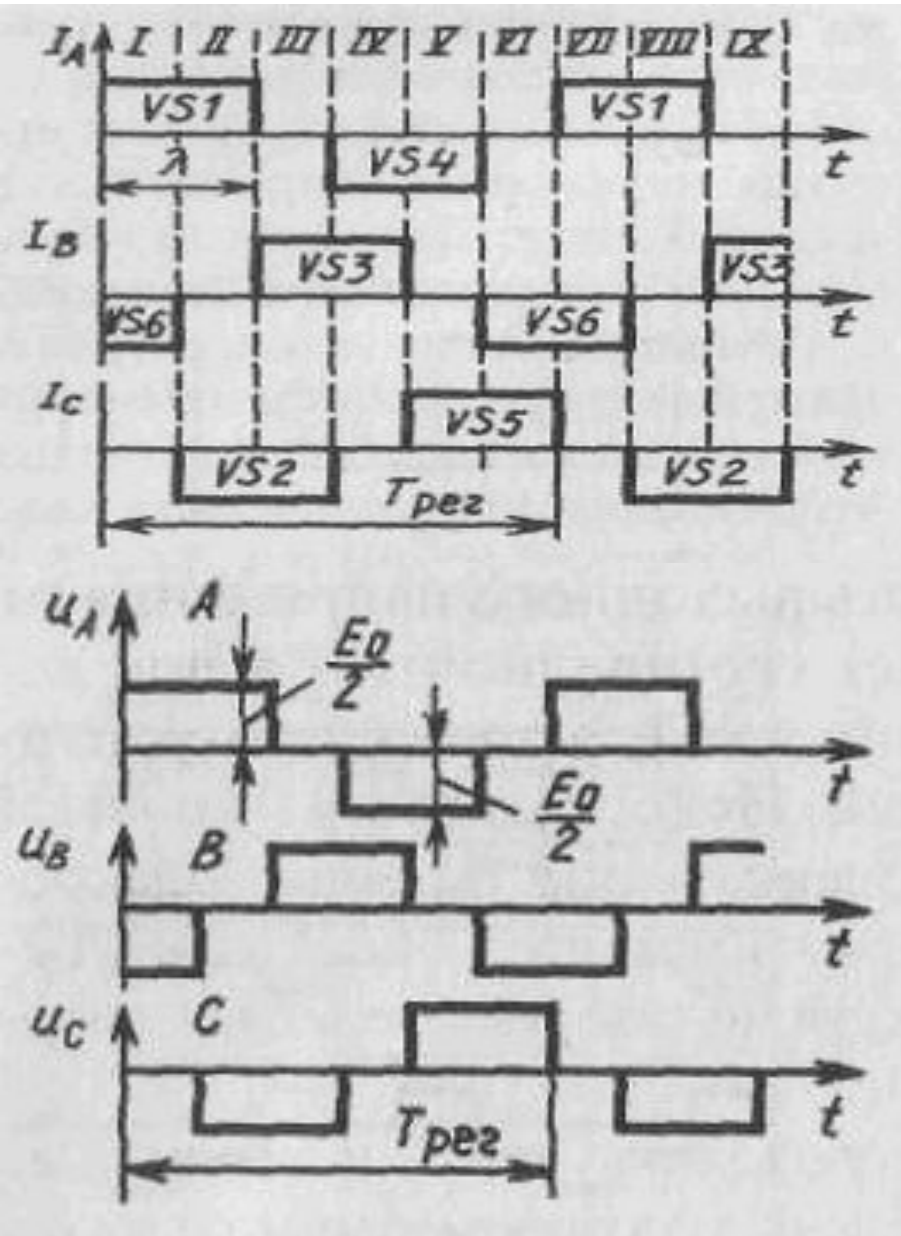
График изменения напряжения на фазах нагрузки при  $\lambda = T_{рег} / 2$  имеет ступенчатую форму, и оно является переменным, причем максимумы этого напряжения сдвинуты по фазам на треть периода регулируемой частоты.

На нагрузке получается стандартная система трехфазного напряжения переменного тока несинусоидальной формы.



$$T_{\text{рег}} = 1/f_{\text{рег}}$$

$$\lambda = T_{\text{рег}} / 3$$



Другой формы выходное напряжение ПЧ будет в том случае, если продолжительность открытого состояния каждого тиристора будет составлять треть периода  $T_{\text{рег}}$  регулируемой частоты  $f_{\text{рег}}$ , а нагрузка будет по-прежнему соединена в звезду.

Диаграмма работы тиристорov и график изменения напряжения на нагрузке при  $\lambda = T_{\text{рег}} / 3$  приведены соответственно на рисунках.

В этом случае в каждый интервал времени открыты лишь два тиристора и две фазы обмотки статора АД оказываются последовательно включенными на напряжение  $E_0$ .

Третья фаза отключена от источника, соответственно напряжение на каждой из последовательно соединенных фаз равно  $E_0/2$ , а на третьей (свободной) равно нулю.

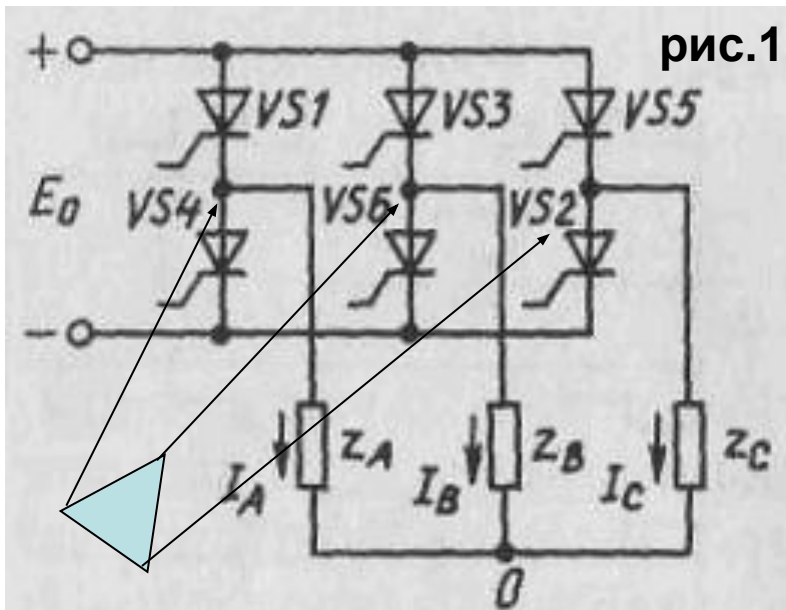
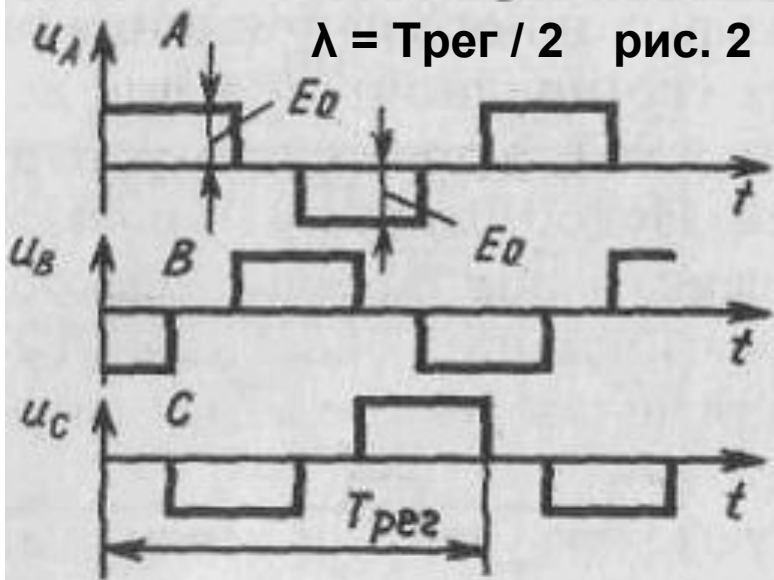


рис.1



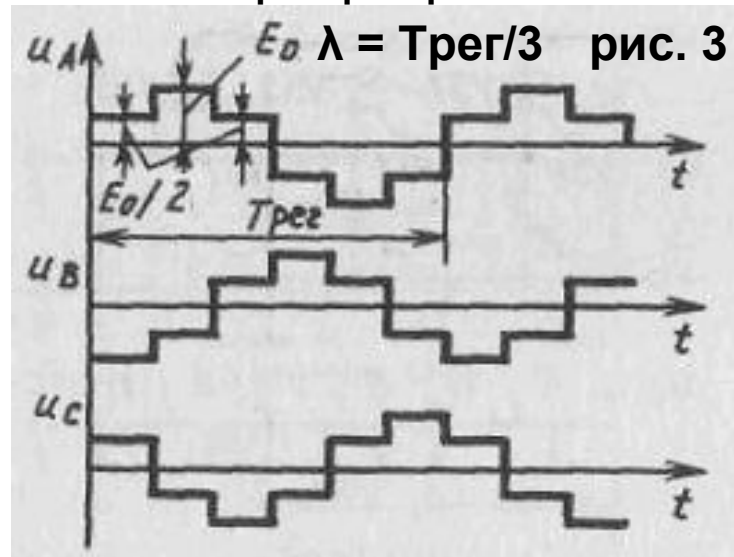
$\lambda = T_{рег} / 2$  рис. 2

Аналогично можно проанализировать работу схемы при соединении трехфазной нагрузки в треугольник (рис.1.).

При  $\lambda = T_{рег} / 2$  форма напряжения на фазах нагрузки показана на рис. 2 с амплитудой напряжения, равной  $E_0$ .

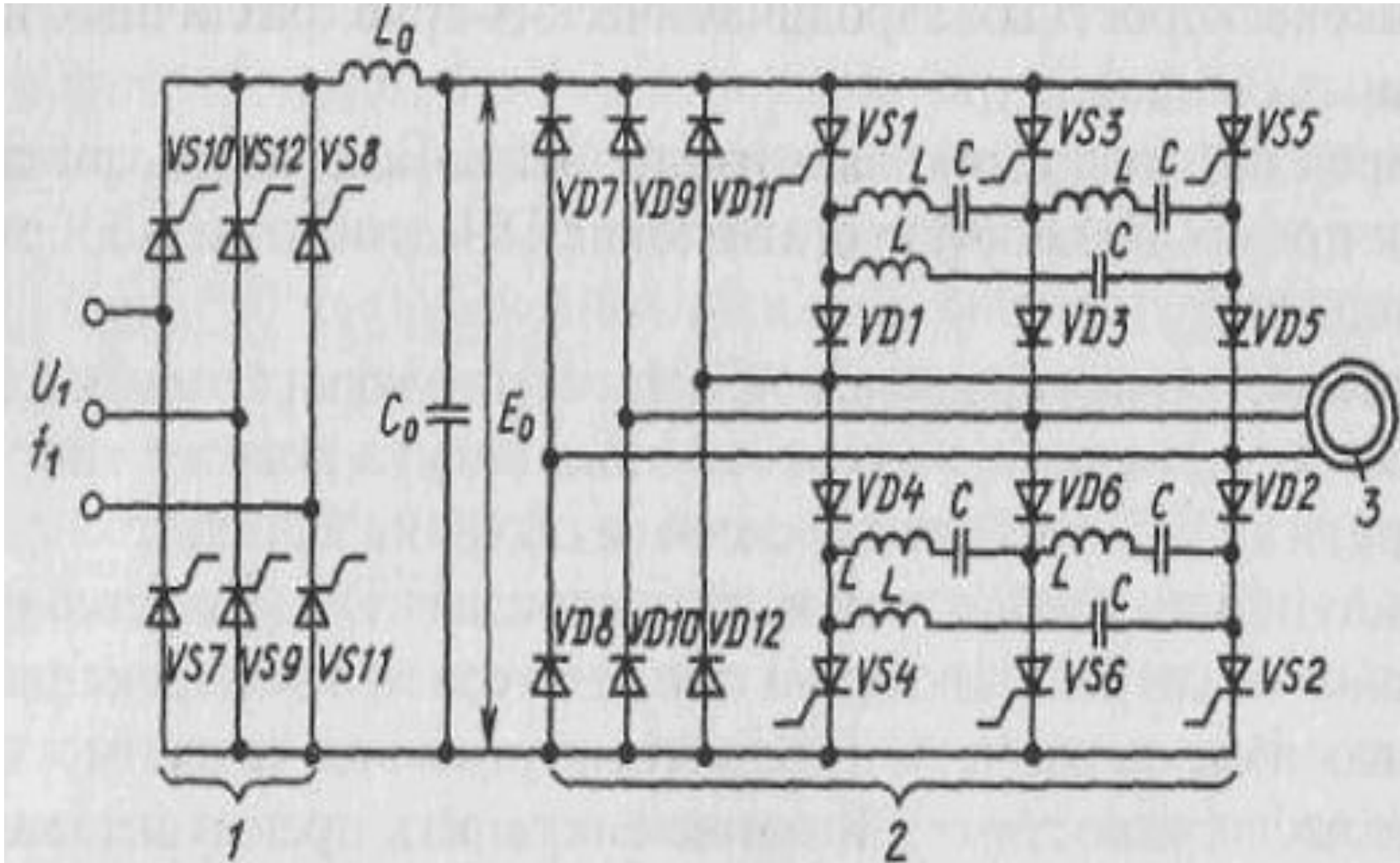
При  $\lambda = T_{рег} / 3$  форма напряжения показана на рис. 3.

Важной особенностью ПЧ со звеном постоянного тока является возможность обеспечения с их помощью плавного регулирования частоты напряжения на статоре АД как ниже, так и выше сетевой, в силу чего такие ПЧ получили наибольшее распространение.



$\lambda = T_{рег} / 3$  рис. 3

# Схема силовой части ЭП с ПЧ и АИН



Широкие перспективы применения ПЧ связаны с использованием в них силовых транзисторов и средств микропроцессорной техники.

Частотное управление весьма экономично, так как нет больших потерь мощности в роторной цепи, ухудшающих КПД ЭП и приводящих к необходимости завышения мощности АД.

Частотное регулирование скорости осуществляется плавно, в широком диапазоне, в обе стороны от естественной характеристики.

Регулировочные характеристики имеют высокую жесткость, а АД сохраняет большую перегрузочную способность.

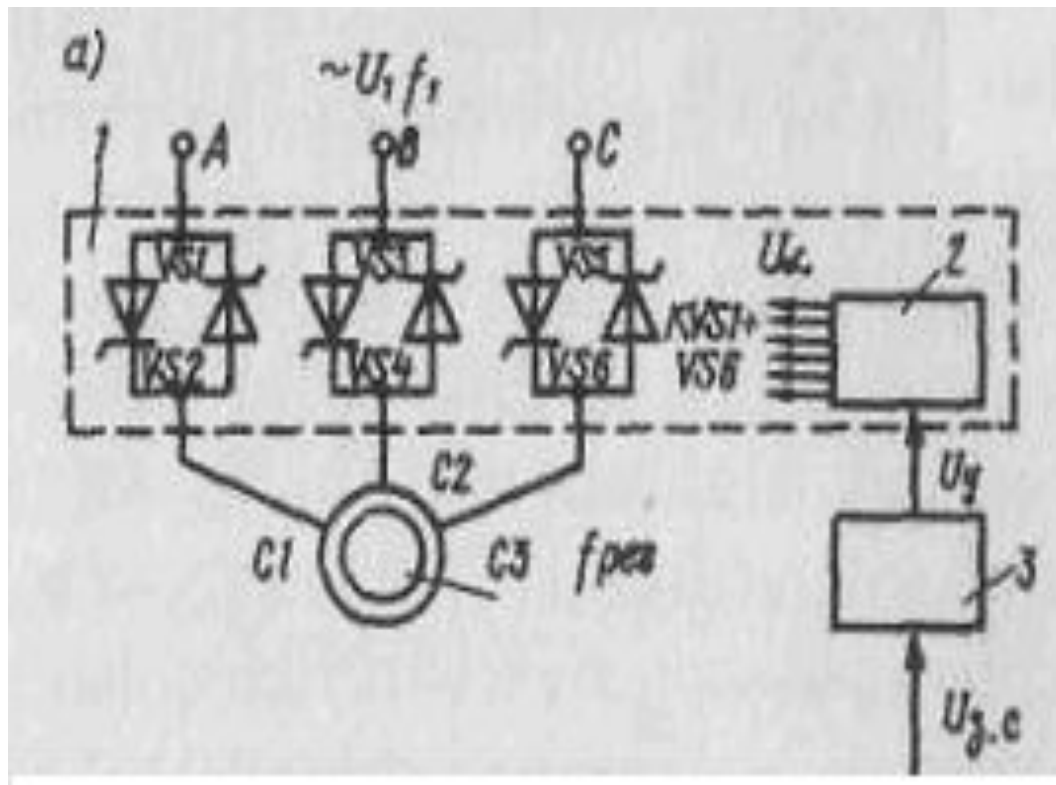
Реализуемый диапазон регулирования скорости в разомкнутых системах составляет 5... 10, а в замкнутых системах его значение может достигать 1000 и более.

Широкому внедрению частотного ЭП во многом способствует выпуск промышленностью статических ПЧ самого разнообразного исполнения.

Однако, наладка и эксплуатация таких ЭП при невысокой квалификации обслуживающего персонала и в сложных условиях, связаны с определенными трудностями.

## Квазичастотное управление АД

Желание сохранить преимущества частотного способа регулирования скорости при использовании более простых схем преобразователей привело к разработке так называемого квазичастотного (подобного частотному) способа управления АД.



Этот способ управления характерен тем, что позволяет получать пониженную регулируемую частоту напряжения на статоре АД с помощью тиристорных регуляторов напряжения.

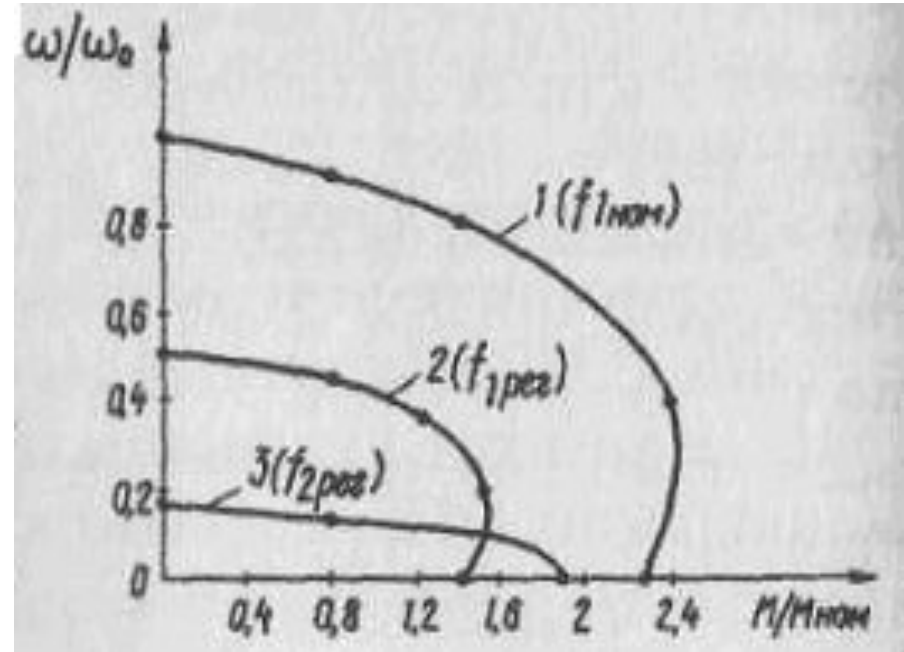
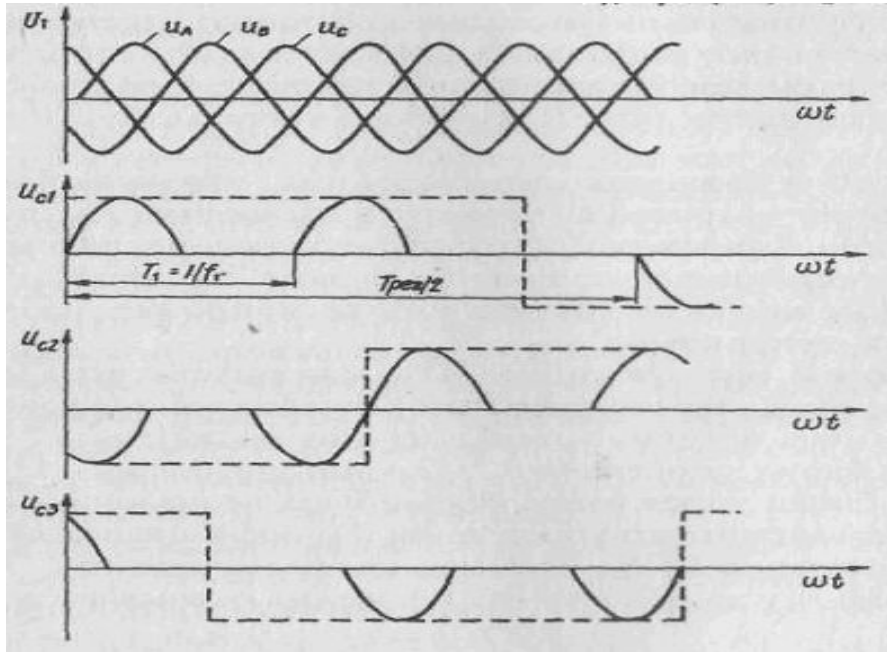
Напряжение фаз статора АД имеет несинусоидальную форму и изменяется с частотой, меньшей частоты сети.

Рассматриваемый принцип получения пониженной частоты во многом повторяет принцип действия ПЧ с непосредственной связью, однако в этом случае регулирование частоты достигается с помощью более простой схемы преобразователя.

$$f_{\text{пер}} = a f_1 / (a + b)$$

$a$  и  $b$  – произвольные целые числа от 1 до 15.

# Квазичастотное управление Кривые фазных напряжений и графики напряжений на зажимах С1, С2 и С3

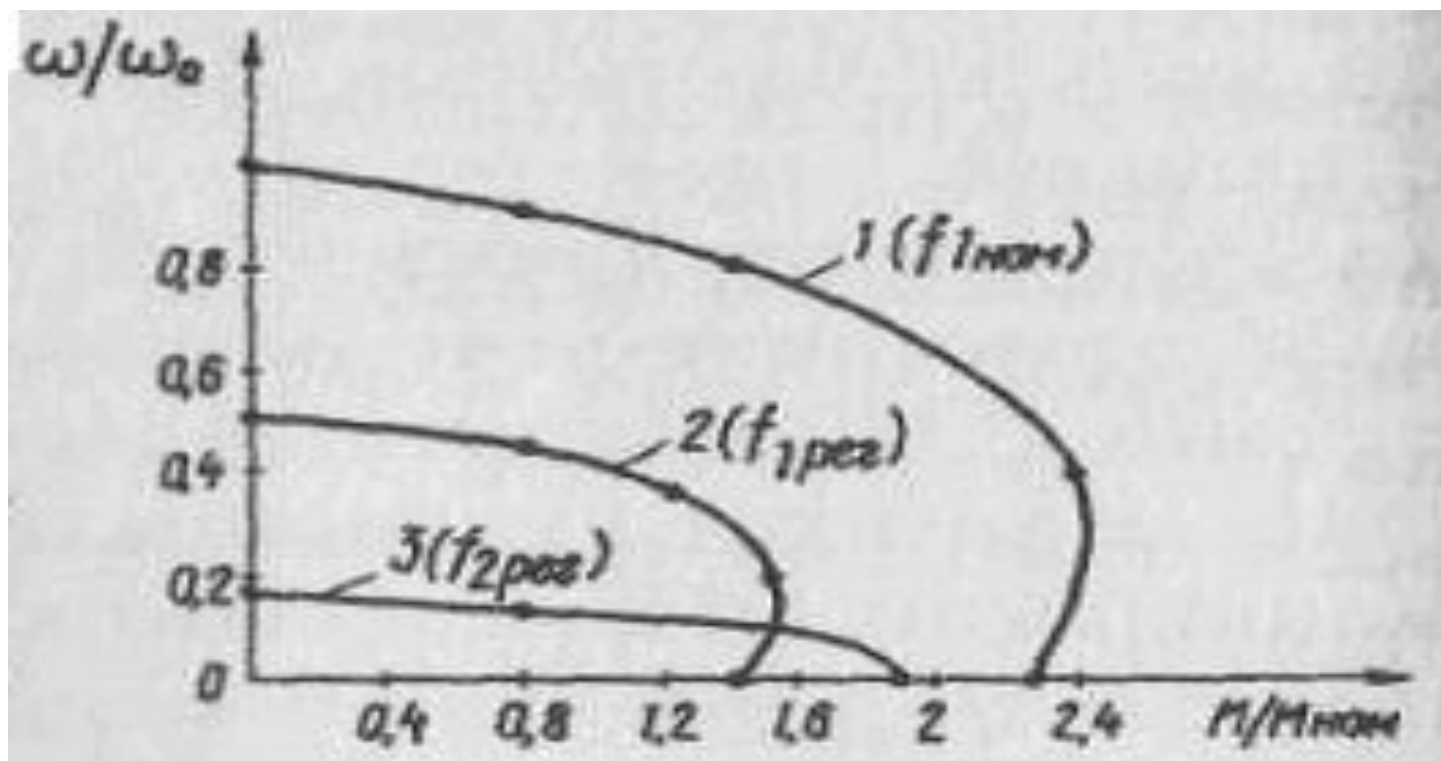


$$f_{\text{пер}} = a f_1 / (a + b)$$

$a$  и  $b$  – произвольные целые числа от 1 до 15.



## Квазичастотное управление Механические характеристики

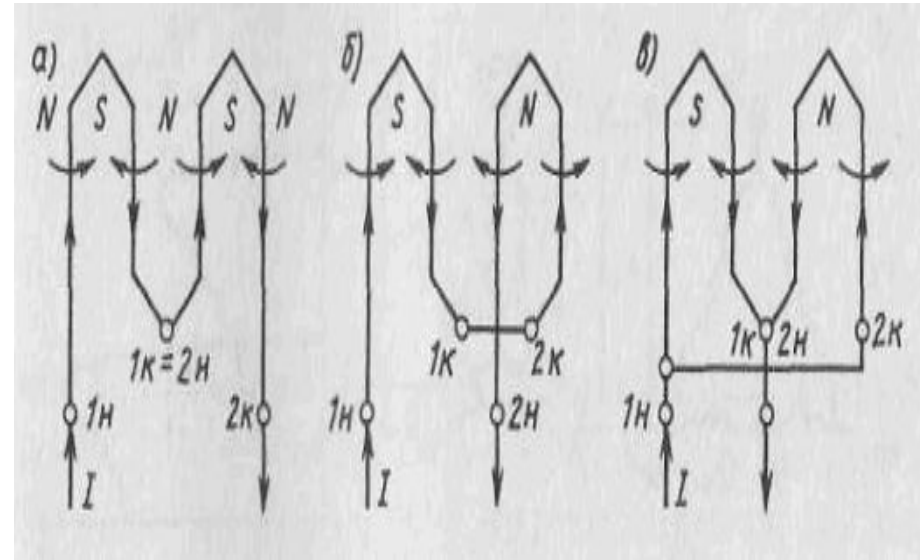
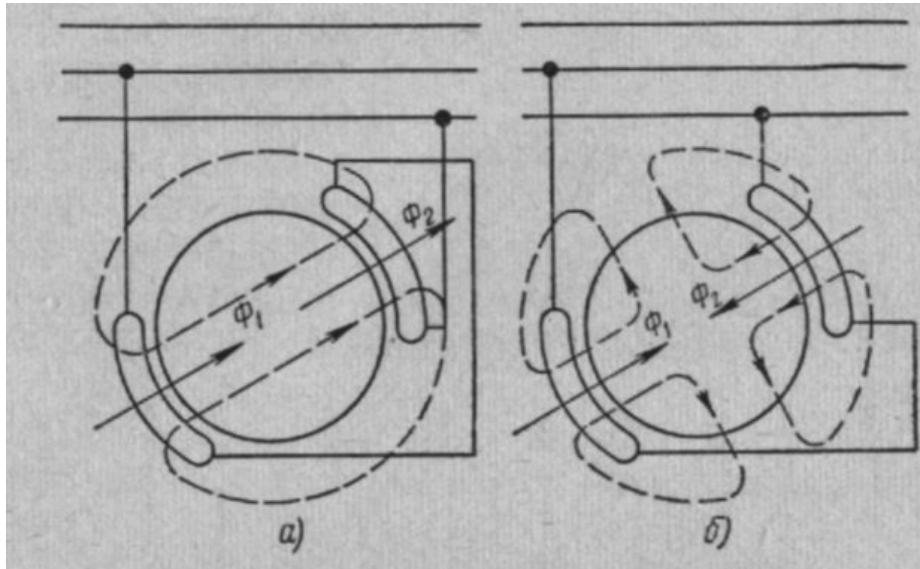


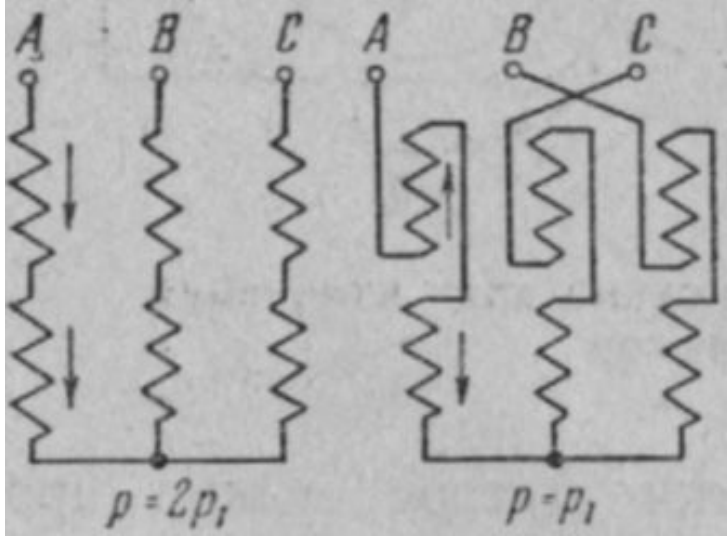
Жесткость рабочих участков искусственных механических характеристик 2 и примерно соответствует естественной характеристике 1, а максимальный момент составляет 60...90% критического момента АД на естественной характеристике.

## Регулирование скорости АД изменением числа пар полюсов

Этот способ регулирования может быть реализован только при использовании специальных АД, получивших название многоскоростных. Особенностью этих двигателей является статорная обмотка стоящая из двух одинаковых секции (полуобмоток), используя разные схемы соединения которых можно изменять число пар полюсов  $p$ .

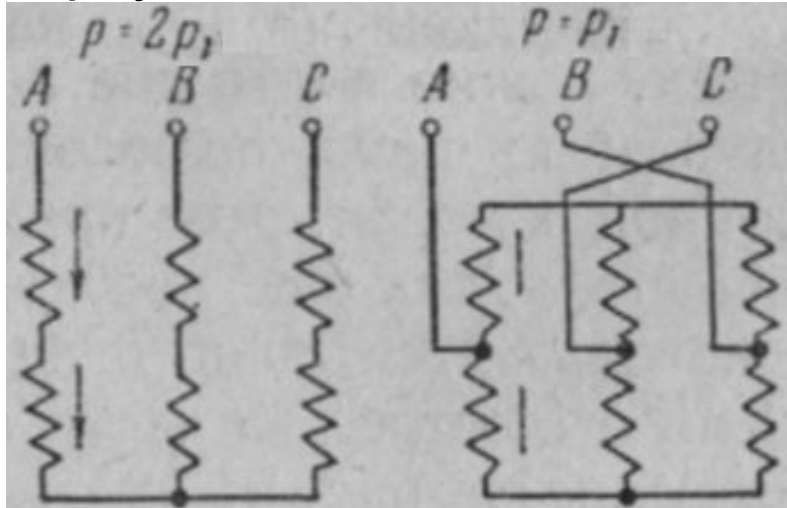
В соответствии с формулой  $\omega_0 = 2\pi f_1/p$  при этом изменяется скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$ , а значит, и скорость АД. Ротор многоскоростных АД обычно выполняется короткозамкнутым.



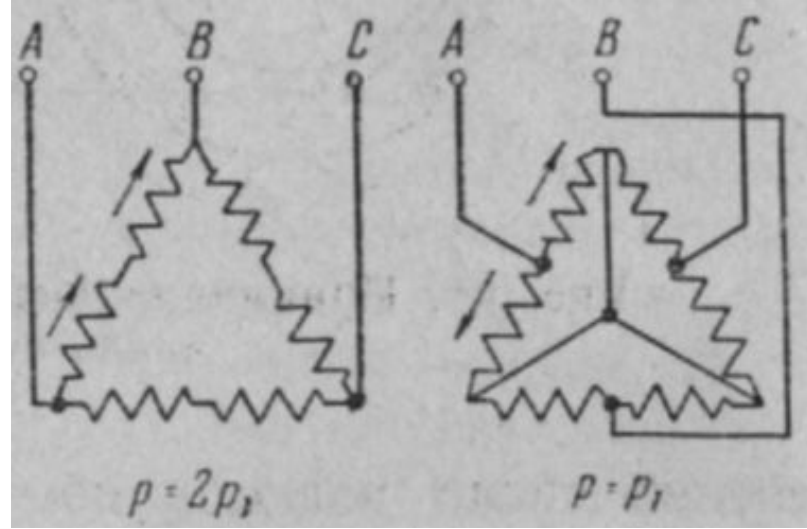


**звезда — звезда (Y/Y)**

Пояснения на предыдущем рисунке



**звезда — двойная звезда (Y/Y2)**

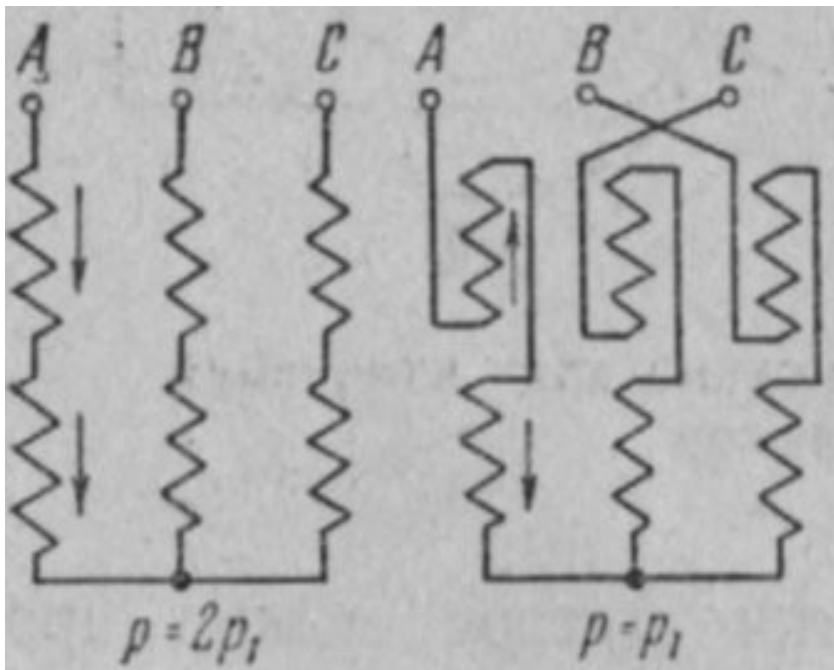


**треугольник — двойная звезда (Delta/Y2)**

По ней при большем числе полюсов обе части фазной обмотки включаются последовательно, и фазные обмотки соединяются треугольником. При вдвое меньшем числе полюсов питающие провода подводятся к серединам треугольника, а его концы соединяются в одной точке. Таким образом, получается схема двойной звезды.

При большем числе полюсов обе части фазной обмотки соединены последовательно, а три фазные обмотки соединены звездой. При вдвое меньшем числе полюсов половины фазных обмоток соединяются в две параллельно включенные звезды. Стрелки на рис. 93 показывают, что направление тока в одной половине фазной обмотки меняется на противоположное.

## звезда — звезда (Y/Y)



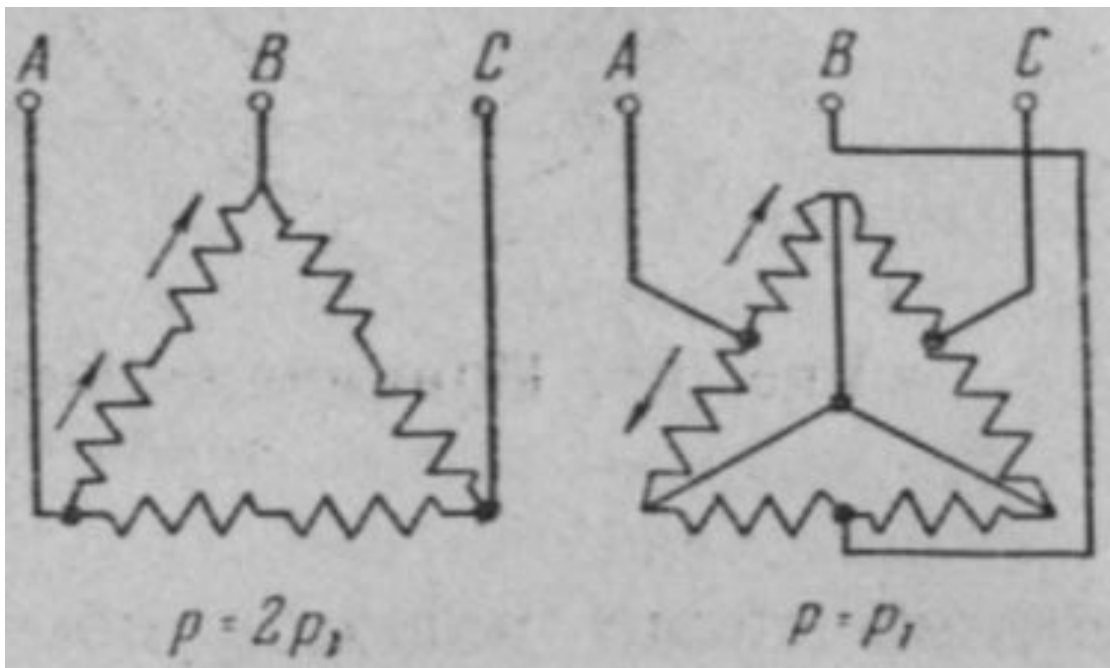
Для схемы располагаемая мощность при числе полюсов  $p=2p_1$  мощность будет  $P_1 = c U_{\text{ф}} I_{\text{ном}}$ .

При числе полюсов  $p_1$  фазное напряжение не поменяется.

Так как половины фазных обмоток также остаются соединенными последовательно, ток будет равен  $I_{\text{ном}}$ .

Поэтому  $P_2 = c U_{\text{ф}} I_{\text{ном}}$ .

$$\frac{P_1}{P_2} = 1.$$



треугольник — двойная звезда (Δ/YY)

Для схемы располагаемая мощность при числе полюсов  $p=2p_1$  мощность будет  $P_1 = c U_{\text{л}} I_{\text{ном}}$ .

При числе полюсов  $p_1$  фазное напряжение ветвям может проходить ток равный  $2 \cdot I_{\text{ном}}$ .

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$$

. Но по двум

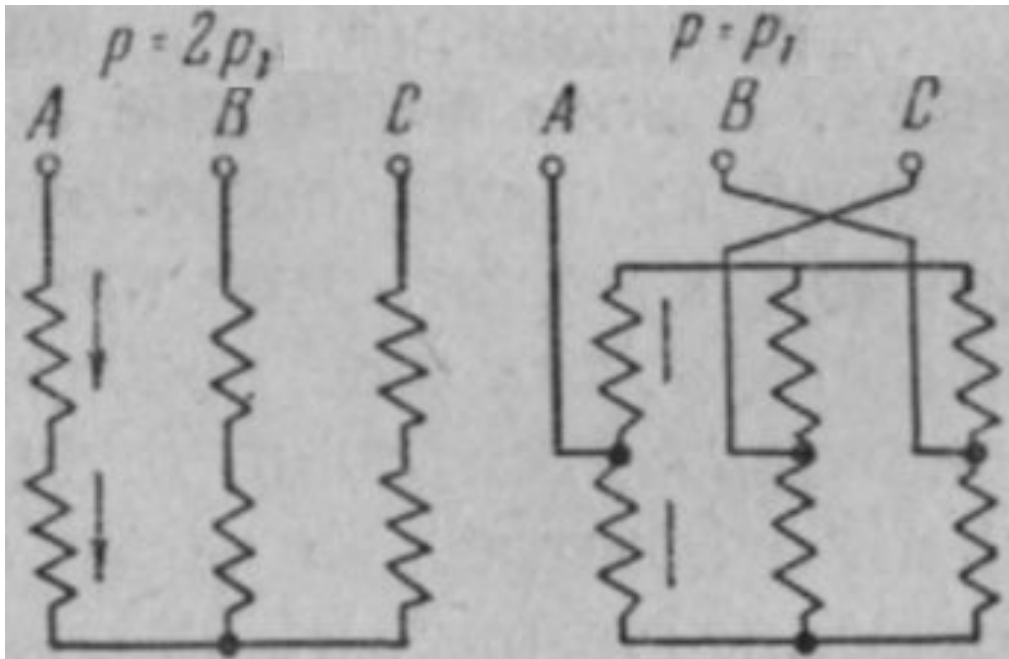
Поэтому  $P_2 = c \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot 2 I_{\text{ном}}$ .

И отношение будет

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{c U_{\text{л}} I_{\text{ном}}}{c \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot 2 I_{\text{ном}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87$$

т.е. категория схем с постоянной мощностью

## Звезда — двойная звезда (Y/Y<sub>Y</sub>)



$$p = 2p_1 \longleftrightarrow p = p_1$$

Напряжение также будет  $U_\phi$ ,  
но ток будет  $2 \cdot I_{\text{НОМ}}$ .

$$P_1 = c U_\phi I_{\text{НОМ}}$$

$$P_2 = c U_\phi \cdot 2 I_{\text{НОМ}}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{c U_\phi I_{\text{НОМ}}}{c U_\phi \cdot 2 I_{\text{НОМ}}} = \frac{1}{2}$$

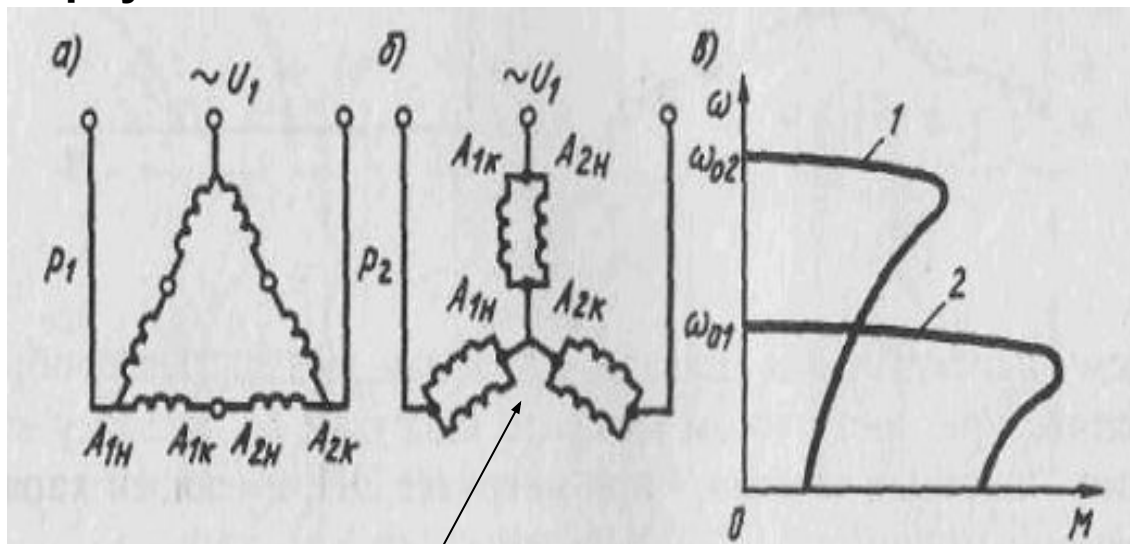
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{2}$$

$$\frac{M_1}{M_2} = 1$$

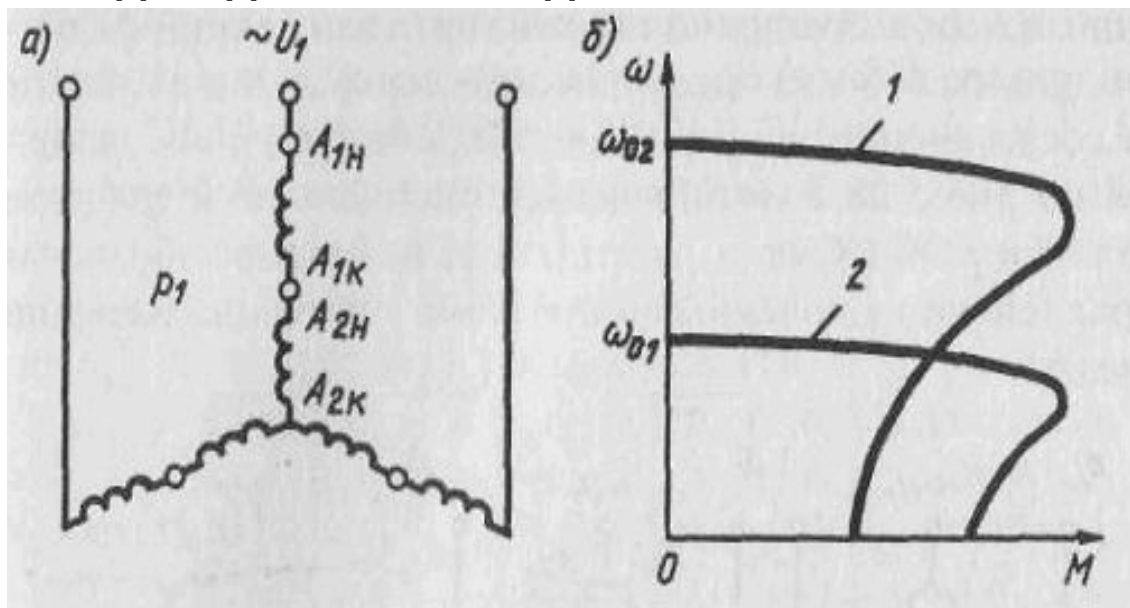
Эта схема должна считаться схемой с постоянным располагаемым моментом.

Наиболее часто применяется две схемы переключения:  $\Delta/Y\bar{Y}$  и  $Y/Y\bar{Y}$

### Треугольник – двойная звезда



### Звезда – двойная звезда



**Регулирование скорости изменением числа полюсов имеет следующие особенности:**

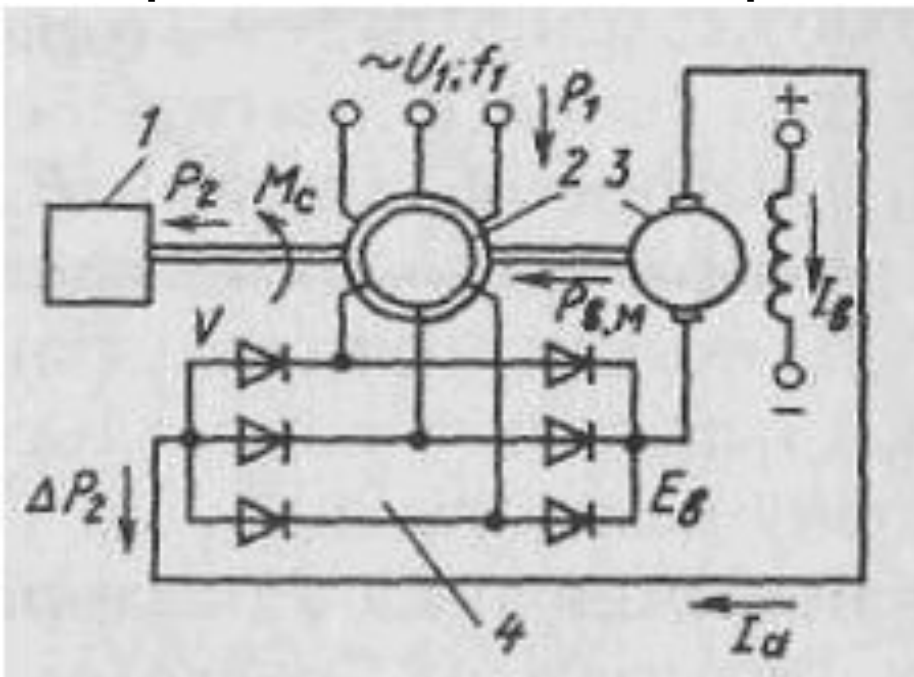
- возможно ступенчатое регулирование с отношением скоростей 1:2:3:4;**
- регулирование скорости не связано с существенными потерями энергии (хотя при большем числе полюсов к. п. д. двигателя несколько ниже);**
- механические характеристики при всех скоростях остаются жесткими;**
- располагаемая мощность и располагаемый момент могут изменяться по-разному для различных схем переключения полюсов;**
- существуют схемы с постоянной располагаемой мощностью и постоянным располагаемым моментом;**
- величина максимального момента зависит от примененной схемы переключения полюсов:**
- при большом числе скоростей число выводов делается большим, следовательно, требуется громоздкое коммутационное устройство.**



# Электромеханический машинно-вентильный каскад

В общем случае каскадными называют такие схемы включения АД, которые, обеспечивая регулирование его скорости, позволяют одновременно использовать энергию потерь.

По способу использования этой энергии различают схемы электромеханического и электрического машинно-вентильных каскадов.



Регулирование скорости АД некоторыми рассмотренными ранее способами сопровождается выделением в цепи ротора потерь мощности, называемых иногда потерями скольжения.

Это значительно снижает экономические показатели асинхронного ЭП.

Первые схемы, в которых использовалась энергия потерь в цепи ротора, создавались путем специального соединения АД с другими электрическими машинами, поэтому эти схемы получили название каскадных.

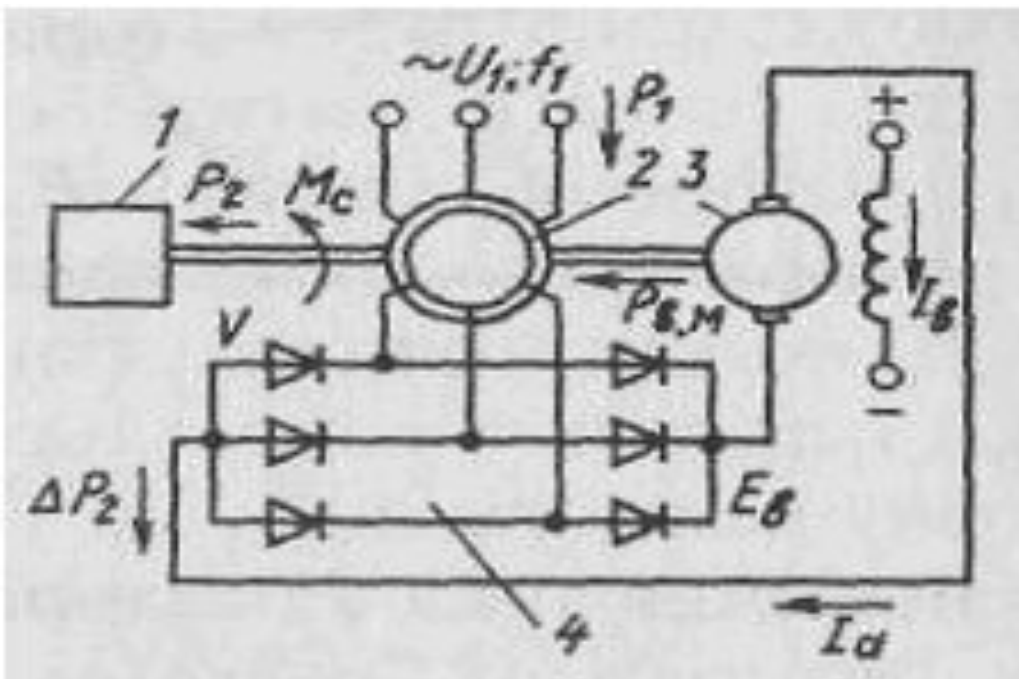
В настоящее время существуют схемы, использующие энергию скольжения АД не посредством добавочных электрических машин, а с помощью полупроводниковых приборов и трансформаторов, однако эти схемы также называют каскадными.

$$P_{ЭМ} = M\omega_0 \quad P_2 = M\omega \quad \Delta P_2 = M\omega_0 s$$

$$P_{р.м} = P_2 + P_{в.м} = M\omega + M\omega_0 s = M\omega_0 = P_{ЭМ}$$

Баланс мощности

# Электромеханический машинно-вентильный каскад



$$P_{эм} = M\omega_0 \quad P_2 = M\omega \quad \Delta P_2 = M\omega_0 s$$

$$P_{р.м} = P_2 + P_{в.м} = M\omega + M\omega_0 s = M\omega_0 = P_{эм}$$

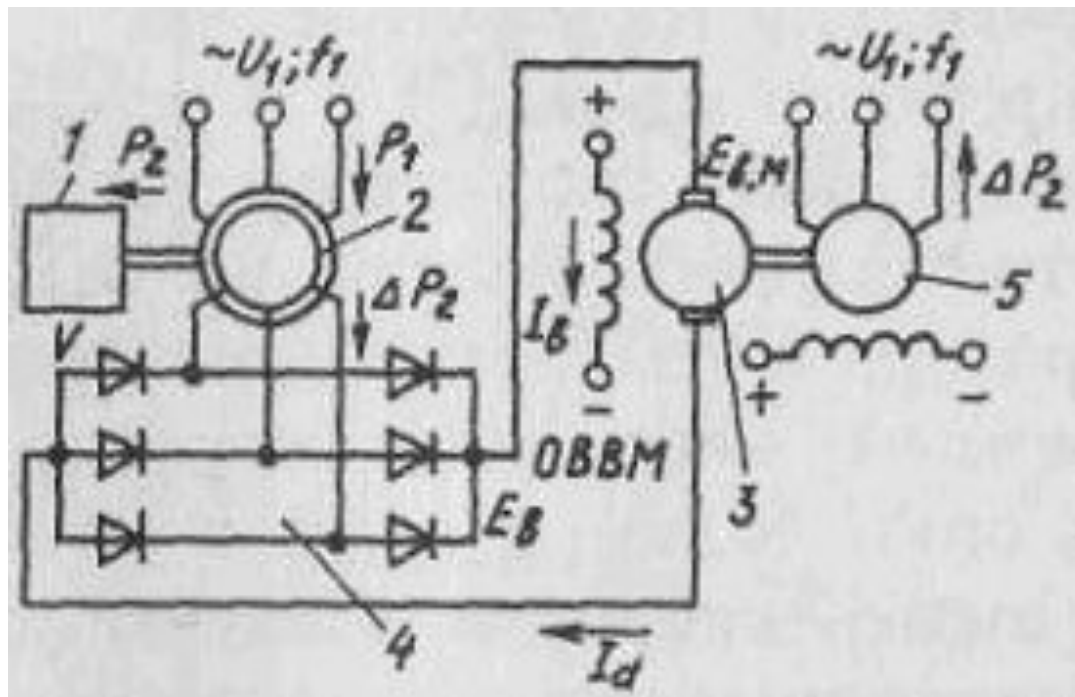
Баланс мощности

Обмотка ротора АД 2, приводящего в движение рабочую машину 1, подключается к трехфазному неуправляемому выпрямителю собранному на полупроводниковых вентилях.

К выводам выпрямителя присоединен якорь вспомогательной машины постоянного тока 3, ЭДС которой  $E_{вм}$  направлена навстречу ЭДС выпрямителя  $E_{в}$ . АД 2 и машина 3 соединены одним валом.

Поступающая из сети мощность  $P_1$ , за вычетом потерь в статоре АД 2 передается на ротор. Большая часть этой мощности, называемая выражением  $P_{эм} = M\omega_0$ , в виде полезной механической мощности  $P_2 = M\omega$  передается рабочей машине 1. Оставшаяся часть, определяющая мощность потерь скольжения  $\Delta P = M\omega_0 s$ , за вычетом потерь в цепях ротора АД 2, выпрямителя 4 и вспомогательной машины 3, с помощью последней преобразуется в механическую мощность и возвращается на вал рабочей машины.

# Электрический машинно-вентильный каскад



В электрическом машинно-вентильном каскаде вспомогательная машина 3 не имеет механической связи с АД 2, а соединена одним валом с синхронным генератором 5, подключенным к сети переменного тока, т. е. энергия потерь передается не на вал рабочей машины 1, а отдается в сеть, рабочей же машине передается только механическая мощность  $P_2 = M\omega$ .

$$I_d = (E_B - E_{B.M}) / R_c \quad E_2 = E_{2K} S$$

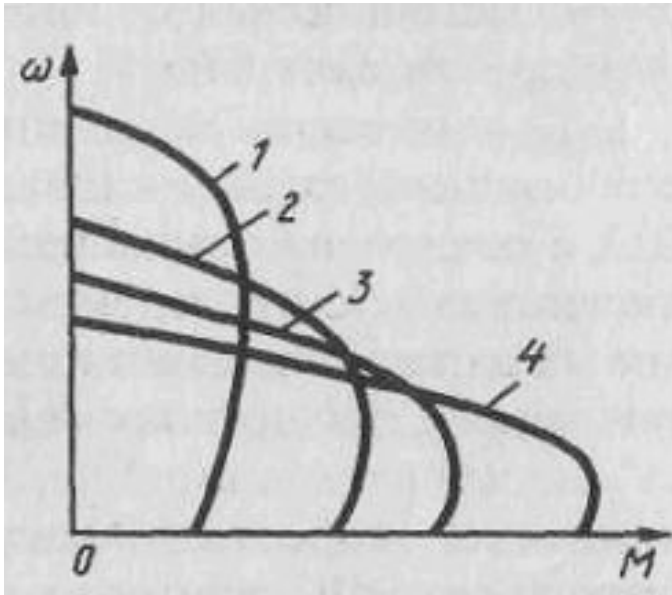
## ПРИНЦИП РАБОТЫ

Предположим, что при работе ЭП в установившемся режиме происходит увеличение тока возбуждения  $I_B$ , что влечет за собой увеличение ЭДС  $E_{B.M}$ , а следовательно, уменьшение выпрямленного тока, определяемого выражением

$$I_d = (E_B - E_{B.M}) / R_c$$

Уменьшение  $I_d$  и тем самым тока ротора АД вызовет снижение его момента, который станет меньше момента нагрузки  $M_c$ , создаваемого рабочей машиной 1. В результате скорость двигателя начнет снижаться, а его скольжение  $s$  и ЭДС роторной обмотки  $E_2 = E_{2K} s$  начнут возрастать. Увеличение ЭДС ротора приведет к увеличению тока ротора и тем самым момента АД, который вновь станет равным моменту нагрузки, и скорость АД перестанет изменяться. Двигатель опять будет работать в установившемся режиме, но уже при более 51 низкой скорости. В случае уменьшения тока  $I_B$  скорость АД будет возрастать.

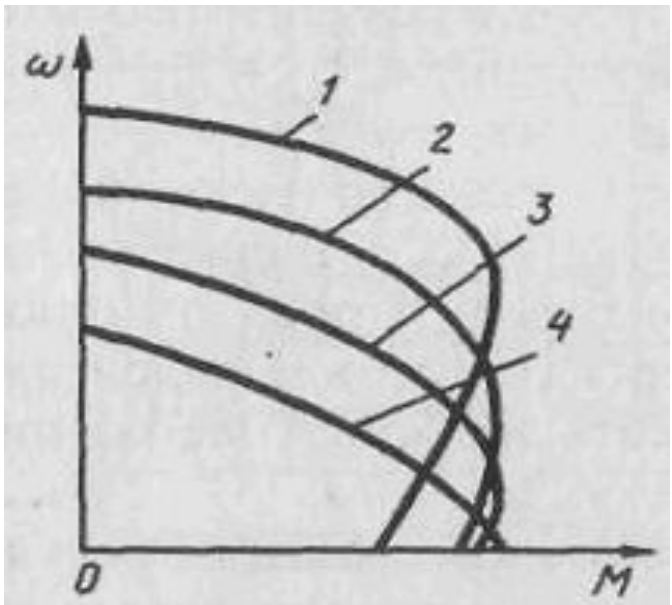
# Механические характеристики электромеханического и электрического каскадов



$$I_{в} = (0; 0,2; 0,4; 1,0) I_{в.ном}$$

Из рассмотрения механических характеристик

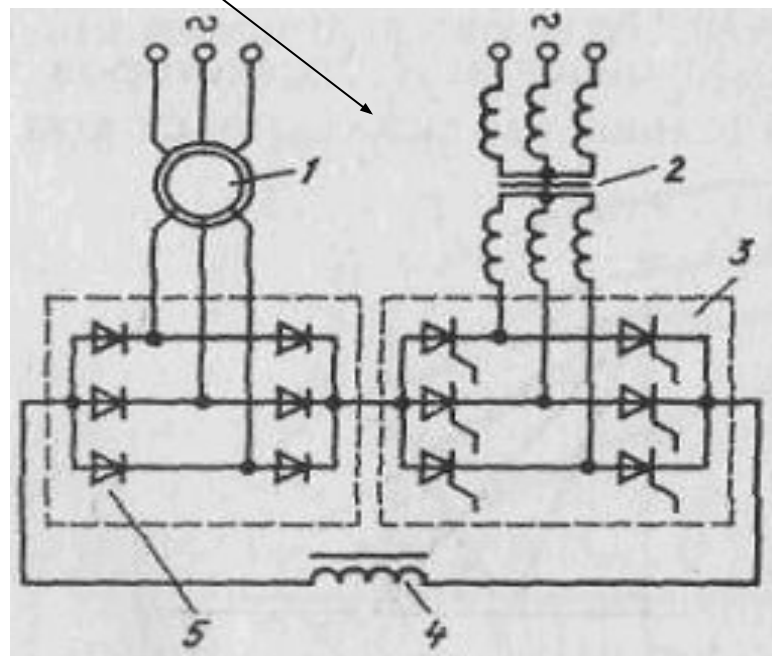
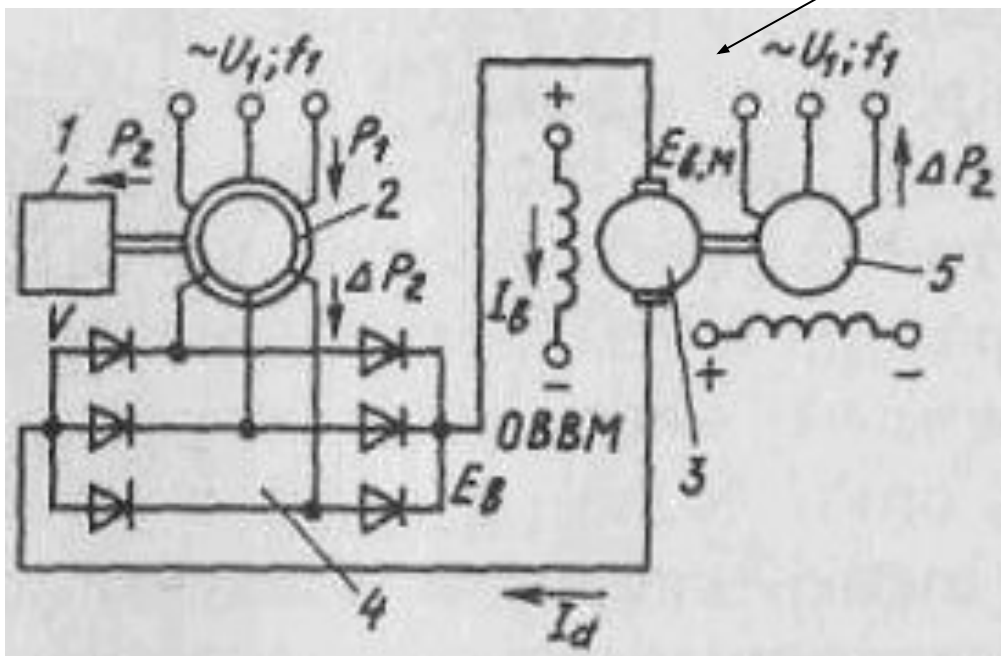
**электромеханического каскада** для разных значений токов возбуждения 1...4 (соответственно  $I_{в} = (0; 0,2; 0,4; 1,0) I_{в.ном}$ ) видно, что максимальный момент по мере снижения скорости каскада возрастает, поскольку по мере увеличения тока возбуждения вспомогательной машины ее момент также возрастает. При этом максимальная механическая мощность каскада, определяемая произведением максимального момента на соответствующую этому моменту скорость, при разных токах возбуждения вспомогательной машины примерно одинакова. Поэтому электромеханический каскад называют каскадом постоянной мощности.



При токе возбуждения вспомогательной машины, близком к нулю, механическая характеристика **электрического каскада** близка к естественной характеристике АД. По мере увеличения тока возбуждения искусственные характеристики 2 располагаются ниже естественной 1, причем номинальному току возбуждения соответствует самая нижняя характеристика. Максимальный момент каскада, определяемый только АД 2 (см. рис. 5.31), сохраняется на разных характеристиках примерно постоянным. Поэтому электрический каскад называют каскадом постоянного момента.

## Асинхронный вентильный каскад

В настоящее время в связи с широким распространением силовых тиристорных преобразователей появилась возможность заменять ими 1 электромашинные вращающиеся преобразователи. В частности, электромашинный агрегат 3...5 представляет собой преобразователь энергии постоянного тока, поступающей от выпрямителя в энергию переменного тока, отдаваемую в сеть. Такой машинный агрегат можно заменить статическим преобразователем частоты, состоящим из трансформатора 2 и инвертора 3.



В этой схеме к обмотке ротора АД 1 подключены неуправляемый выпрямитель 5 и инвертор 3, а также реактор 4, который служит для сглаживания пульсации выпрямленного тока. Асинхронный ЭП с такой схемой получил название асинхронного вентильного каскада.

## Свойство

**\*регулирование скорости производится вниз** от естественной характеристики, хотя некоторые специальные каскадные схемы обеспечивают и двухзонное регулирование.

## Недостатки:

**\*практический диапазон регулирования скорости** в каскадных схемах обычно **не превышает 2**.

Объясняется это тем, что по мере роста диапазона регулирования скорости и тем самым скольжения АД требуется увеличивать установленную мощность всех устройств в его роторной цепи. (Так, при диапазоне регулирования равном двум, установленная мощность машинно-вентильного электрического каскада составляет 250% от номинальной мощности АД, из которых на собственно АД приходится 100%, а на выпрямитель, вспомогательную машину и синхронный генератор – по 50%.);

**\*значительные капитальные затраты** при реализации данного способа регулирования скорости.

## Достоинства:

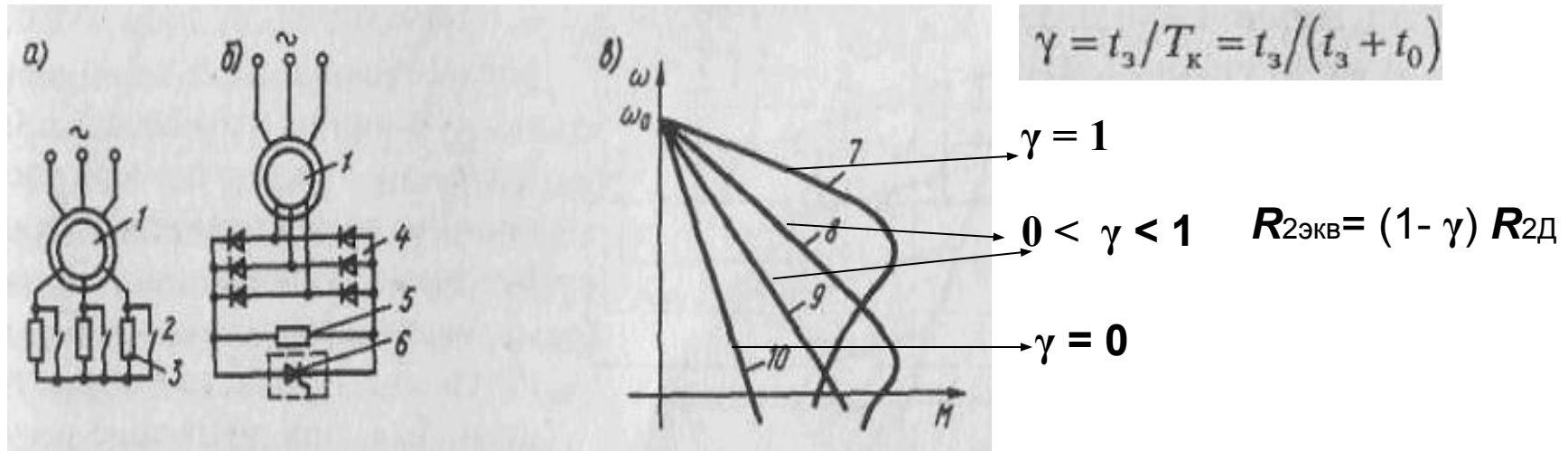
**\*плавность регулирования скорости АД** в каскадных схемах высокая и **определяется плавностью изменения ЭДС вспомогательной машины или ПЧ;**

**\*применение каскадных схем за счет использования энергии скольжения для полезной работы оказывается экономически целесообразным для мощных асинхронных ЭП с небольшим диапазоном регулирования скорости.**

Это ЭП мощных вентиляторов, центробежных насосов, компрессоров, воздуходувок, испытательных установок.

# ИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Сущность его заключается в периодическом (импульсном) изменении параметров цепей АД или питающей сети. Применительно к асинхронному ЭП чаще всего осуществляется импульсное изменение подводимого к АД напряжения или сопротивлений резисторов в цепях ротора или статора. Эти способы применяются главным образом для регулирования скорости, хотя при необходимости они позволяют регулировать (ограничивать) ток и момент АД.

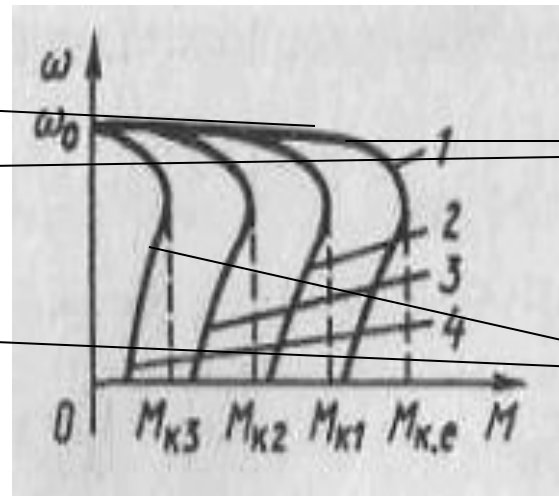
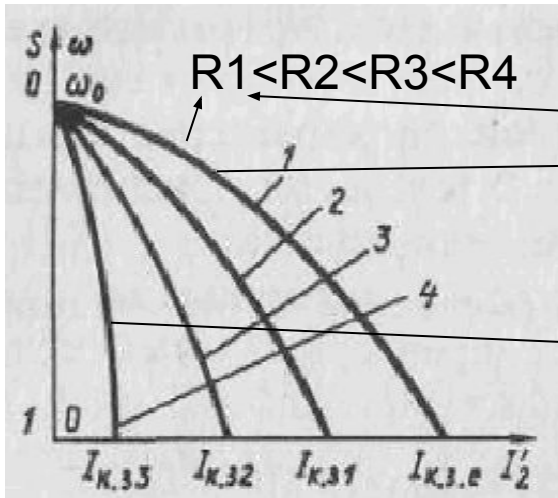
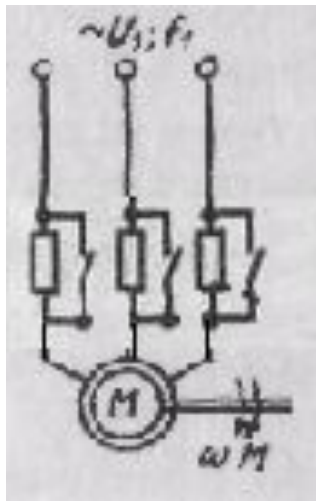


Для импульсного регулирования сопротивления  $R_{2\text{д}}$  резисторов 3 в цепи ротора АД 1 параллельно им включаются контакты 2 управляемого ключа (например, электромагнитного или тиристорного контактора), работающего с изменяемым заполнением (скважностью)  $0 < \gamma < 1$ .

Аналогично работает и схема импульсного регулирования сопротивления резистора 5, включенного в цепь выпрямленного тока ротора АД 1 с выпрямителями 4. Шунтирование резистора 5 осуществляется с помощью тиристорного ключа 6, который также работает с управляемым заполнением  $\gamma$ .

# ИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

## Ключи параллельно сопротивлению в цепи статора



$$\gamma = t_3 / T_k = t_3 / (t_3 + t_0)$$

$$\gamma = 1$$

$$0 < \gamma < 1$$

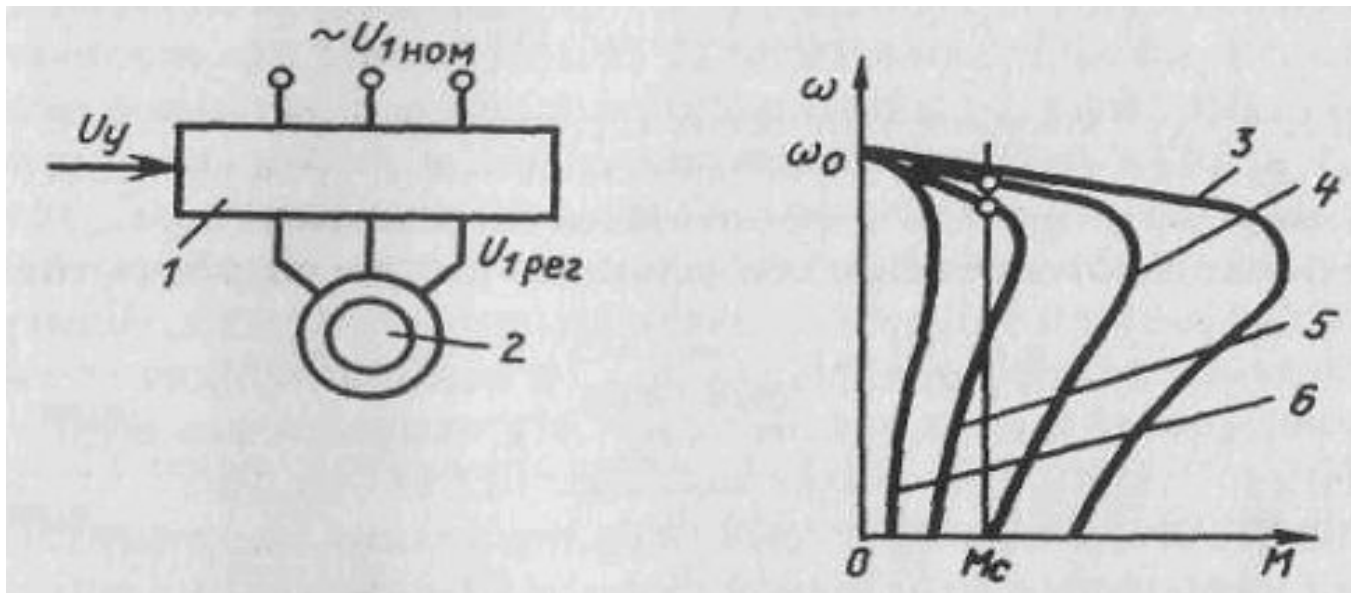
$$\gamma = 0$$

Таким же образом можно получить характеристики АД при импульсном регулировании сопротивления  $R_{1д}$  добавочных резисторов в цепи статора. Включение управляемых ключей параллельно резисторам в схеме и их работа с переменным заполнением  $\gamma$  обеспечивает получение искусственных электромеханических и механических характеристик АД в виде кривых показанных на рисунках.



# ИМПУЛЬСНЫЙ СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ КООРДИНАТ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Импульсное регулирование напряжения на статоре АД может быть реализовано с помощью тиристорного регулятора напряжения.



Для улучшения показателей регулирования координат АД импульсным способом создаются замкнутые ЭП с использованием различных обратных связей. В результате автоматического регулирования  $\gamma$  механические характеристики АД становятся жесткими. Схемы замкнутого регулирования будут рассмотрены в дальнейшем.

Использование импульсных способов позволяет в ряде случаев осуществлять регулирование координат ЭП с помощью более простых схем управления.

# ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

## Торможение противовключением

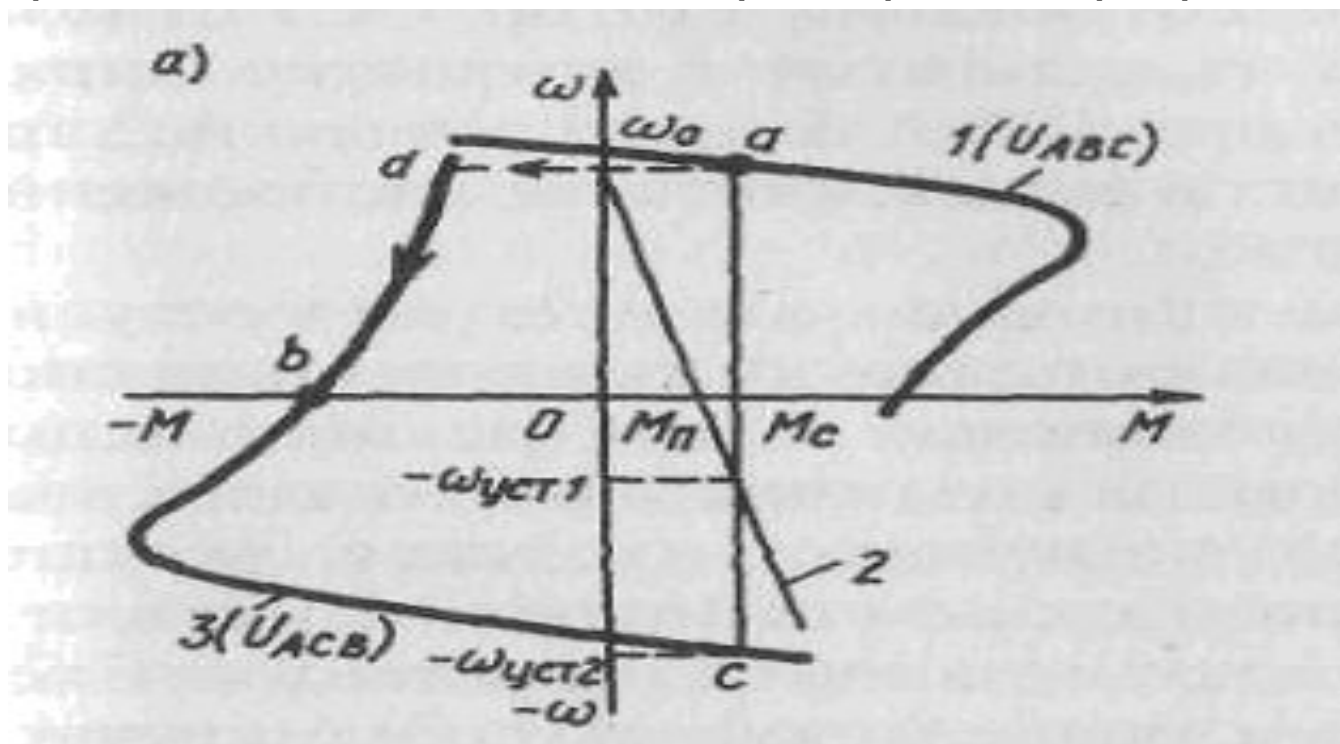
Осуществляется двумя путями

·Один из них связан с изменением чередования на статоре двух фаз питающего АД напряжения.

Допустим, например, что АД работает по механической характеристике 1 в точке *a*.

При переключении двух фаз (например, В и С) АД переходит на работу по характеристике 3 в точке *d*, участок *db* которой соответствует торможению противовключением.

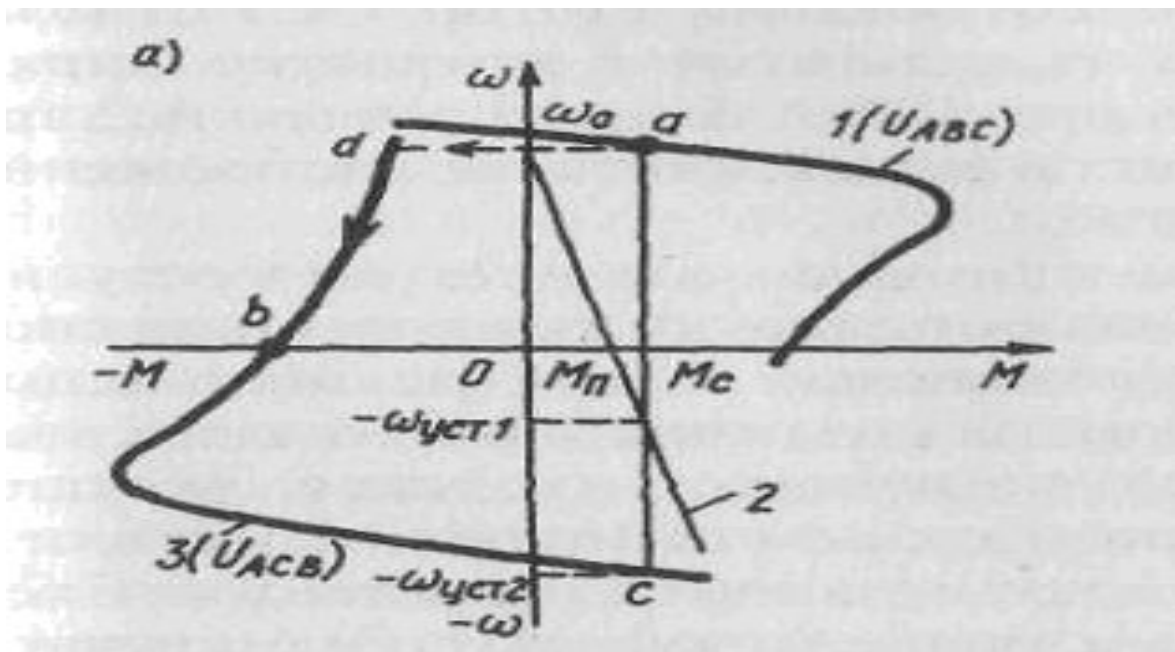
Отметим, что при реализации торможения для ограничения тока и момента АД производится включение добавочных резисторов в цепь ротора или статора.



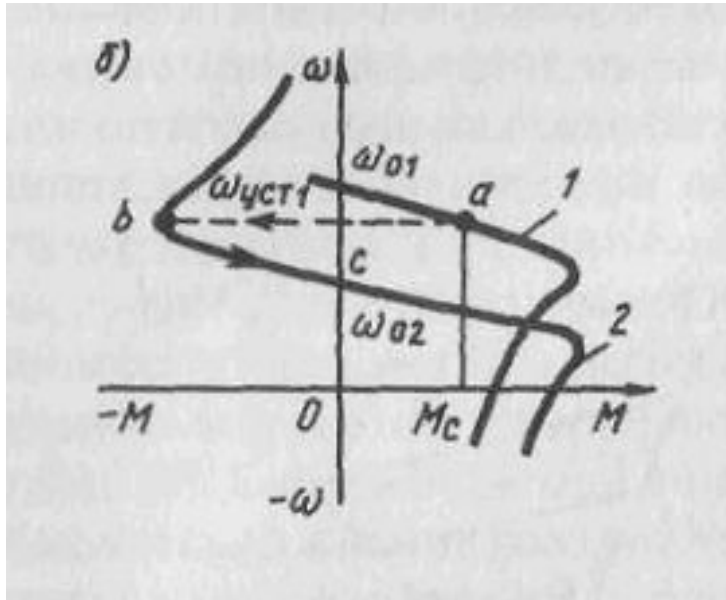
# ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

## Торможение противовключением

· Другой путь перевода АД в режим торможения противовключением может быть использован при активном характере момента нагрузки  $M_c$ . Допустим, что требуется осуществить спуск груза, обеспечивая его торможение с помощью АД (так называемый тормозной спуск груза). Для этого АД включается на подъем с большим добавочным сопротивлением  $R_{2д}$  в цепи ротора (кривая 2). Вследствие превышения моментом нагрузки  $M_c$  пускового момента двигателя  $M_n$  и его активного характера груз начнет опускаться с установившейся скоростью  $-\omega_{уст}$ . АД при этом будет работать в режиме торможения противовключением.

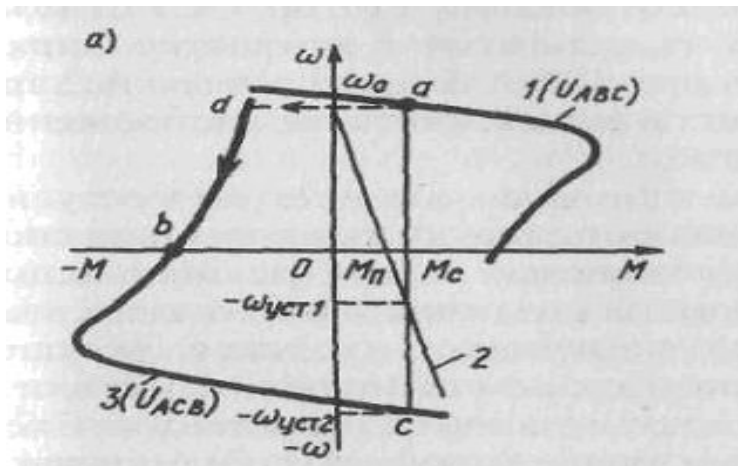


## Рекуперативное торможение



Осуществляется в том случае, когда скорость АД превышает синхронную  $\omega_0$  и он работает в генераторном режиме параллельно с сетью. Такой режим возникает, например, при переходе двухскоростного АД с высокой скорости на низкую, как это показано на рисунке.

В исходном положении АД работал по характеристике 1 в точке  $a$ , вращаясь со скоростью  $\omega_{уст1}$ . При увеличении числа пар полюсов АД переходит на работу по характеристике 2 в точке  $b$ , участок  $bc$  которой соответствует торможению с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть.



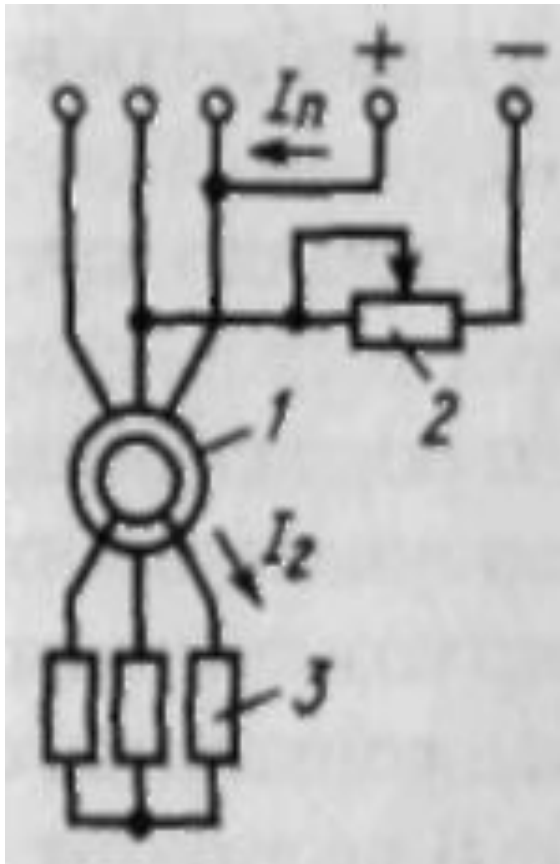
Рекуперативное торможение также может быть реализовано в ЭП грузоподъемных механизмов при спуске грузов. Для этого АД включается в направлении спуска груза (характеристика 3 на рис.). После окончания разбега он будет работать в точке  $c$  со скоростью  $-\omega_{уст2}$ . При этом осуществляется процесс спуска груза с отдачей энергии в сеть.

## Рекуперативное торможение

Этот же вид торможения может быть реализован в системе «преобразователь частоты – двигатель» при останове АД или его переходе с характеристики на характеристику. Для этого осуществляется уменьшение частоты выходного напряжения ПЧ, а значит, и синхронной скорости  $\omega_0$ . В силу механической инерции текущая скорость АД  $\omega$  будет изменяться медленнее, чем скорость вращения магнитного поля  $\omega_0$ , т. е. будет постоянно ее превышать. За счет этого и возникает режим торможения с отдачей энергии в сеть. Отметим, что ПЧ должен быть способен при этом передать энергию от двигателя в сеть.

Рекуперативное торможение является наиболее экономичным видом торможения АД.

## Динамическое торможение



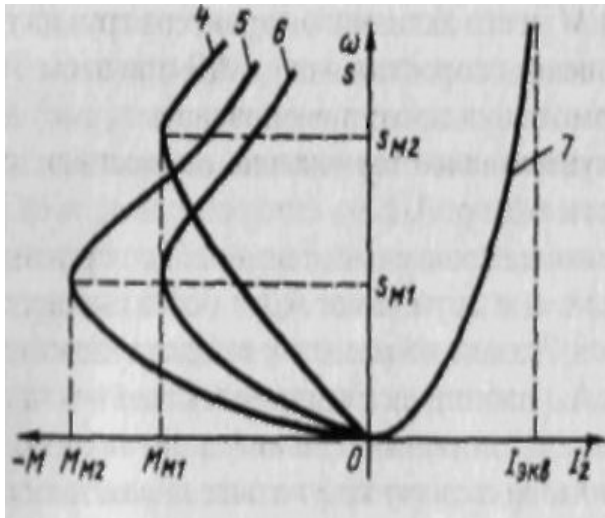
Обмотку статора АД отключают от сети переменного тока и подключают к источнику постоянного тока, как это показано на рисунке. Обмотка ротора АД при этом может быть закорочена или в ее цепь включаются добавочные резисторы 3 с сопротивлением  $R_{2д}$ .

Постоянный ток  $I_{\Pi}$  протекает по обмоткам статора и создает неподвижное в пространстве магнитное поле (возбуждает АД). При вращении ротора в нем наводится ЭДС, под действием которой в обмотке протекает ток, создающий магнитный поток, также неподвижный в пространстве.

Взаимодействие тока ротора с результирующим магнитным полем АД создает тормозной момент, за счет которого достигается эффект торможения.

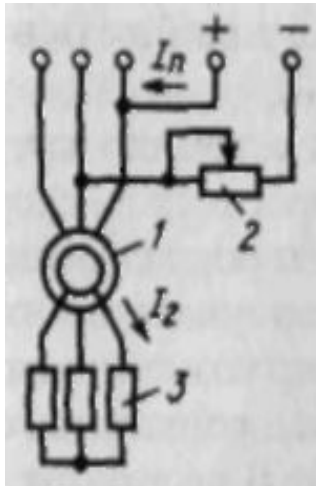
Двигатель в этом случае работает в режиме генератора, преобразовывая кинетическую энергию движущихся частей ЭП и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде тепла в цепи ротора.

## Динамическое торможение



Формулы для характеристик АД в режиме динамического торможения выводятся на основании анализа его схемы замещения. Опуская вывод формул, представим графически электромеханическую  $I_2'(s)$  (кривая 7) и механические  $M(s)$  кривые 4... 6 характеристики АД.

Характеристика  $I_2'(s)$  расположена на рисунке в первом квадранте, где  $s = \omega/\omega_0$  – скольжение АД в режиме динамического торможения. Механические характеристики АД расположены во втором квадранте.



Различные искусственные механические характеристики АД в режиме динамического торможения можно получить, изменяя сопротивление  $R_{2д}$  добавочных резисторов 3 в цепи ротора или постоянный ток  $I_{п}$ , подаваемый в обмотки статора.

На рисунке показаны механические характеристики АД для различных сочетаний  $I_{п}$  и  $R_{2д}$ . Характеристика 6 соответствует току  $I_{п1}$  и сопротивлению резистора  $R_{2д1}$ , максимальный момент на ней равен  $M_{м1}$ , а скольжение, ему соответствующее, -  $s_{м1}$ .

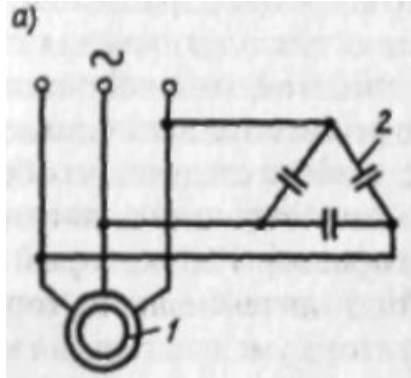
Увеличение сопротивления резисторов 3  $R_{2д2} > R_{2д1}$  при  $I_{п} = \text{const}$  не приводит к изменению максимального момента, в то время как максимальное скольжение  $s_{м}$  при этом пропорционально возрастает, что видно из характеристики 4.

Увеличение тока  $I_{п}$  ( $I_{п2} > I_{п1}$ ) при  $R_{2д1} = \text{const}$  вызывает увеличение максимального момента пропорционально квадрату тока. Характеристика двигателя в этом случае имеет вид кривой 5.

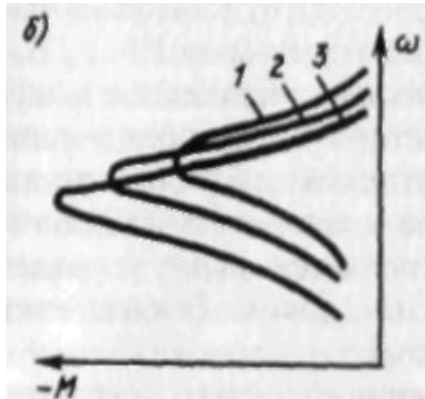
Варьируя значения  $I_{п}$  и  $R_{2д}$ , можно получить желаемый вид механических характеристик АД в режиме динамического торможения и тем самым соответствующую интенсивность торможения асинхронного ЭП.

## Торможение при самовозбуждении

Основано на том, что после отключения АД от сети его электромагнитное поле затухает (исчезает не мгновенно) в течение некоторого, пусть и небольшого интервала времени. За счет энергии этого затухающего поля и использования специальных схем включения АД можно обеспечить его самовозбуждение и реализовать тормозной режим. На практике применение нашли так называемые конденсаторное и магнитное торможение АД.



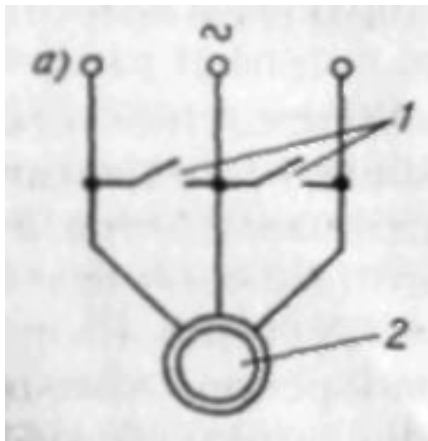
При конденсаторном торможении, схема которого приведена на рисунке, возбуждение АД 1 осуществляется с помощью конденсаторов 2, подключаемых к статору. Отметим, что конденсаторы могут подключаться к статору постоянно (глухое подключение) или с помощью дополнительного контактора, будучи при этом соединенными в схему треугольника или звезды.



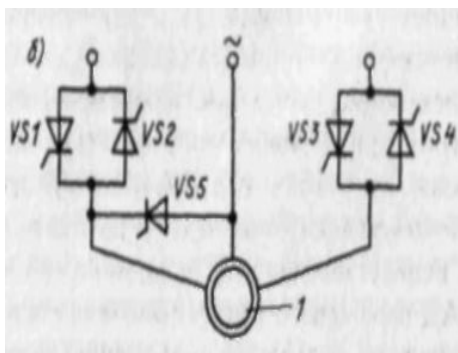
Определяющим фактором, от которого зависит интенсивность торможения, является емкость конденсаторов  $C$  (кривые 1 ... 3 соответствуют значениям  $C_1, < C_2 < C_3$ ). Чем она больше, тем больше будет максимум тормозного момента, а характеристики будут смещаться в область низких скоростей АД.



## Торможение при самовозбуждении



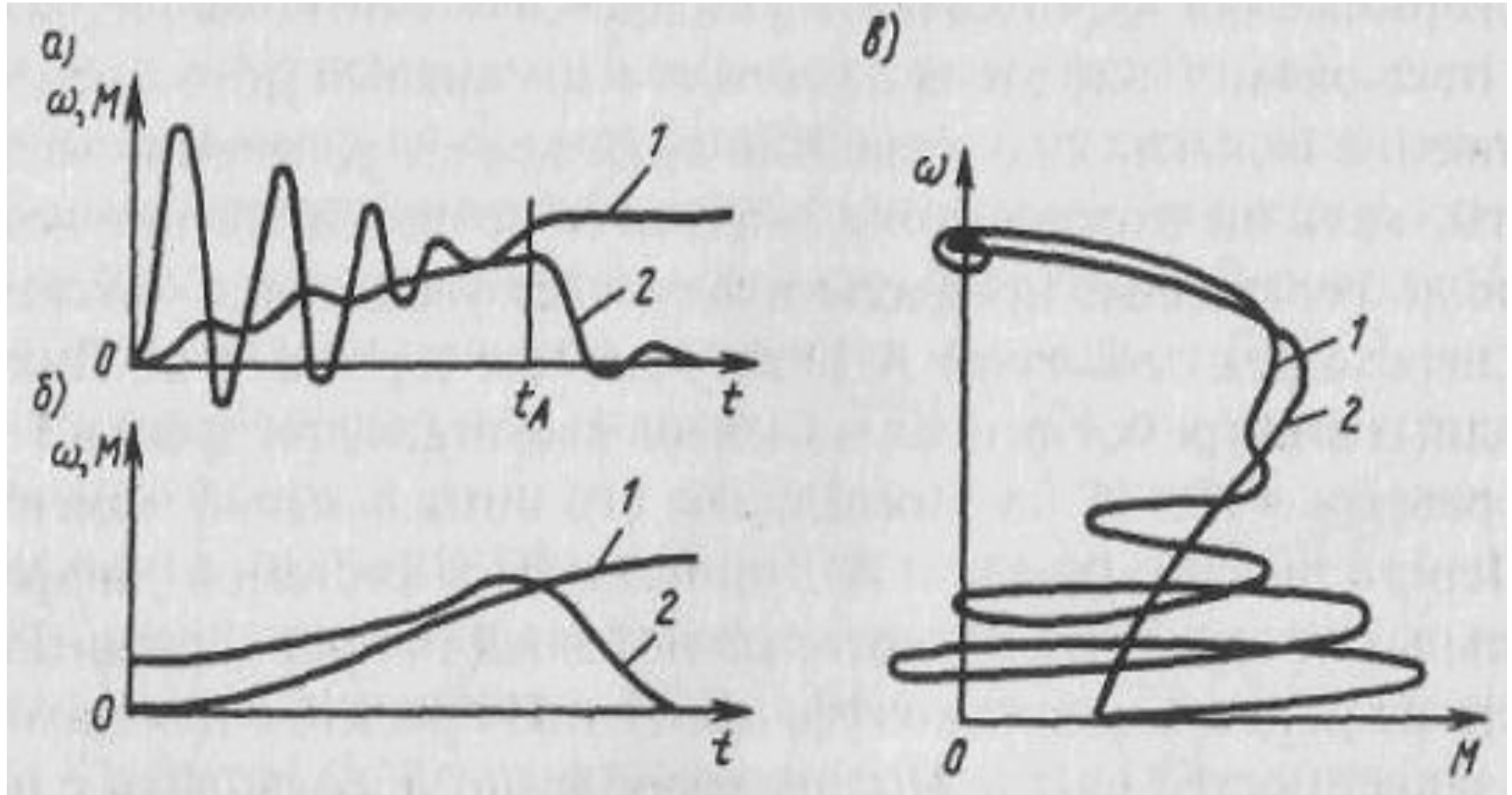
**Магнитное торможение**, общая схема которого показана на рисунке, реализуется после отключения статора двигателя 2 от сети и замыкания с помощью контактов 1 его выводов накоротко. За счет запасенной в двигателе электромагнитной энергии происходит самовозбуждение двигателя и на его валу создается тормозной момент. Особенностью такого торможения является быстротечность, определяемая небольшим временем затухания магнитного поля двигателя, однако возникающие тормозные моменты достаточно велики и обеспечивают интенсивное торможение ЭП.



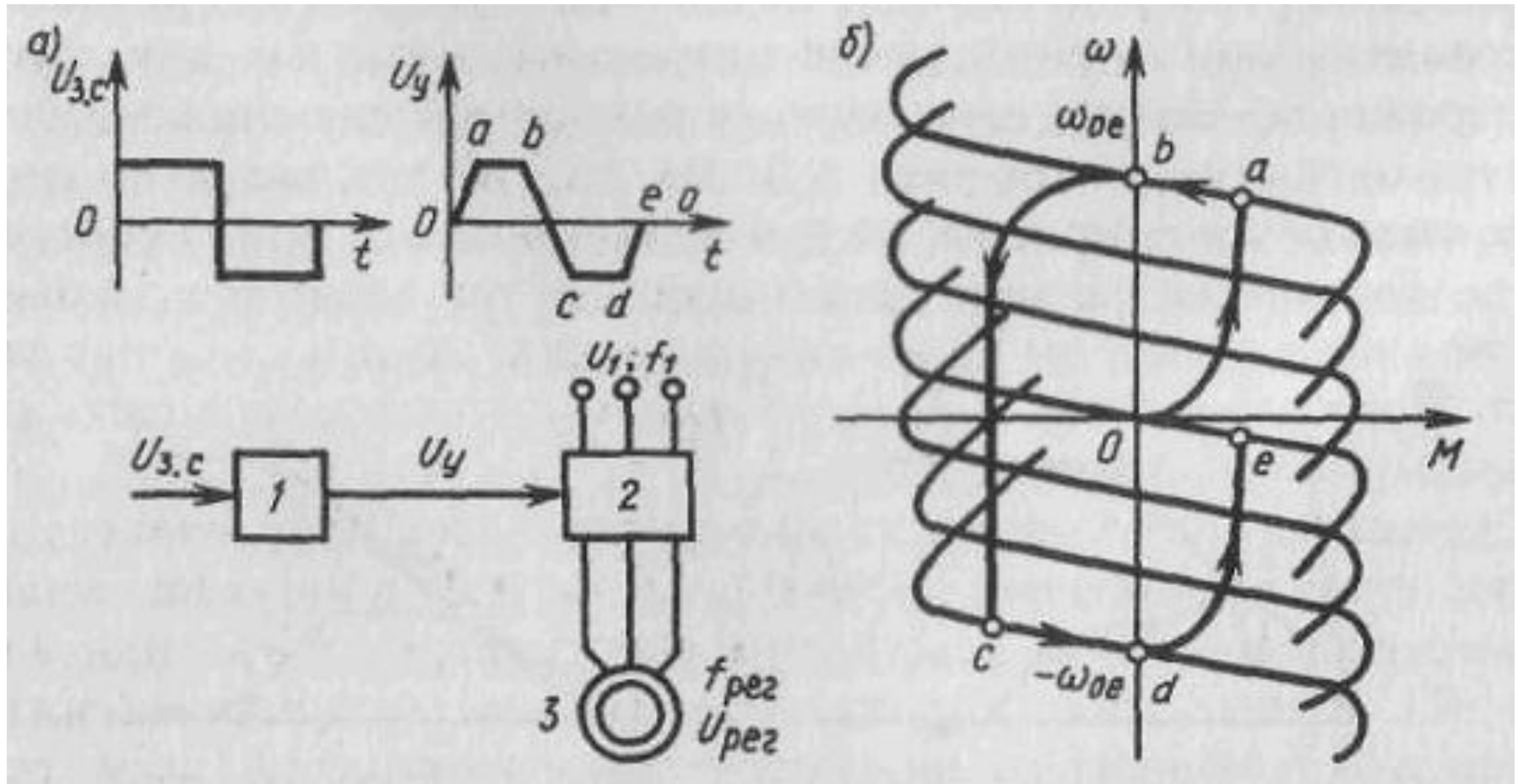
Возможности торможения АД существенно расширило использование тиристорных регуляторов напряжения. Для обеспечения интенсивного торможения двигателя часто используется комбинированный способ, например динамическое торможение в сочетании с торможением коротким замыканием. Этот способ может быть реализован тиристорным устройством, состоящим из двух пар встречно-параллельно включенных тиристоров VS1 ... VS4, служащих для подключения или отключения двигателя 1 от источника питания, и дополнительного тиристора VS5 для реализации торможения коротким замыканием обмоток статора.

Торможение осуществляется следующим образом. После закрытия тиристоров VS1 ... VS4 и отключения двигателя от сети подается сигнал управления на тиристор VS5, который замыкает накоротко две фазы статора. Когда интенсивность торможения коротким замыканием обмоток статора уменьшится, сигнал управления подается на тиристор VS1, который пропускает в цепь статора выпрямленный ток и тем самым обеспечивает режим динамического торможения.

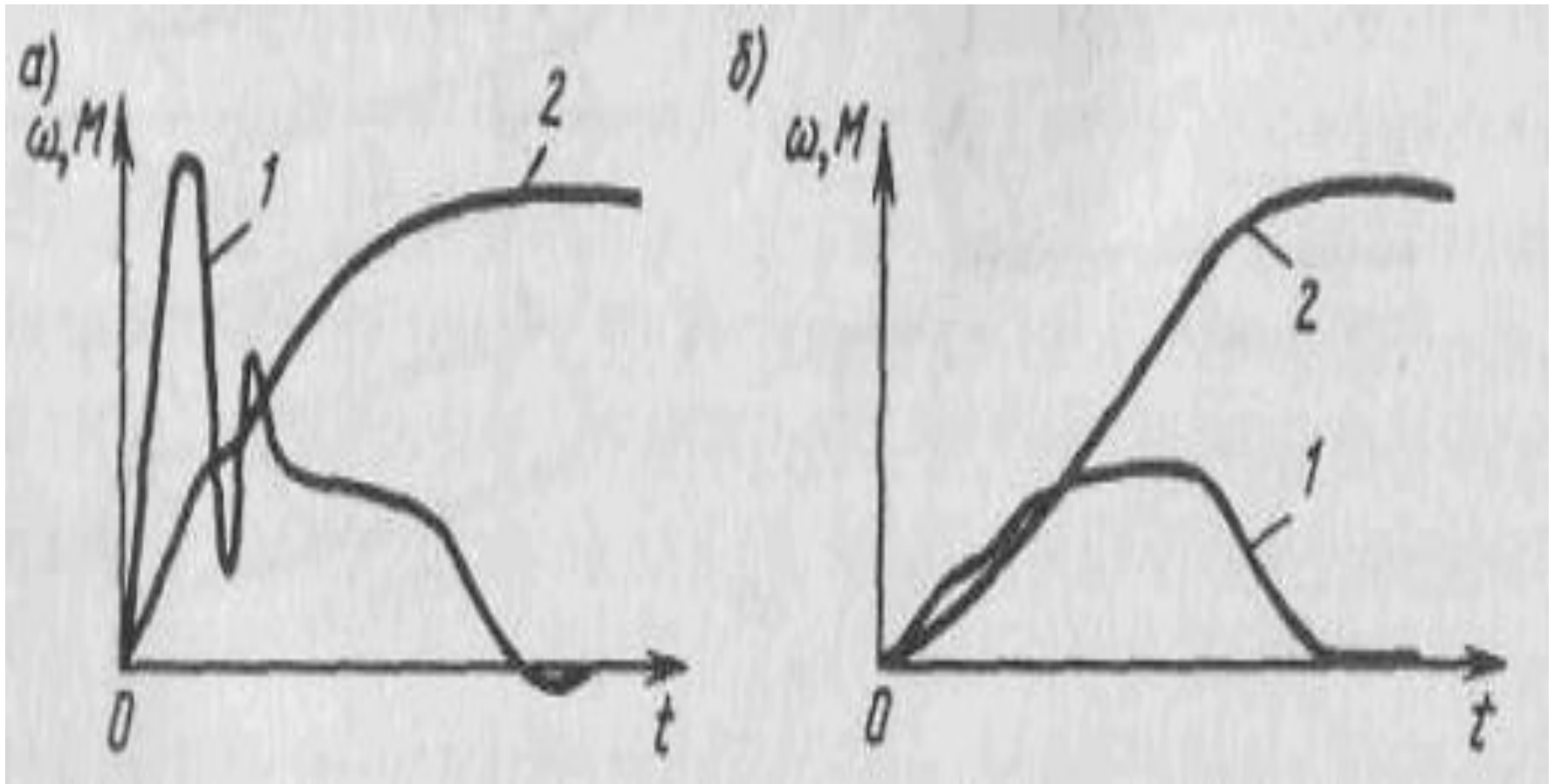
# Переходные процессы в АД и их формирование



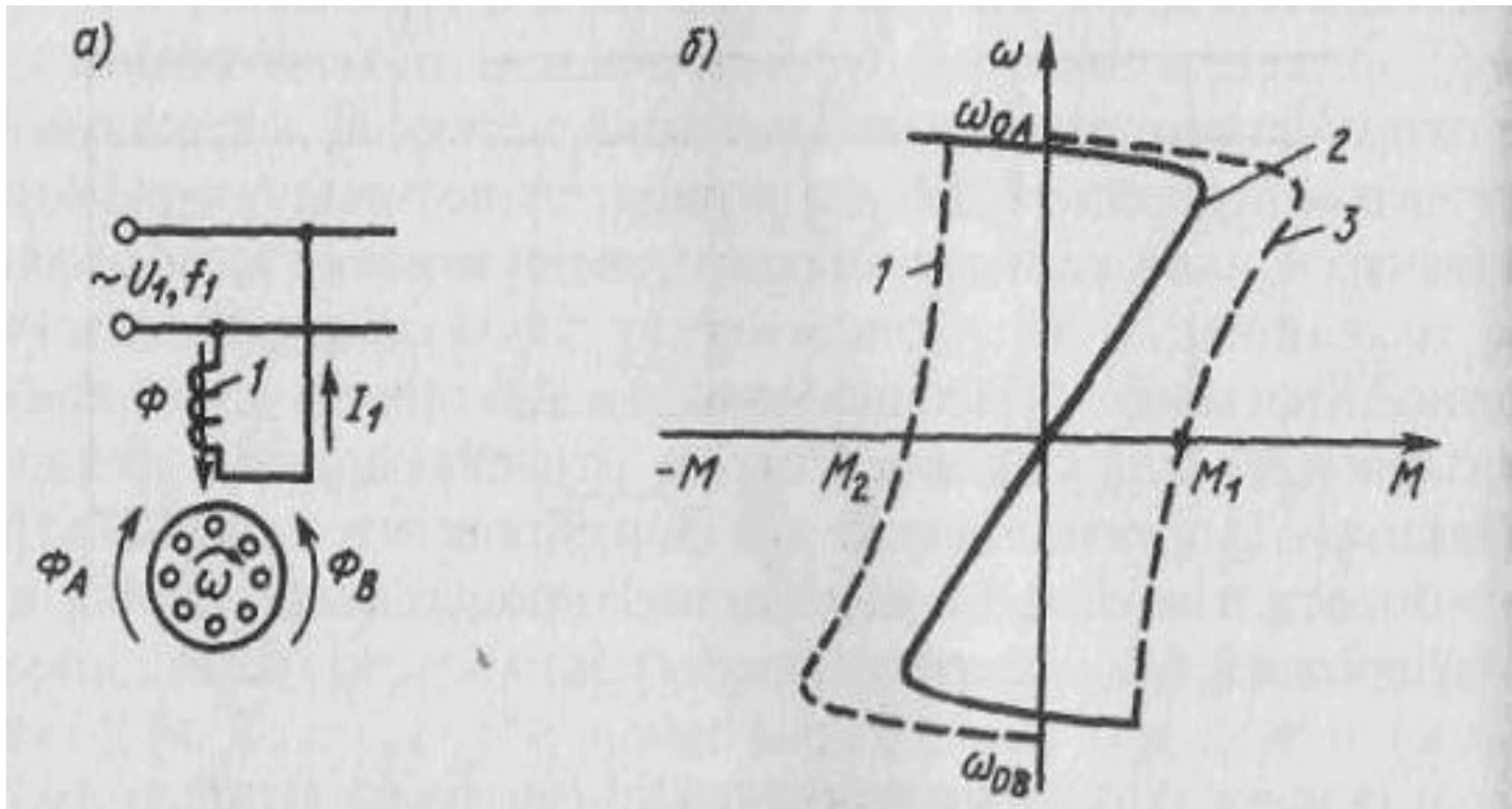
# Переходные процессы в системе ПЧ-АД



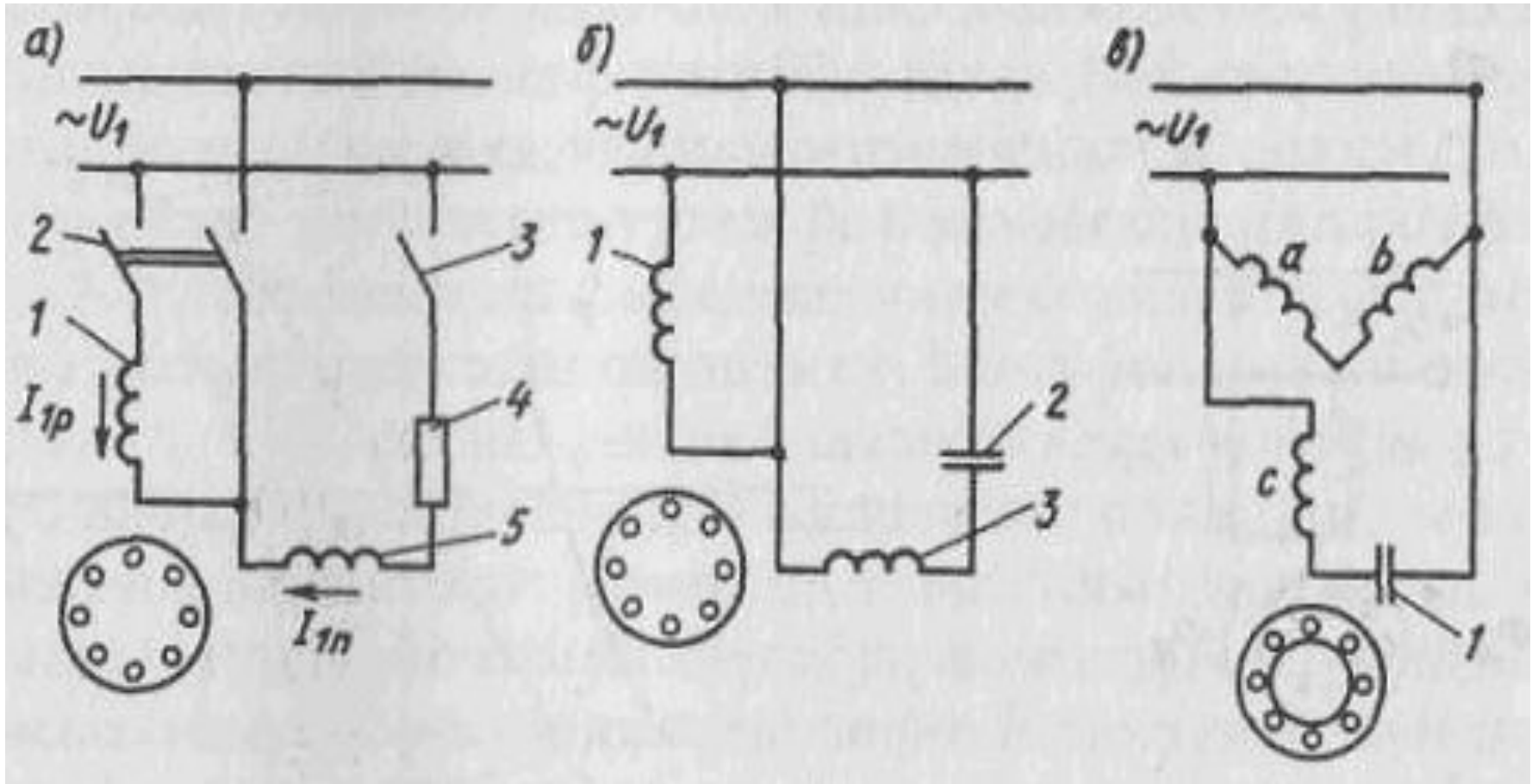
# Переходные процессы в системе ТРН-АД



# Электропривод с однофазным АД



# Разновидности однофазных АД



# Разновидности однофазных АД

