



ФГБОУ ВО ЮГУ  
ИНСТИТУТ  
НЕФТИ И ГАЗА

# Электрические машины

Дюба Елена Александровна  
с.т.преподаватель направления 13.03.02

г.Ханты-Мансийск

## Электромагнитный момент и механические характеристики асинхронного двигателя

Электромагнитный момент асинхронного двигателя создается взаимодействием тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем. Электромагнитный момент  $M$  пропорционален электромагнитной мощности:

$$M = P_{эм} / \omega_1 = 9,55 P_{эм} / n_1$$

где  $\omega_1 = 2\pi n / 60 = 2\pi f_1 / p$  — синхронная угловая скорость вращения (рад/с);

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

*т.е. электромагнитный момент асинхронного двигателя пропорционален мощности электрических потерь в обмотке ротора.*

Если приведенное значение тока ротора подставить в выше приведенную формулы, получим формулу электромагнитного момента асинхронной машины (Н-м):

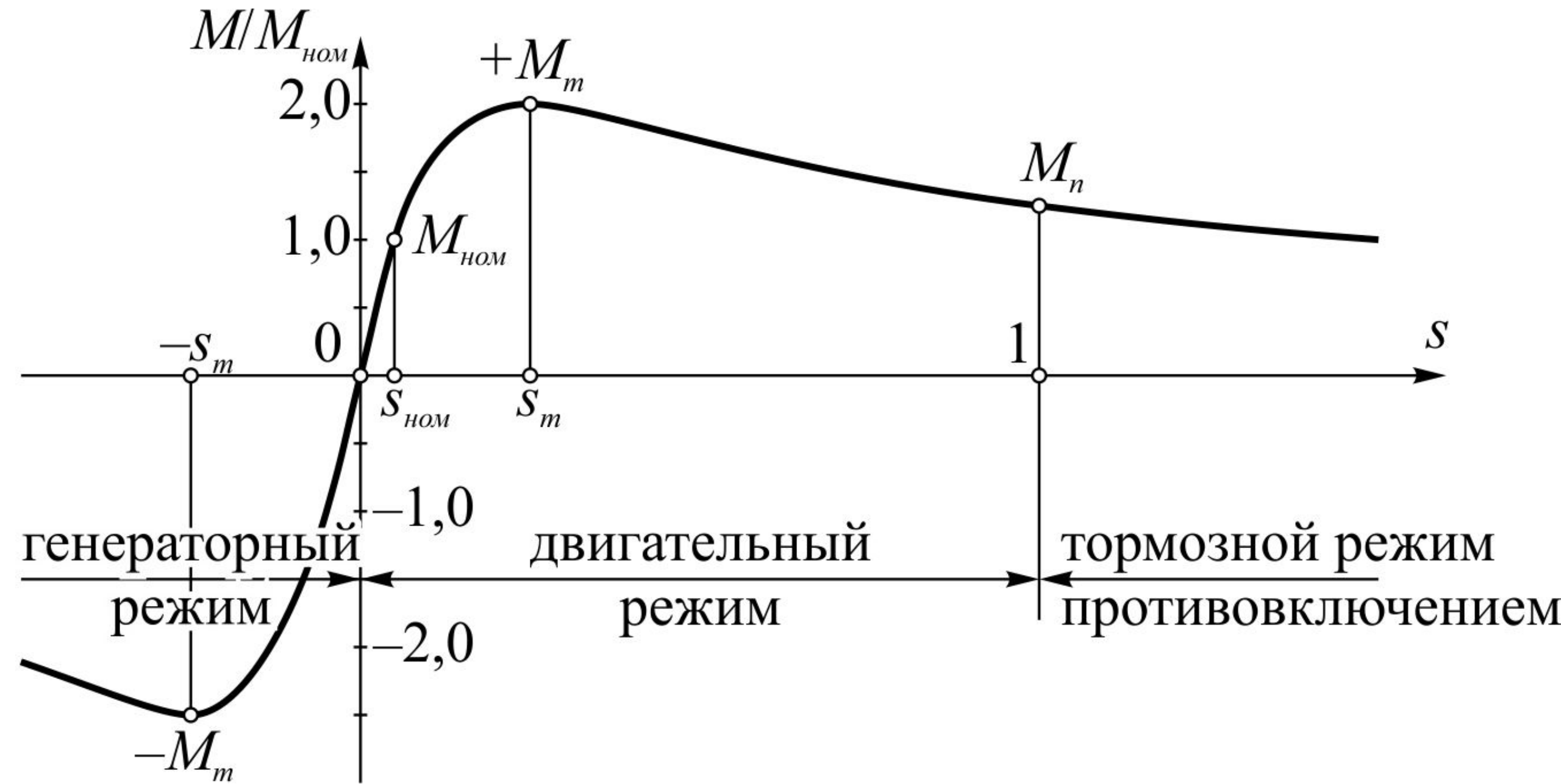
$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r_2' \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$

Параметры схемы замещения асинхронной машины  $r_2$ ,  $r_2'$ ,  $x_1$  и  $x_2'$ , с некоторым приближением можно считать постоянными величинами. Постоянными также можно считать напряжение на обмотке фазы статора  $U_1$  и частоту тока в сети  $f_1$ . В выражении момента  $M$  единственная *переменная* величина — *скольжение*  $s$ . Величина скольжения асинхронной машины зависит не только от нагрузки, но и от режима работы. При различных режимах работы асинхронной машины скольжение может принимать разные значения в диапазоне от  $+\infty$  до  $-\infty$ . Графически выраженная зависимость момента от скольжения  $M = f(s)$  при  $U_1 = \text{const}$ ,  $f_1 = \text{const}$  и постоянных параметрах схемы замещения представляет собой *механическую характеристику асинхронной машины*. Анализ этого уравнения, показывает, что при значениях скольжения  $s = 0$  и  $s = \infty$  электромагнитный момент  $M = 0$ . Из этого следует, что механическая характеристика  $M = f(s)$  имеет максимум.

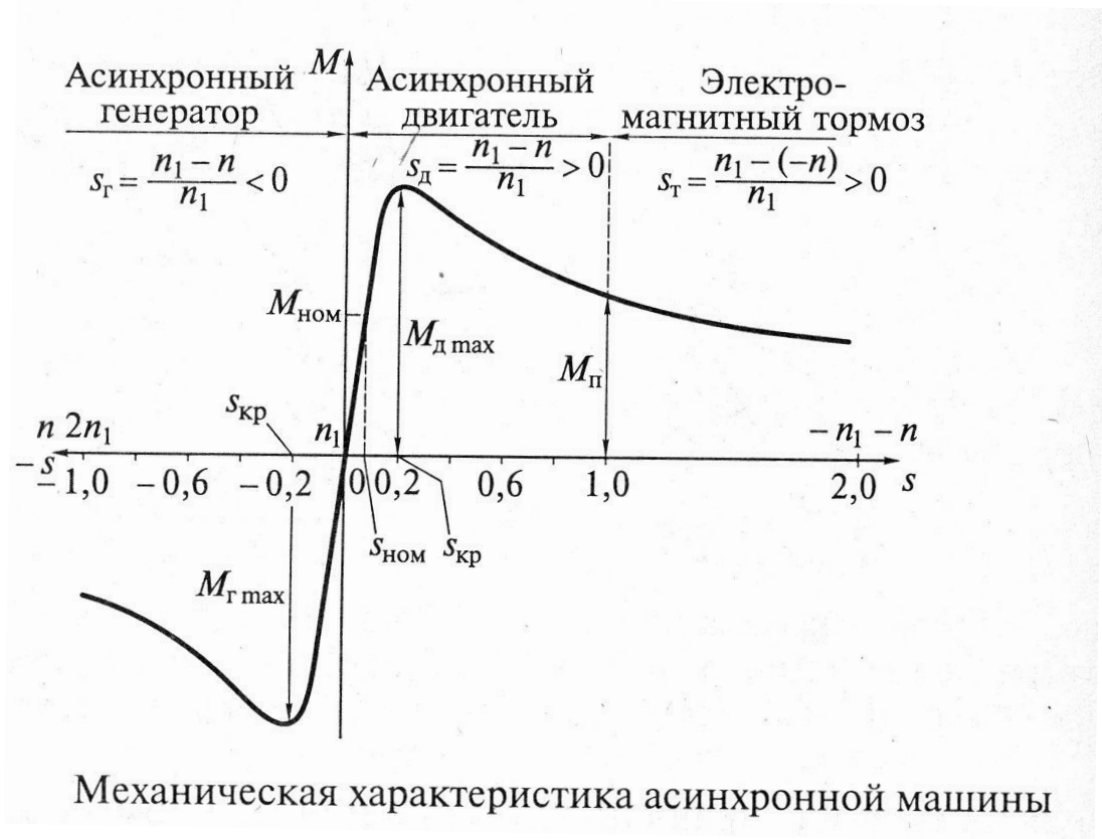
Для определения величины критического скольжения  $s_{кр}$ , соответствующего максимальному моменту, необходимо взять первую производную от выражения и приравнять ее к нулю:  $dM/ds = 0$ .

В результате получим:

$$s_{кр} = \pm r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} . \quad M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4\pi f_1 [\pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}]}$$



## Электромагнитный момент и механические характеристики асинхронного двигателя



$$M = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r'_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left( r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$

$$s_{кр} = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[ \pm r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]}$$

$$M = f(S)$$

**Участок от 0 до  $M_{НОМ}$**

$$M_B \uparrow \rightarrow S \uparrow \rightarrow I_2 \uparrow \rightarrow \cos \psi_2 = \frac{R_2}{Z_2} \downarrow \rightarrow I_1 \uparrow \rightarrow M \uparrow$$

$$M_B = M$$

**Участок от  $M_{НОМ}$  до  $M_{МАХ}$  это  
возможная перегрузка**

**Участок  $M_{max}$  до  $M_{пуск}$  ( $S = 1$ )  
это неустойчивый режим.**

$$S \geq S_{KP} \uparrow \rightarrow I_2 = const \rightarrow \cos \psi_2 \downarrow$$

$$M_B > M$$

Для расчета момента можно использовать уравнение Клосса.

$$M = \frac{2M_H}{\frac{S_{KP}}{S} + \frac{S}{S_{KP}}}$$

$$M_H = 9550 \frac{P_H}{n_H}$$

## Приближенный расчет механической характеристики АД

Применение формулы для расчета механических характеристик асинхронных двигателей не всегда возможно, так как параметры схемы замещения двигателей обычно не приводятся в каталогах и справочниках, поэтому для практических расчетов обычно пользуются упрощенной формулой момента. В основу этой формулы положено допущение, что активное сопротивление обмотки статора асинхронного двигателя  $r_1 = 0$ , при этом

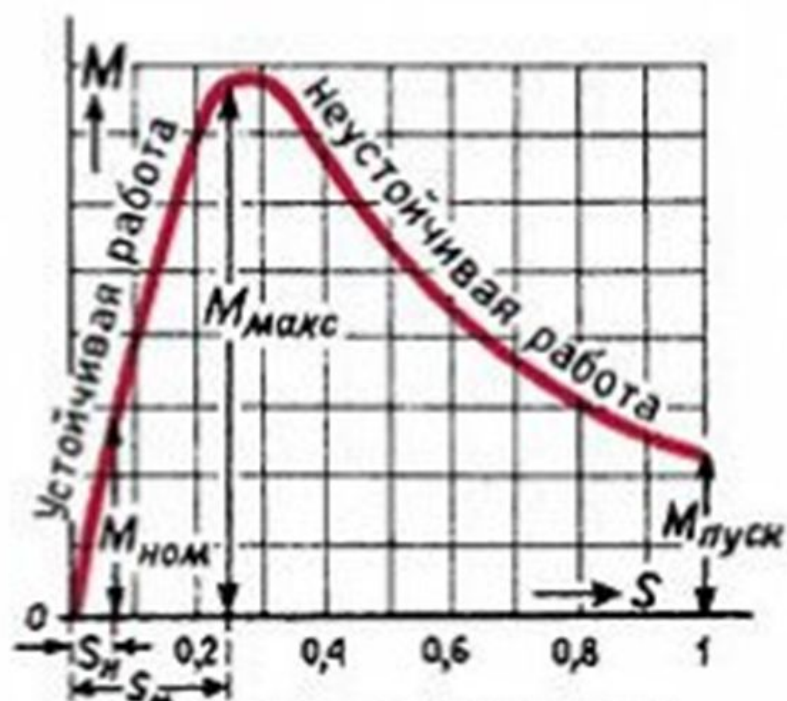
$$M = M_{\max} \cdot \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

$$\lambda = \frac{M_{\max}}{M_{\text{ном}}}$$

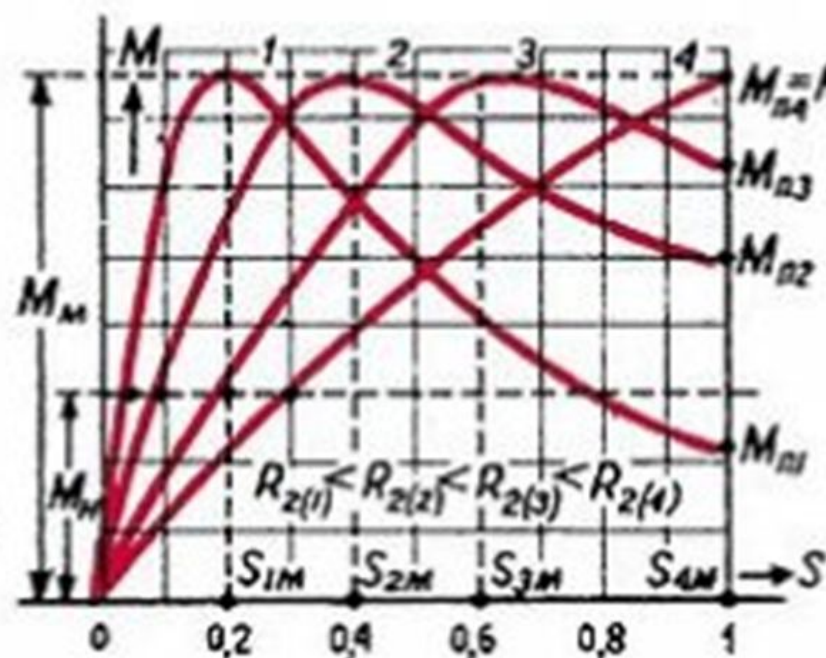
$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \cdot (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$$

$$M_* = \frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

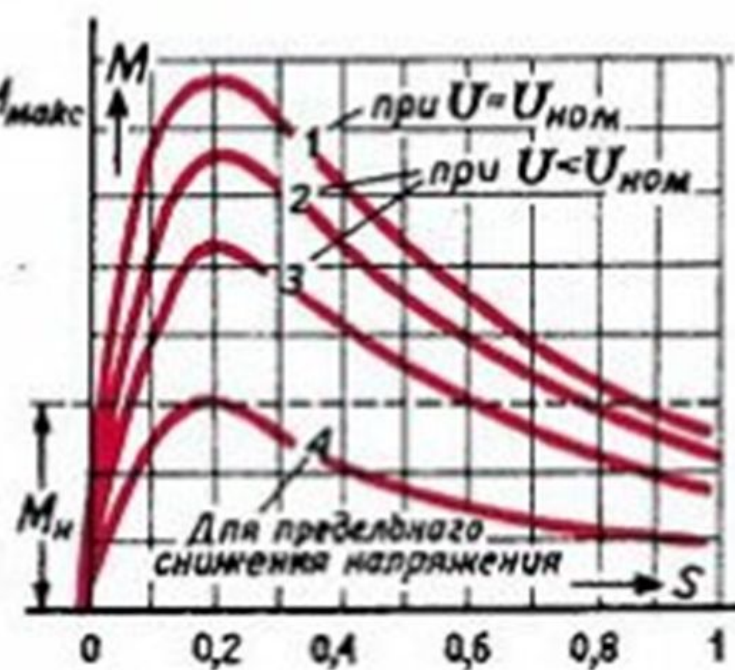




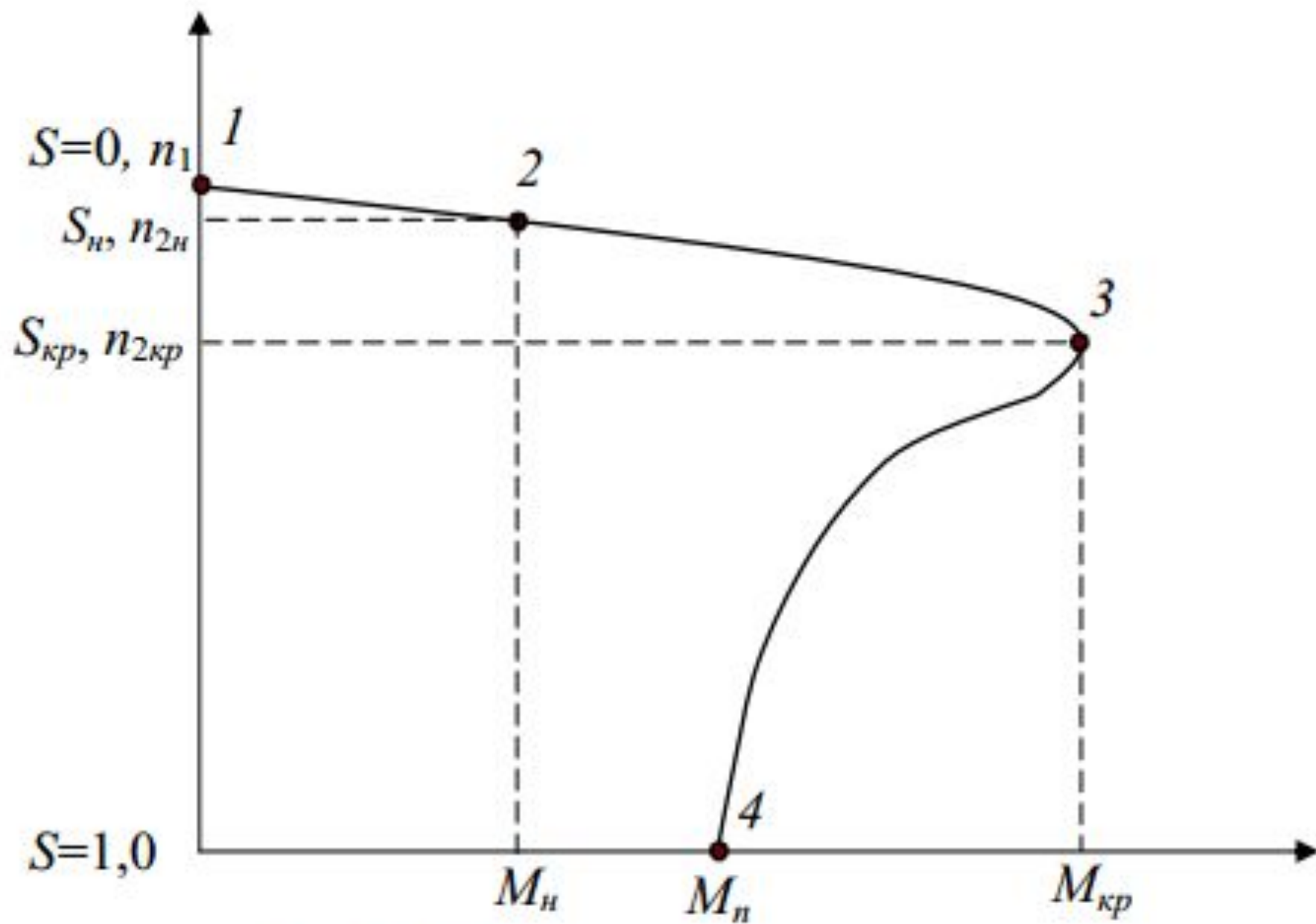
Зависимость вращающего момента от скольжения (механическая характеристика двигателя)

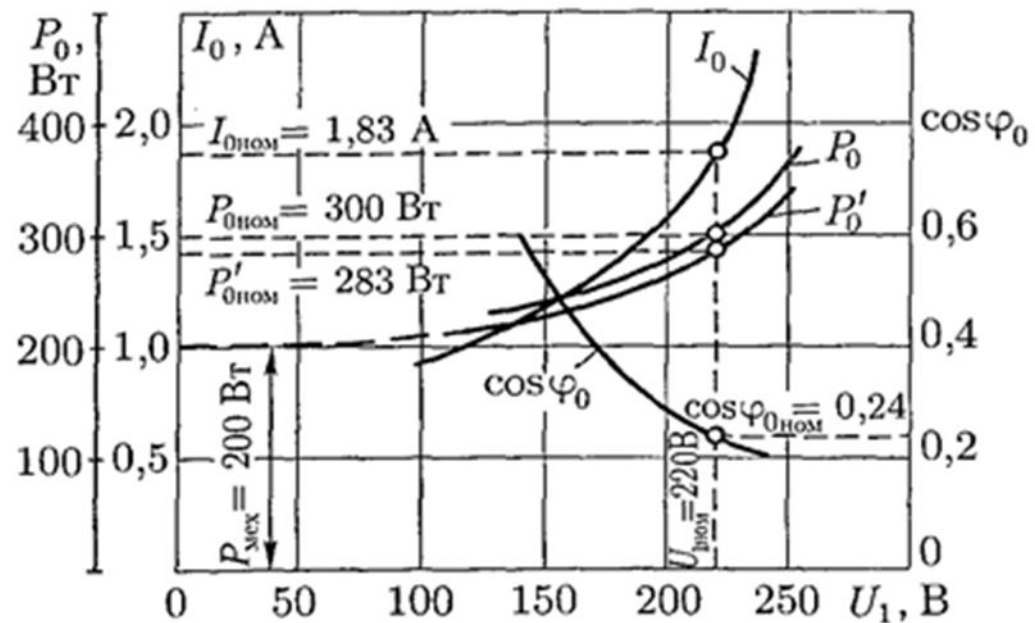
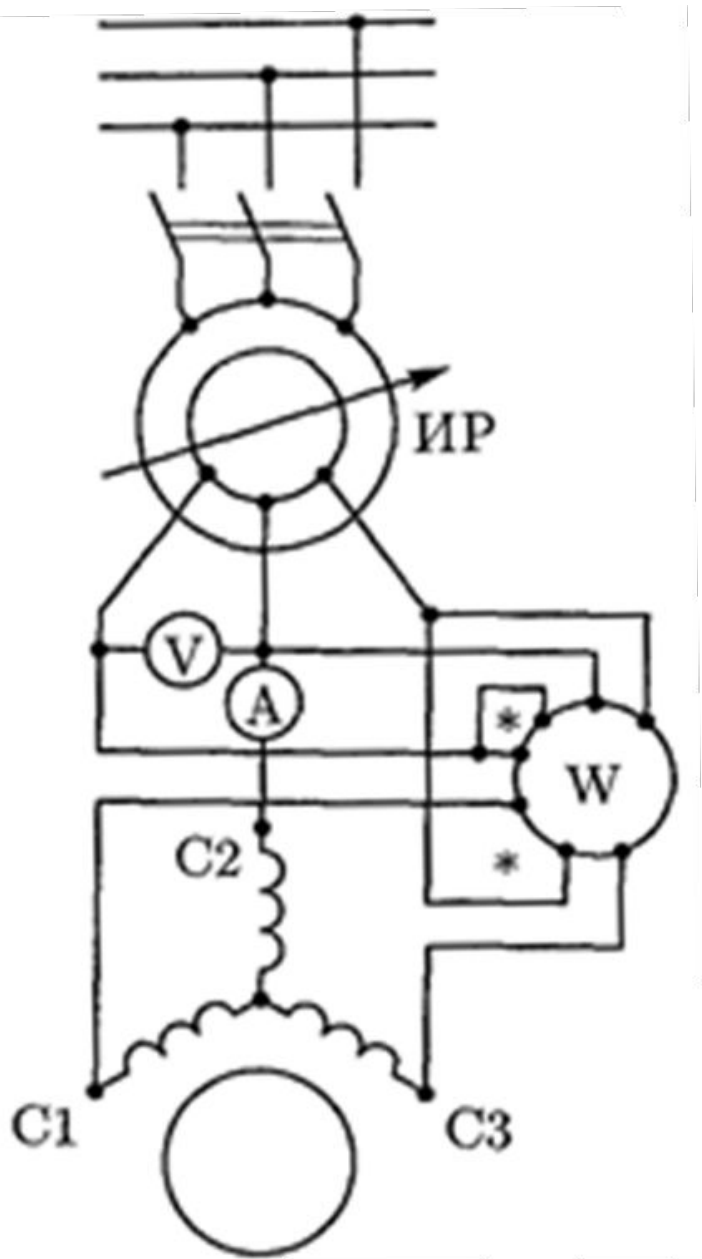


Зависимость вращающего момента от сопротивления цепи ротора  $R_2$



Зависимость вращающего момента от напряжения, подводимого к двигателю





Для асинхронных двигателей с фазным ротором в опыте холостого хода определяют коэффициент трансформации напряжений между обмотками статора и ротора. Этот коэффициент с достаточной точностью может быть определен по отношению средних арифметических линейных (междуфазовых) напряжений статора к аналогичным напряжениям ротора.

$$\cos \varphi_K = P_K / (m_1 U_K I_K);$$

$$z_K = U_K / I_K;$$

$$r_K = z_K \cos \varphi_K;$$

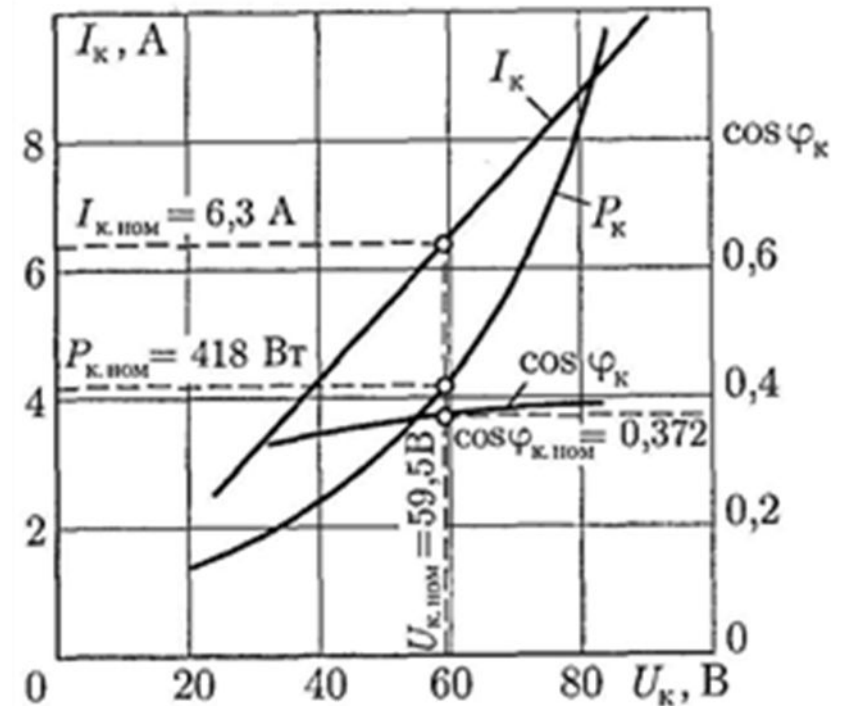
$$x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}.$$

Температуру  $\theta$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) обмотки обычно определяют по сопротивлению фазы  $r_1'$ , измеренному непосредственно после проведения опыта, по формуле

$$\theta_1 = [(r_1' - r_{1.20})(255 / r_{1.20})] + 20,$$

$$r_K = r_K' [1 + \alpha(\theta_2 - \theta_1)],$$

$$z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2}$$



где  $r_{1.20}$  — сопротивление фазы обмотки статора в холодном состоянии (обычно при температуре  $20^{\circ}\text{C}$ ), Ом.

где  $r_k'$  — активное сопротивление короткого замыкания при температуре  $\theta_1$ , отличающейся от расчетной рабочей;  $\alpha = 0,004$ .

## Как изменяются параметры трехфазного асинхронного двигателя при условиях, отличных от номинальных?

**Понижение напряжения** при номинальной частоте приводит к уменьшению тока холостого хода и магнитного потока, а значит, и к уменьшению потерь в стали. Величина тока статора, как правило, повышается, коэффициент мощности увеличивается, скольжение возрастает, а к. п. д. несколько падает. Вращающий момент двигателя уменьшается, так как он пропорционален квадрату напряжения.

**При повышении напряжения** сверх номинального и номинальной частоте двигатель перегревается из-за увеличения потерь в стали. Вращающий момент двигателя растет, величина скольжения уменьшается. Ток холостого хода увеличивается, а коэффициент мощности ухудшается. Ток статора при полной нагрузке может уменьшиться, а при малой нагрузке может увеличиться вследствие увеличения тока холостого хода.

**При уменьшении частоты и номинальном напряжении** увеличивается ток холостого хода, что приводит к ухудшению коэффициента мощности. Ток статора обычно возрастает. Увеличиваются потери в меди и стали статора, охлаждение двигателя несколько ухудшается вследствие уменьшения частоты вращения.

**При повышении частоты сети и номинальном напряжении** уменьшается ток холостого хода и вращающий момент.

## Пусковые свойства асинхронного двигателя оцениваются его пусковыми характеристиками:

- а) величиной пускового тока  $I_p$  или его кратностью  $I_p / I_{1н}$  ;
- б) величиной пускового момента  $M_p$  или его кратностью  $M_p / M_n$  ;
- в) продолжительностью и плавностью пуска двигателя в ход;
- г) экономичностью пусковой операции (стоимость и надежность пусковой аппаратуры).

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{U}_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}$$

$$M_n = \frac{m_1 \cdot U_1^2 \cdot r'_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left[ \left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]}$$

## Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Пусковые свойства АД определяются значениями

пускового тока  $I_{\text{п}}$  и пускового момента  $M_{\text{п}}$ :

В момент  
пуска  $S = 1$

$$I_{\text{п}} = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2')^2 + (x_1 + x_2')^2}}$$

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

Два пути улучшения пусковых свойств АД:

- 1) Уменьшение  $U_1 \Rightarrow$  снижение  $I_{\text{п}}$ , и  $M_{\text{п}}$
- 2) Увеличение  $r_2' \Rightarrow$  снижение  $I_{\text{п}}$  и увеличение  $M_{\text{п}}$

### Пуск асинхронных двигателей с к. з. ротором

а) пуск непосредственным включением в сеть:

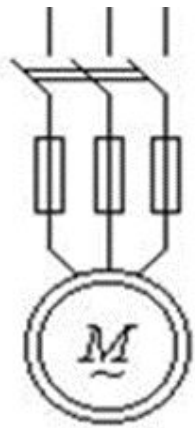
пусковой ток  $I_{\text{п}} = (5 \div 7) I_{\text{н}}$ , но значительный  $M_{\text{п}}$

Применяется в АД мощностью до (30÷50) кВт

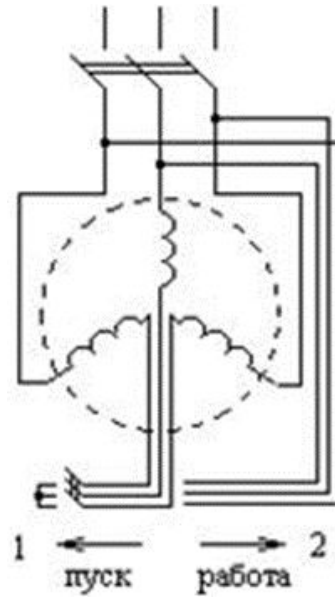
## Пуск двигателя с короткозамкнутым ротором

На практике широко используются следующие типы запуска двигателя:

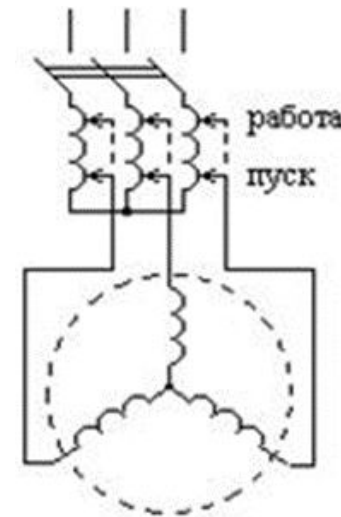
прямой пуск;



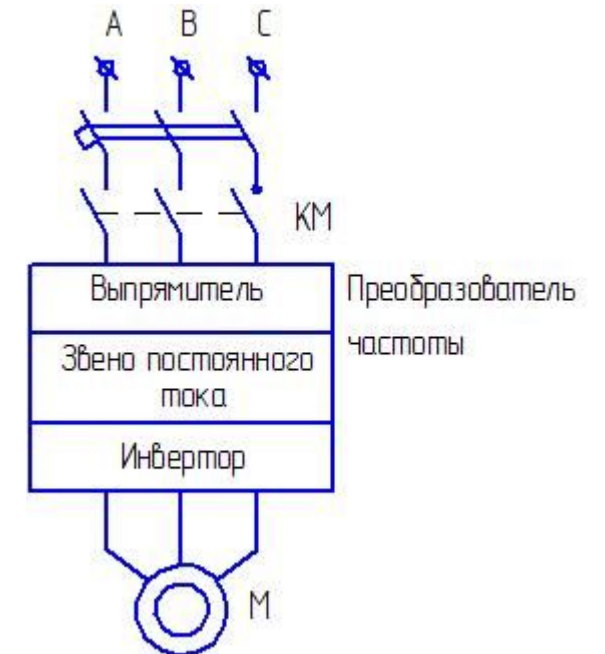
звезда-треугольник;



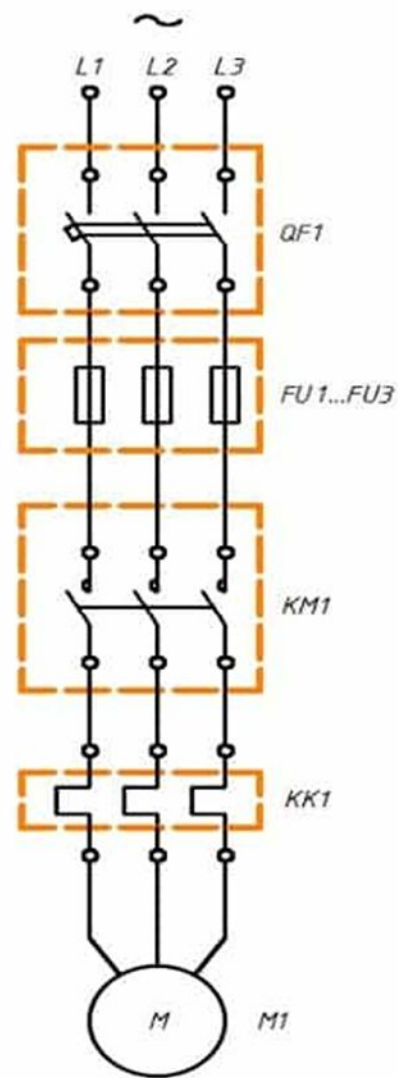
плавный пуск;



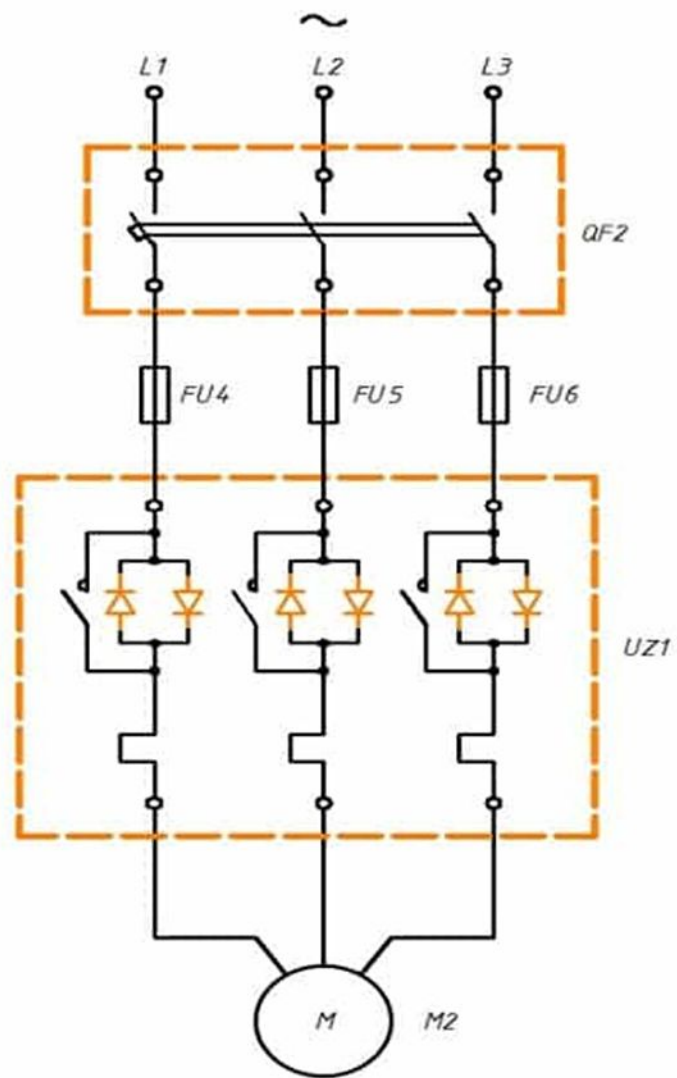
частотное регулирование;



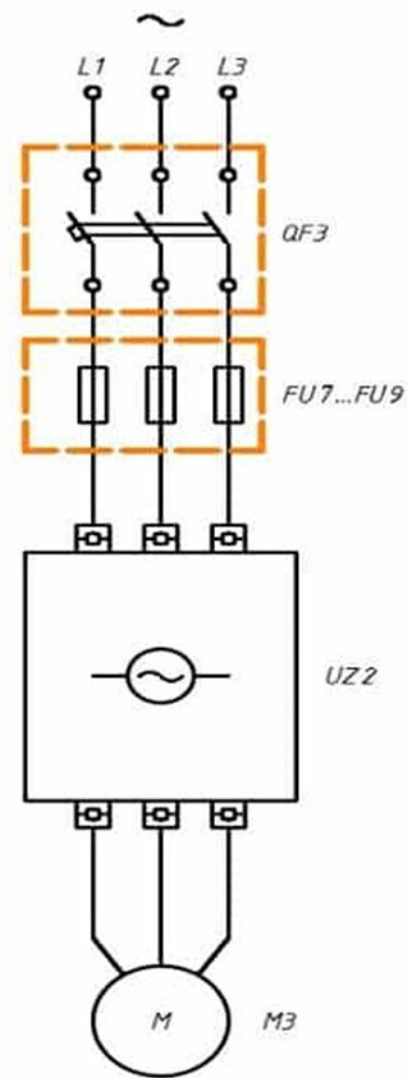




Прямой пуск

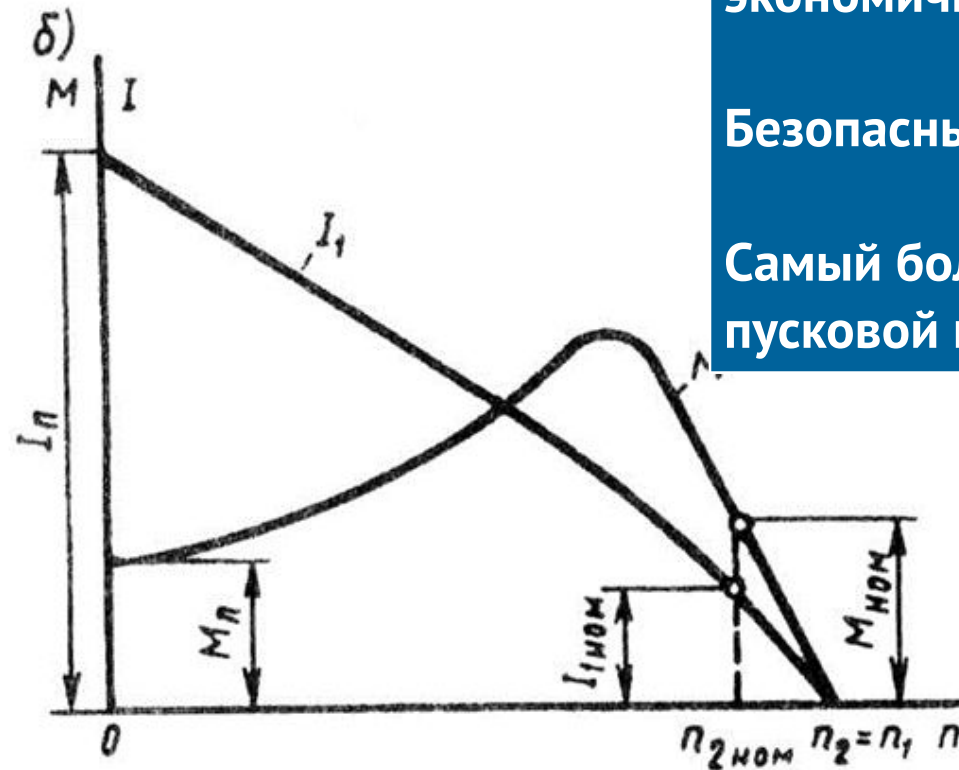
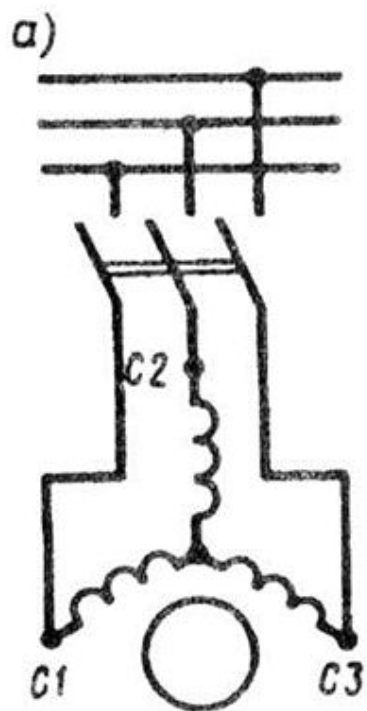


Плавного пуска



Через частотный преобразователь

## Пуск непосредственным включением в сеть



### Преимущества

Простой и экономичный.

Безопасный запуск

Самый большой пусковой момент

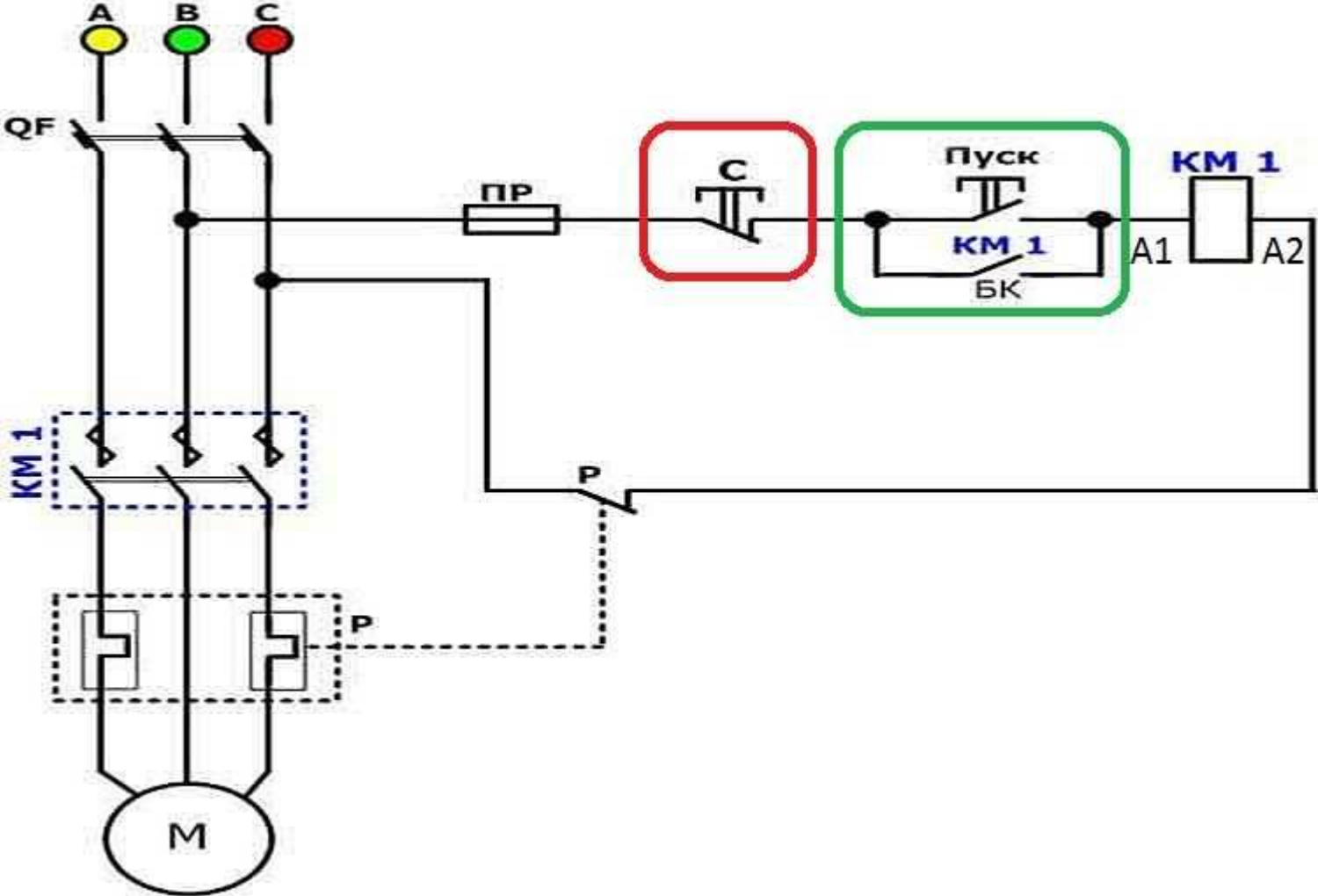
### Недостатки

Высокий пусковой ток

# Схема прямого включения асинхронного электродвигателя

Двигатели должны включаться в сеть при помощи магнитного пускателя, который обеспечивает надежное и одновременное включение всех трех фаз электродвигателя.

Пускатель в свою очередь управляется кнопочным постом – те самые кнопки «Пуск» и «Стоп» в одном корпусе.





Автоматический выключатель, номинальный ток которого соответствует, либо немного выше номинального тока электродвигателя.



Следующим коммутационным аппаратом является уже упоминавшийся нами пускатель. В зависимости от номинального тока пускатели разделяются на изделия 1, 2 и т. д. до 8-ой величины. Для нас важно, чтобы номинальный ток пускателя был не меньше, чем номинальный ток электродвигателя.



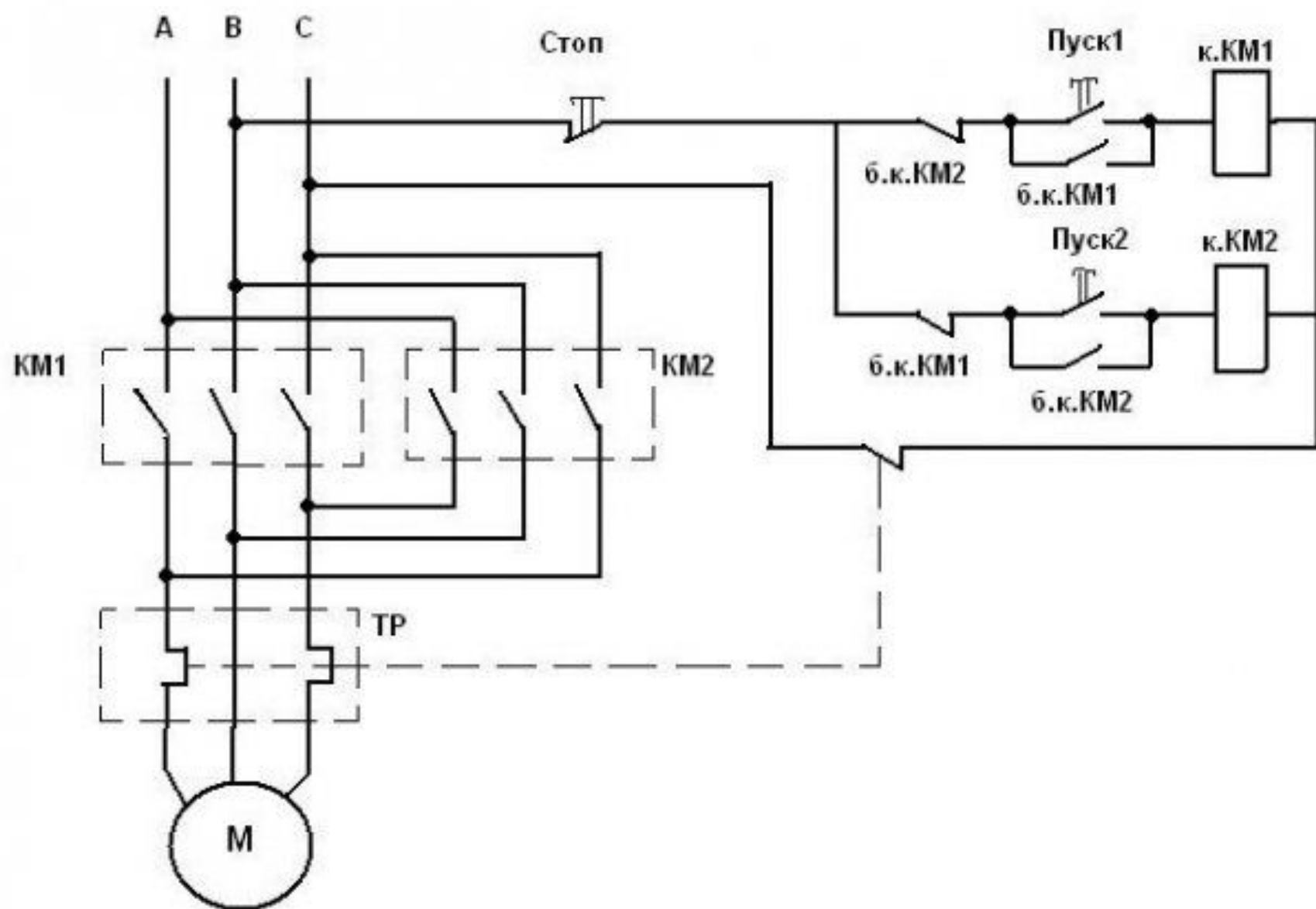
Пускатель управляется при помощи кнопочного поста. Он может быть двух видов. С кнопками «Пуск» и «Стоп» и с кнопками «Вперед», «Стоп» и «Назад». Если у нас не используется реверс, то нам необходим кнопочный пост на две кнопки и наоборот.

Таблица выбора сечений кабеля и провода для скрытой электропроводки.

Сечение жилы кабеля, мм <sup>2</sup>	Диаметр жилы кабеля, мм	Проводка с медной жилой			Проводка с алюминиевой жилой		
		Ток, А	Мощность, кВт при напряжении сети 220 В	Мощность, кВт при напряжении сети 380 В	Ток, А	Мощность, кВт при напряжении сети 220 В	Мощность, кВт при напряжении сети 380 В
1	1,12	14	3,0	5,3	-	-	-
1,5	1,38	15	3,3	5,7	-	-	-
2,0	1,59	19	4,1	7,2	14	3,0	5,3
2,5	1,78	21	4,6	7,9	16	3,5	6,0
4,0	2,26	27	5,9	10,0	21	4,6	7,9
6,0	2,76	34	7,7	12,0	26	5,7	9,8
10,0	3,57	50	11,0	19,0	38	8,3	14,0
16,0	4,51	80	17,0	30,0	55	12,0	20,0
25,0	5,64	100	22,0	38,0	65	14,0	24,0
35,0	6,68	135	29,0	51,0	75	16,0	28,0

Кроме указанных аппаратов нам потребуется кабель соответствующего сечения. Так же желательно, но не обязательно, установка амперметра хотя бы на одну фазу, для контроля тока двигателя.

### Реверсивная схема подключения электродвигателя



# Подключение электродвигателя звездой и треугольником

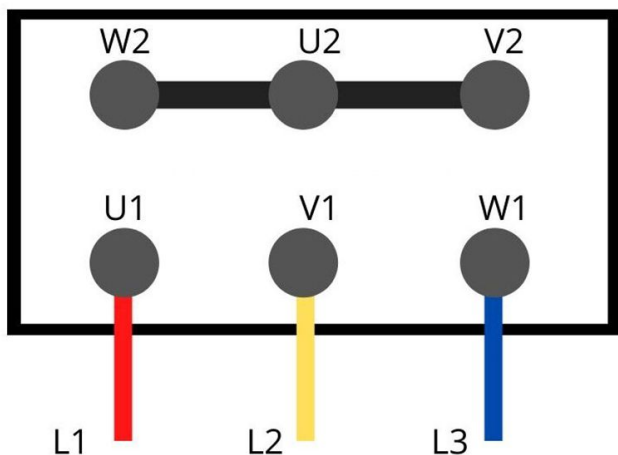
В зависимости от напряжения питания, трехфазный асинхронный электродвигатель может быть подключен по двум стандартным схемам – звезда и треугольник.

Схема соединения обмоток и номинальное напряжение всегда указывается на шильде двигателя.

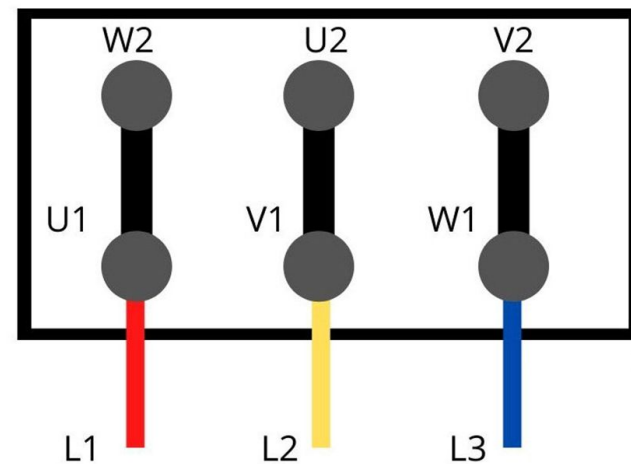
Например, если указано напряжение 220/380 В и схема подключения  $\Delta/Y$ , это говорит о том, что на 220 В двигатель подключается треугольником, а на 380 В – звездой.

Статор электродвигателя имеет три независимых обмотки, начало, и конец которых выведены в клеммную коробку. Стандартное обозначение первой обмотки - U1 и U2, второй - V1 и V2 и третьей - W1 и W2.

В некоторых случаях клеммная коробка (борно) выполнена только с тремя выводами обмотки



В некоторых случаях клеммная коробка (борно) выполнена только с тремя выводами обмотки



В некоторых случаях клеммная коробка (борно) выполнена только с тремя выводами обмотки

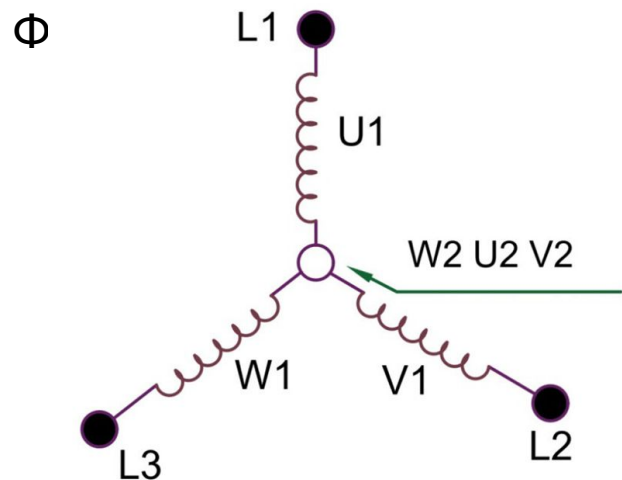
## Отличия между соединениями типа "звезда" и "треугольник".

При подключении двигателя звездой пусковой ток будет меньше чем при подключении треугольником, но при этом и мощность двигателя будет меньше, чем заявленная паспортная.

Линейный ток будет равен фазному току  $I_l = I_\phi$ , а линейное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз будет превышать фазное напряжение  $U_l = 1,73 \cdot U_\phi$ .

В схеме треугольник все происходит наоборот - двигатель работает на полную паспортную мощность, но при этом для данного типа подключения характерны высокие пусковые токи.

Линейный ток в  $\sqrt{3}$  раза превышает фазный ток  $I_l = 1,73 \cdot I_\phi$ , а линейное напряжение будет равно фазному  $U_l = U_\phi$ .

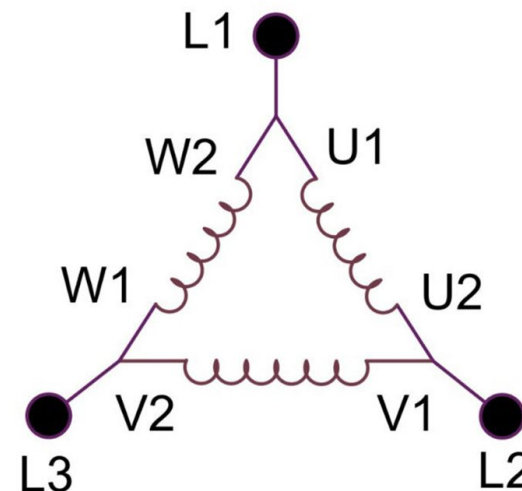


ости для обоих типов подключений будет одинаковая:

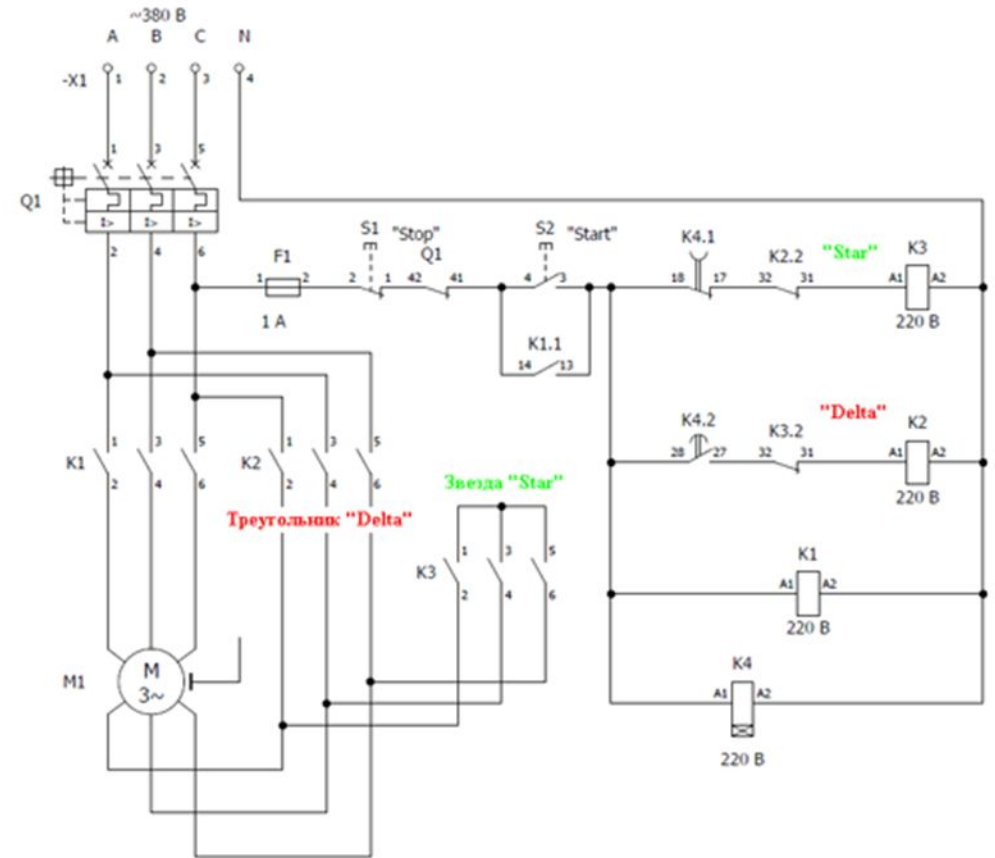
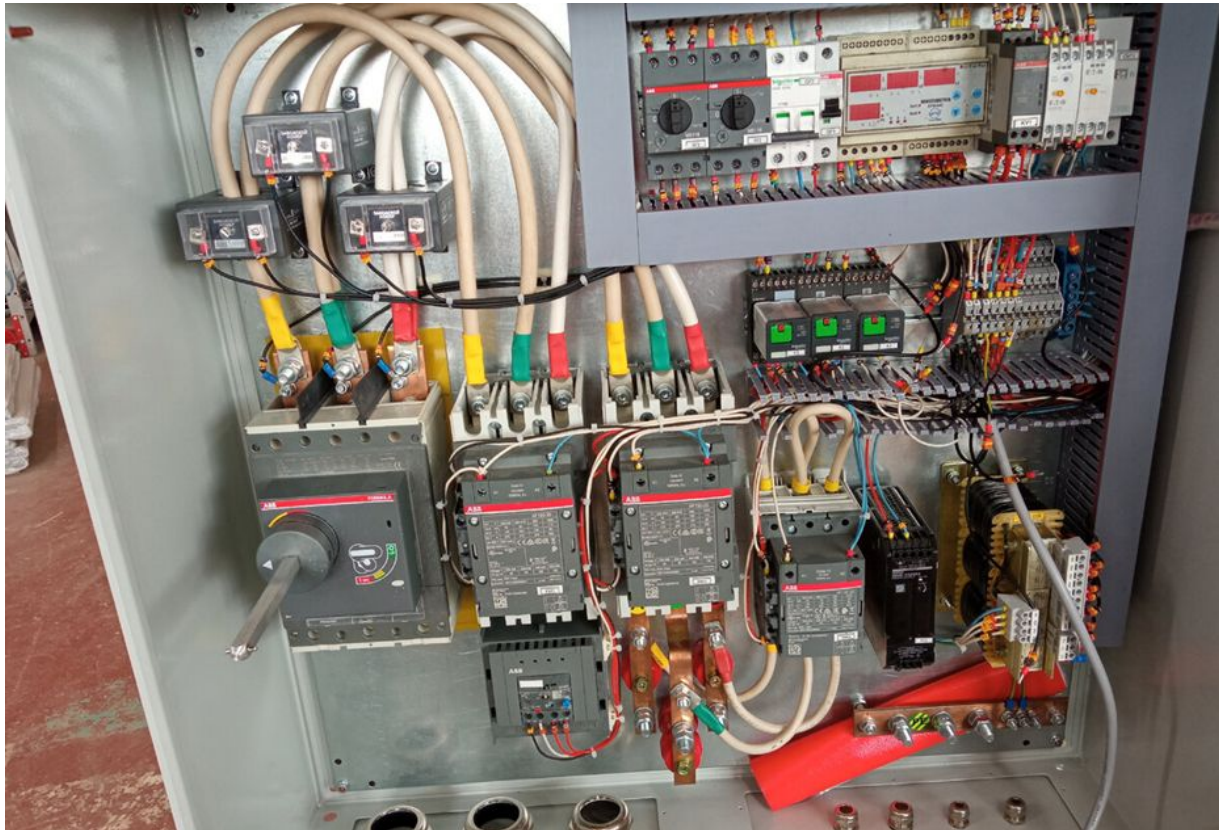
$$\text{Полная мощность (S)} = 3 \cdot S_\phi = 3 \cdot (U_l / \sqrt{3}) \cdot I = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I$$

$$\text{Активная мощность (P)} = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I \cdot \cos \phi$$

$$\text{Реактивная (Q)} = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I \cdot \sin \phi$$



## Пример шкафа управления электродвигателем по схеме звезда-треугольник



Также необходимо учитывать, что схема применима только для двигателей с легким режимом пуска, например, центробежные насосы, вентиляторы, станки, так как в начальный момент запуска звездой до момента переключения на треугольник крутящий момент сопротивления рабочей машины, независимо от скорости вращения, должен оставаться меньшим, чем крутящий момент электродвигателя, собранного в звезду.

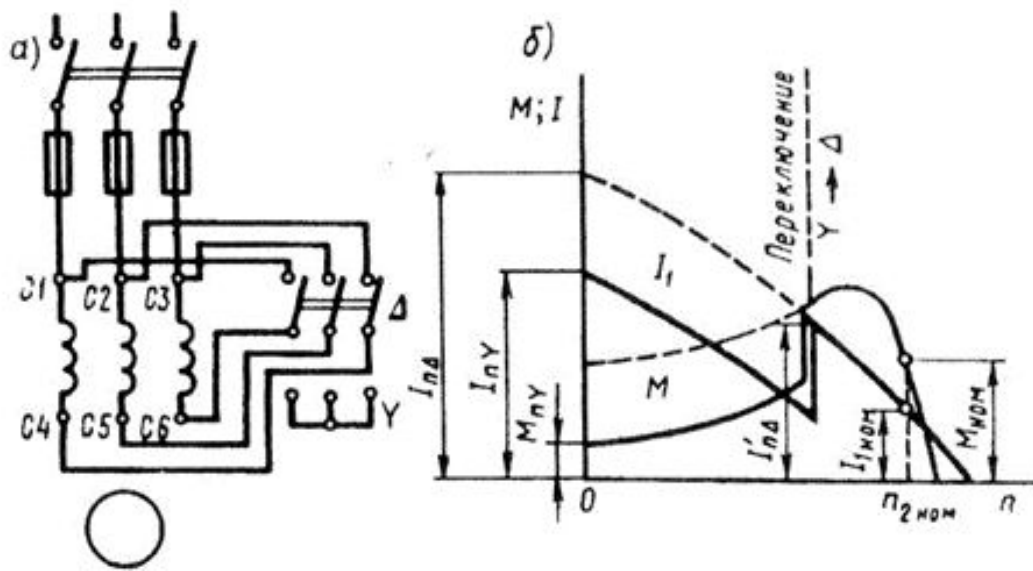


## Пуск при пониженном напряжении.

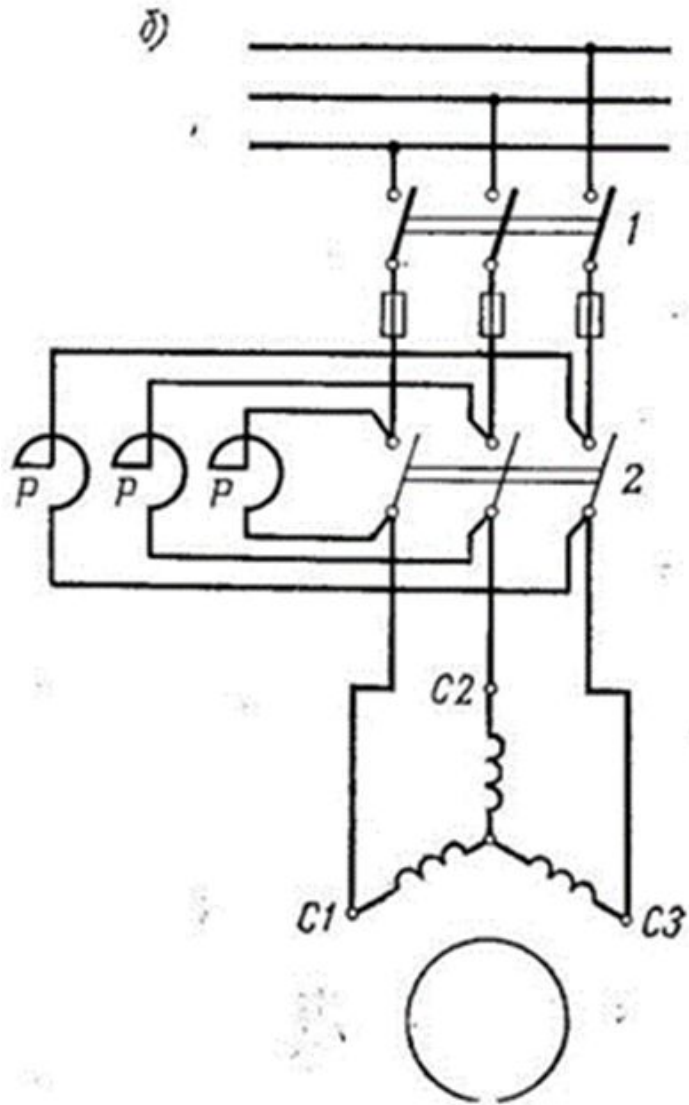
Для того, чтобы уменьшить пусковой ток, характерный при подключении двигателя треугольником, но сохранить при этом полную мощность, на практике довольно часто применяется схема переключения со звезды на треугольник.

При таком способе подключения, начальный запуск двигателя происходит по схеме звезда, а после того, как двигатель разгоняется и набирает обороты, происходит переключение на треугольник.

Такая схема подходит только для электродвигателей, у которых обмотки рассчитаны на напряжение сети 380/660В; 220/380В



Преимущества	Недостатки
Уменьшение пускового тока в три	Скачки тока при переключении «звезда – треугольник».
	Не подходит, если нагрузка без инерционная.
	Пониженный пусковой



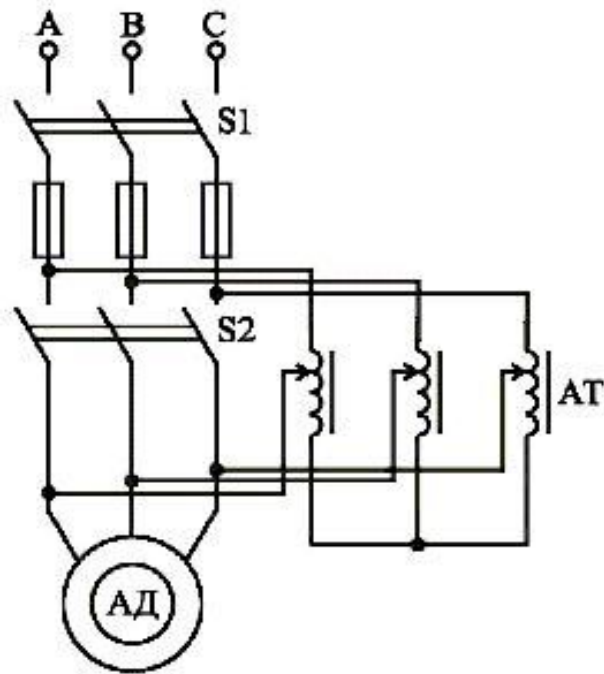
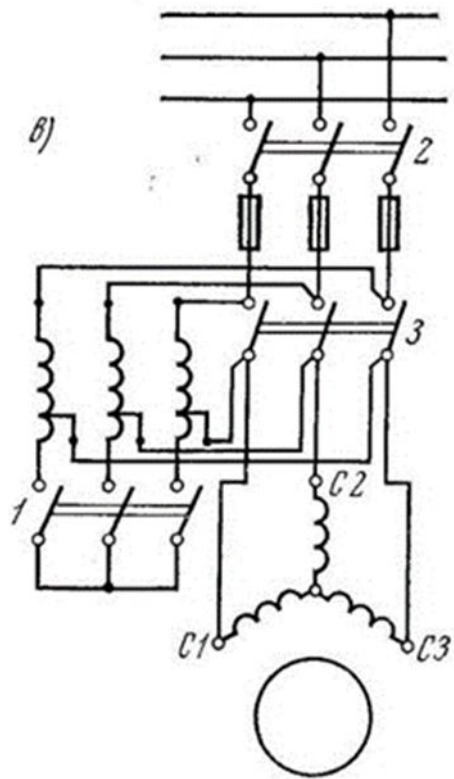
### Преимущества

Отсутствуют скачки тока.

Уменьшение пускового тока на требуемую величину, обычно в 2-3 раза.

### Недостатки

Пониженный пусковой момент.



### Преимущества

Уменьшение  
пускового тока на  $U^2$ .

### Недостатки

Скачки тока при переходе от пониженного напряжения к номинальному напряжению.

Пониженный пусковой момент.

## Запуск при помощи частотного преобразователя

Частотный преобразователь для электродвигателя уменьшает величину пусковых токов в 4-5 раз и не только осуществляет плавный запуск, но и управляет ротором путем регулировки напряжения и частоты.

Использование прибора имеет и другие достоинства:

- позволяет сэкономить до 50% электроэнергии при запуске;
- с его помощью обеспечивается обратная связь смежных приводов.

Фактически это не преобразователь, а генератор трёхфазного напряжения необходимой величины и частоты.

### Принцип работы

Основу преобразователя частоты составляет инвертор с двойным преобразованием. Принцип его работы заключается в следующем:

- сначала входной переменный ток синусоидального типа с напряжением 380 или 220 вольт проходит через диодный мост и выпрямляется;
- затем подается на группу конденсаторов для сглаживания и фильтрации;
- далее ток передается на управляющие микросхемы и мостовые ключи из IGBT (Биполярный транзистор с изолированным затвором, БТИЗ) транзисторов, формирующие из него трёхфазную широтно-импульсную последовательность с заданными параметрами;
- на выходе сформированные импульсы прямоугольной формы под влиянием индуктивности обмоток преобразуются в синусоидальное напряжение.

## Непосредственные преобразователи частоты

Такие частотники построены на базе быстродействующих тиристорных преобразователей, включенных по мостовым, перекрестным, нулевым и встречно-параллельным схемам. Устройства такого типа включаются непосредственно в питающую сеть.

### **Плюсы непосредственных преобразователей частоты:**

- Возможностью рекуперации электроэнергии в сеть при работе в режиме торможения двигателя. Непосредственное включение обеспечивает двусторонний обмен электричеством.
- Высоким к.п.д. за счет однократного преобразования частоты.
- Возможностью наращивания мощности за счет присоединения дополнительных преобразователей.
- Широким диапазоном низких частот. Непосредственные преобразователи обеспечивают стабильную работу привода на малых скоростях.

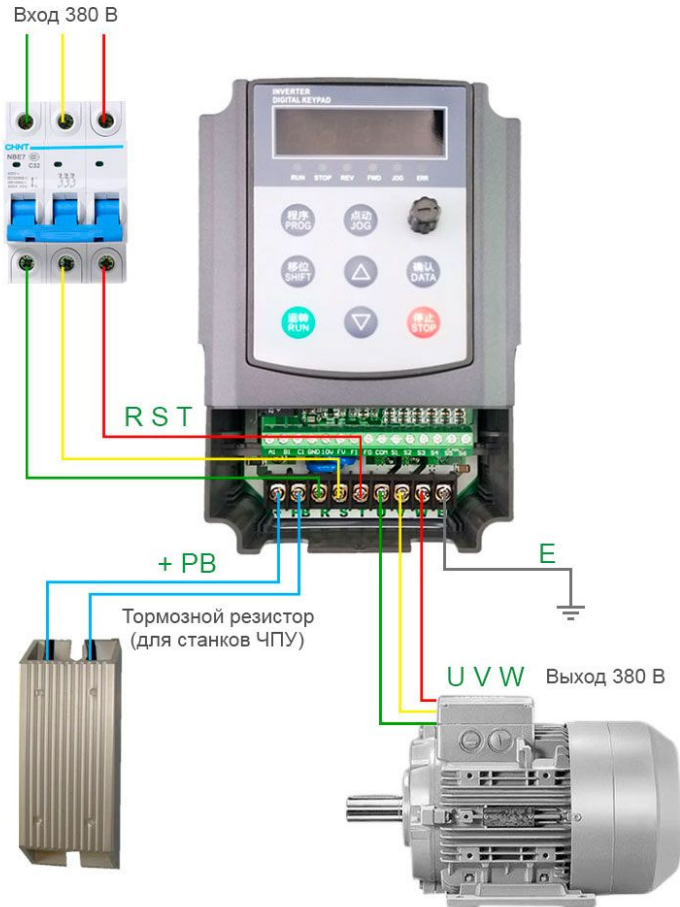
### **Минусы непосредственных преобразователей частоты:**

- Аппроксимированная форма выходного напряжения с наличием постоянных составляющих и субгармоник. Такая форма переменного напряжения на выходе устройства вызывает дополнительный нагрев двигателя, снижает момент, создает помехи.
- Частота напряжения на выходе преобразователя не превышает аналогичную характеристику сетевого напряжения. Таким образом, при помощи этих устройств можно только снижать скорость вращения двигателей.
- Основная сфера непосредственных преобразователей – электроприводы на базе асинхронных и синхронных двигателей большой и средней мощности.

## Преимущества частотных преобразователей.

- 1) Экономия электроэнергии.
- 2) Увеличение срока службы промышленного оборудования.
- 3) Отсутствие необходимости проводить техническое обслуживание.
- 4) Возможность удаленного управления и контроля параметров оборудования с электроприводом.
- 5) Широкий диапазон мощности двигателей.
- 6) Защита электродвигателя от аварий и аномальных режимов работы.
- 7) Снижение уровня шума работающего двигателя.





## Преимущества

Отсутствуют скачки тока.

Уменьшение пускового тока, обычно, до номинального.

Напряжение питания на двигатель можно подавать постоянно.

## Недостатки

Пониженный пусковой момент.

Высокая стоимость.

## Устройство плавного пуска

Благодаря этим устройствам, удастся избежать проблем, связанных с запуском, обеспечивается плавный пуск двигателей с ограничением пускового тока и углового ускорения, регулировка времени разгона и торможения двигателя. Все это способствует увеличению срока службы оборудования и стабилизации напряжения в сетях.

Кроме того, в софт-стартеры встроены целый ряд различных функций защит —

- Защита от обрыва входной фазы и выходной фазы
- Защита от перекоса фаз
- Защита от перегрузки двигателя
- Защита от пониженного и повышенного напряжения
- Защита от короткого замыкания нагрузки

Несмотря на то, что устройства плавного пуска выпускаются большим количеством различных фирм — производителей и у каждого есть свои особенности, общий принцип работы устройства одинаков для всех. И заключается он в регулировании действующего значения выходного напряжения.

В момент запуска электродвигателя софт стартер ограничивает питающее напряжение (30 — 60 % от номинального напряжения), затем постепенно наращивая его до номинала. При этом снижается пусковой ток и скорость его нарастания, увеличивается время пуска двигателя. Такой тип запуска позволяет также уменьшить и пусковой момент на валу.





## Выбор устройства плавного пуска

При выборе УПП определяющим является номинальный ток двигателя и условия запуска.

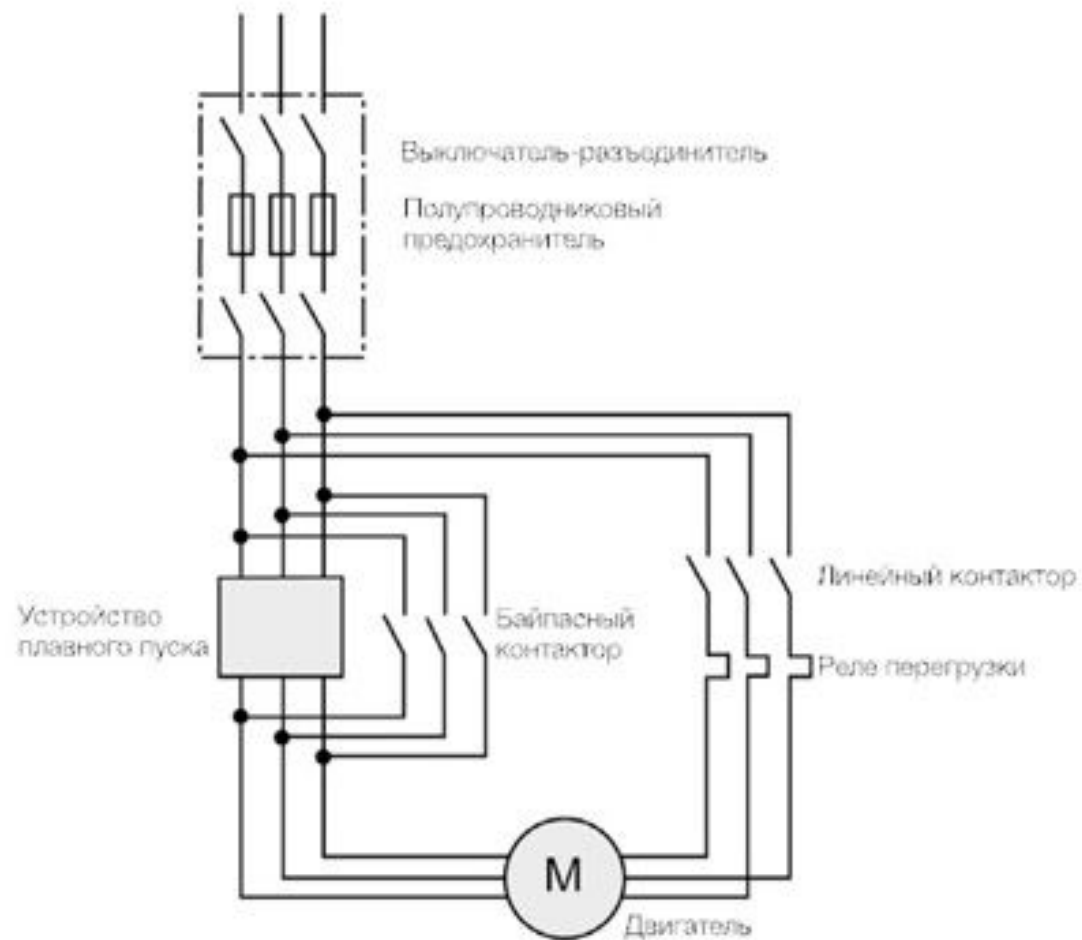
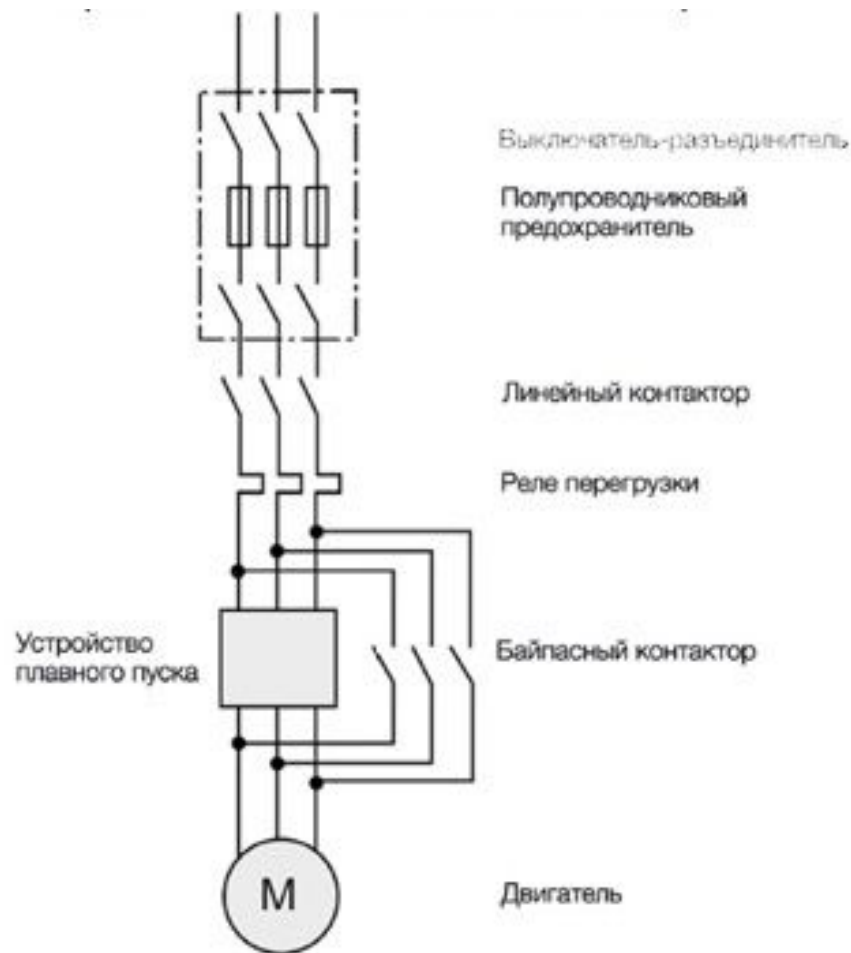
- При легком и нормальном пуске, например, при работе с центробежными насосами, компрессорами, мощность УПП выбирается такой же, как и мощность подключаемого двигателя, можно с небольшим запасом.
- При тяжелом пуске под нагрузкой, или повышенной частоте запусков, желательно выбирать более мощный УПП, на один типоразмер больше. Также это относится к работе устройств в условиях тяжелой эксплуатации, в частности повышенной температуры окружающей среды.

Повышенной частотой запусков считается более 10 запусков в час.

На этот показатель влияют несколько факторов, таких как ток нагрузки, температура, время пуска и коэффициент продолжительности включения, который определяет, как долго УПП работает, по сравнению с общим временем цикла.

## Подключение устройства плавного пуска

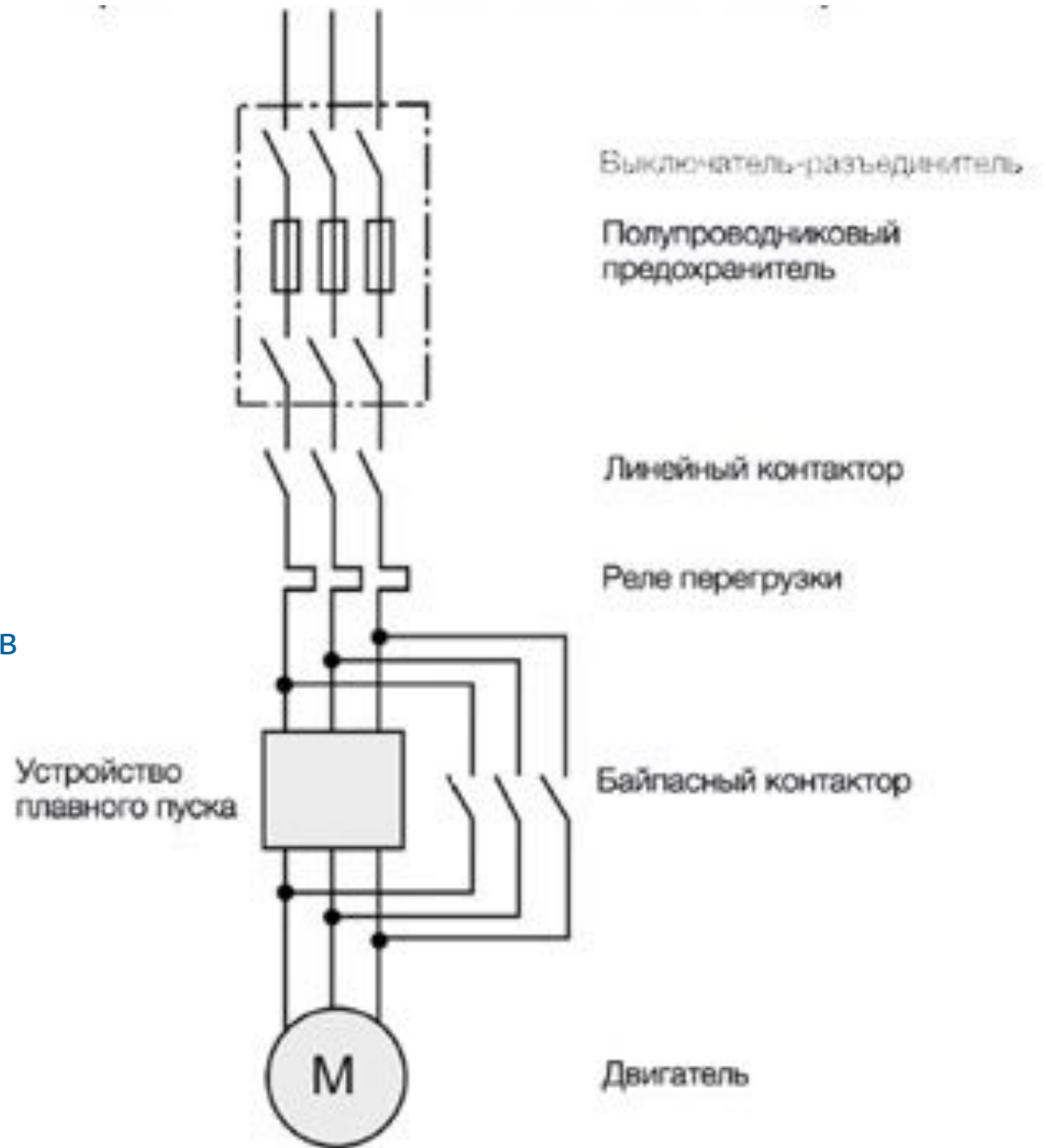
Существуют две схемы подключения устройств. В первую очередь это линейное подключение, которое можно сказать, является стандартным и подключение внутри треугольника. Сразу надо уточнить, что по второй схеме можно подключать не все устройства плавного пуска.

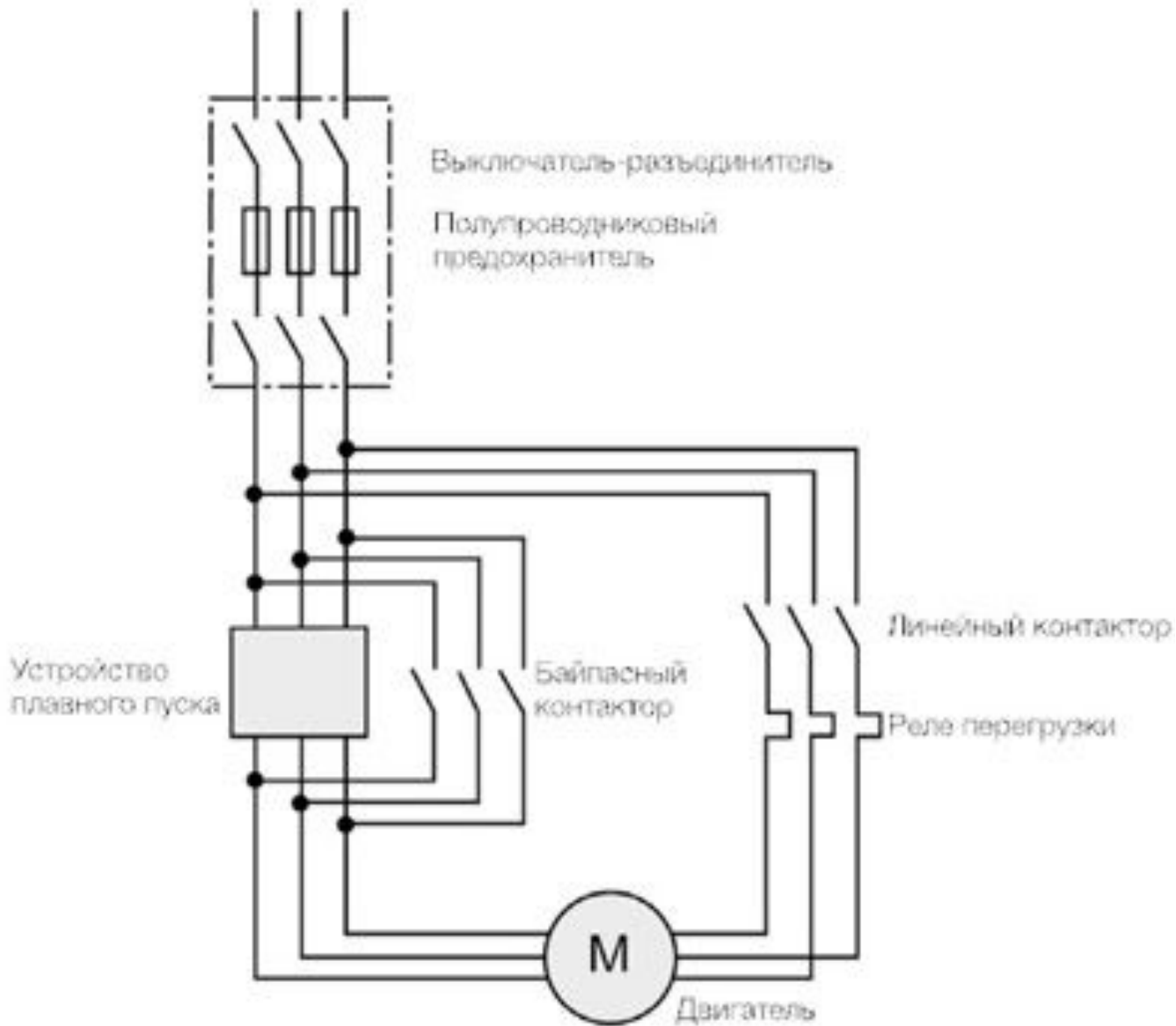


- Линейный способ подключения наиболее распространенный, все устройства в цепи (коммутационные аппараты защиты, разъединения) в данном случае подключаются просто последовательно с УПП. Двигатель может быть подключен по схеме «звезда» или «треугольник».

Байпас – это шунтирующий, обходной путь, создаваемый в обход некоторых участков или элементов электрической цепи.

Байпасный контактор применяется для подключения двигателя напрямую к питающей сети, по окончании процесса запуска, после того, как УПП разгонит двигатель на номинальные обороты и необходимость в нем отпадает. При торможении, контактор отключится и двигатель снова подключается к устройству плавного пуска.





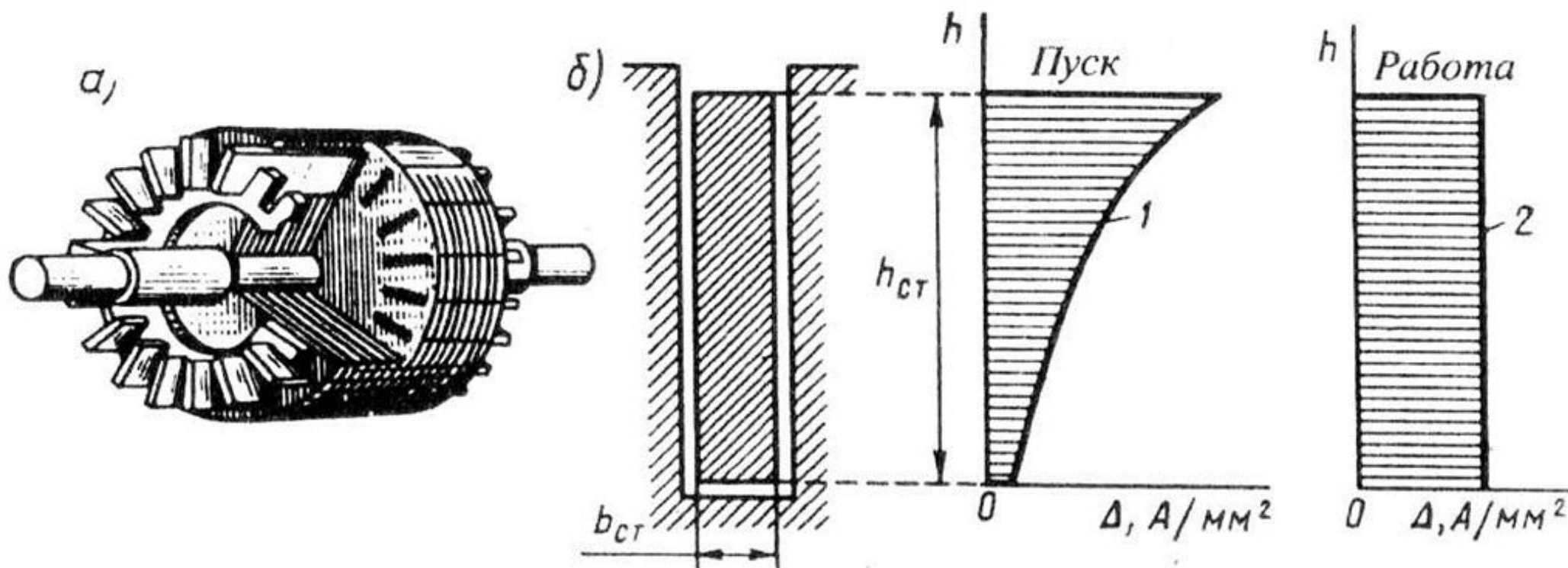
- В схеме подключения внутри треугольника фазы устройства плавного пуска соединяются последовательно с отдельными обмотками двигателя. Когда УПП находится внутри треугольника, через него проходит только 58 % от номинального тока. Поэтому в данном случае, для экономии, можно уменьшить типоразмер устройства. Но при этом придется использовать для соединения УПП и двигателя 6 проводников, в отличие от линейной схемы, где необходимо 3 провода.

Важно учитывать, что при подключении внутри треугольника нельзя использовать устройства плавного пуска, которые регулируют напряжение только в двух фазах из трех.

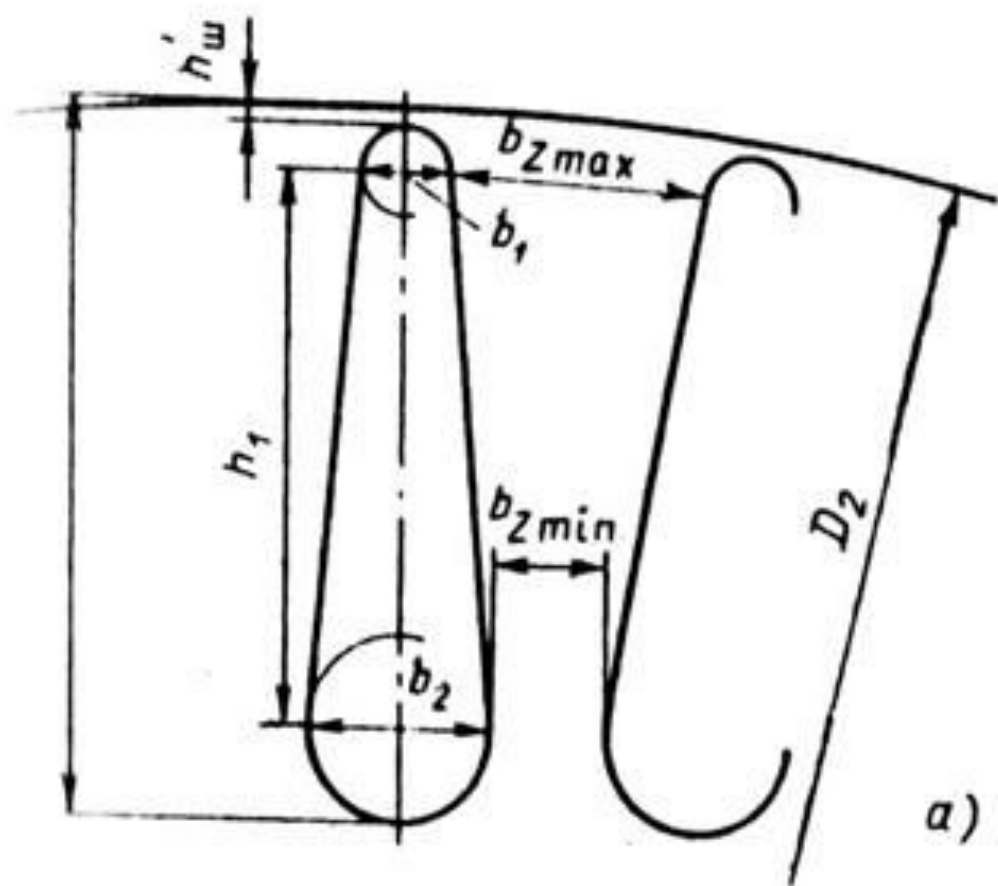
В остальном подключение софт стартера не сильно отличается от подключения того же частотного преобразователя.

# Короткозамкнутые асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками

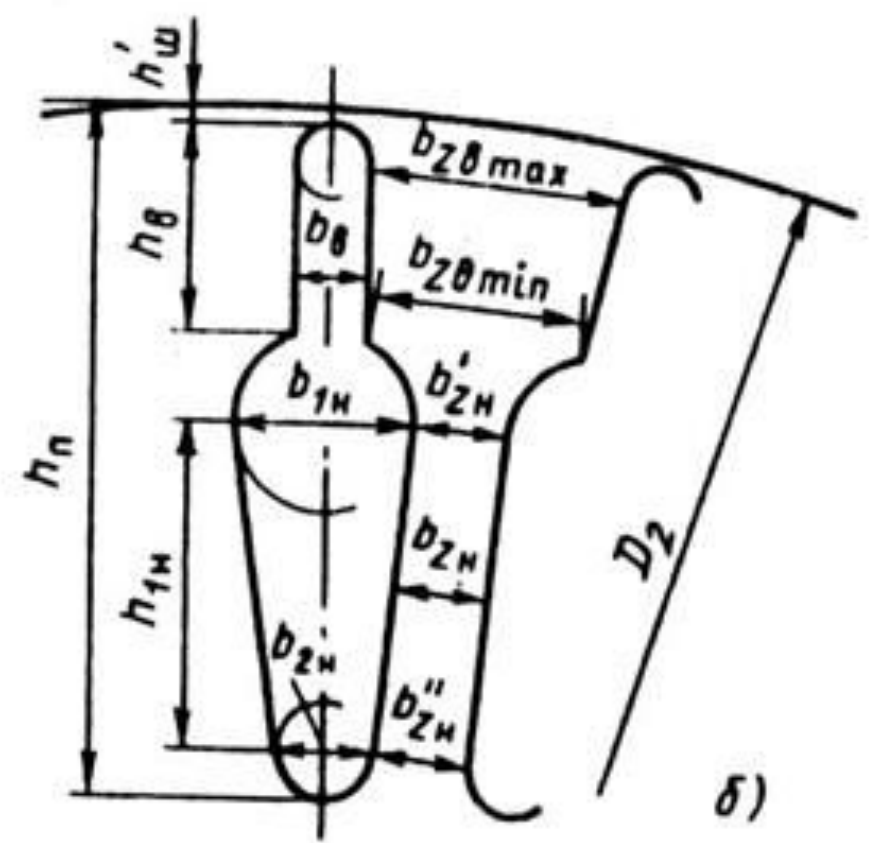
## Двигатель с глубокими пазами на роторе



а – устройство, б – распределение плотности тока ротора по высоте стержня при пуске и при работе двигателя

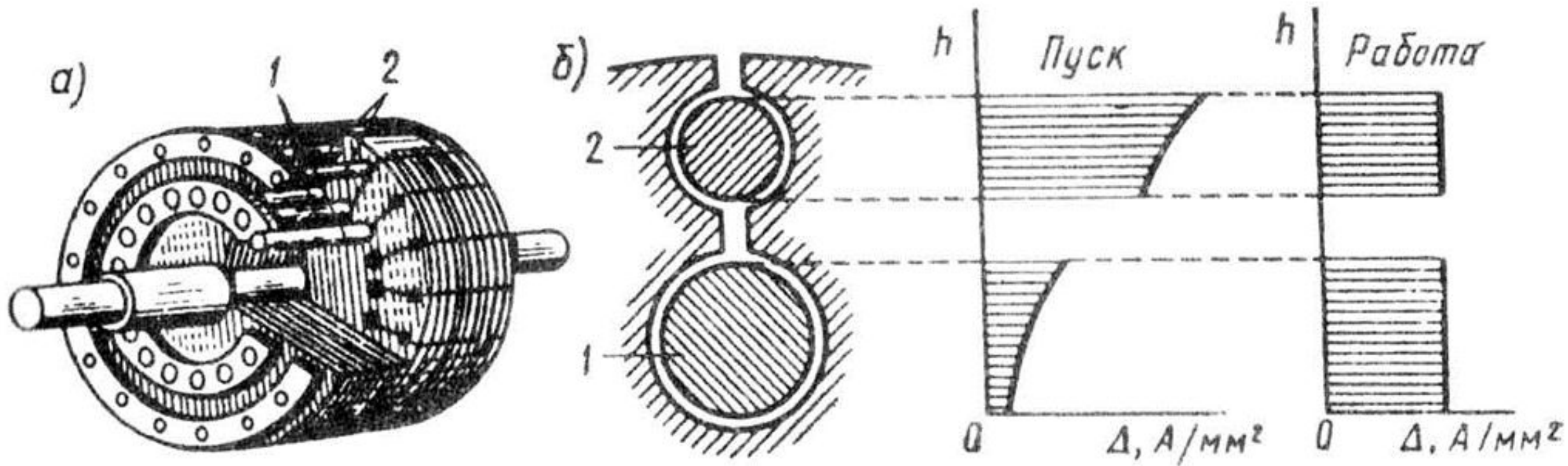


a)

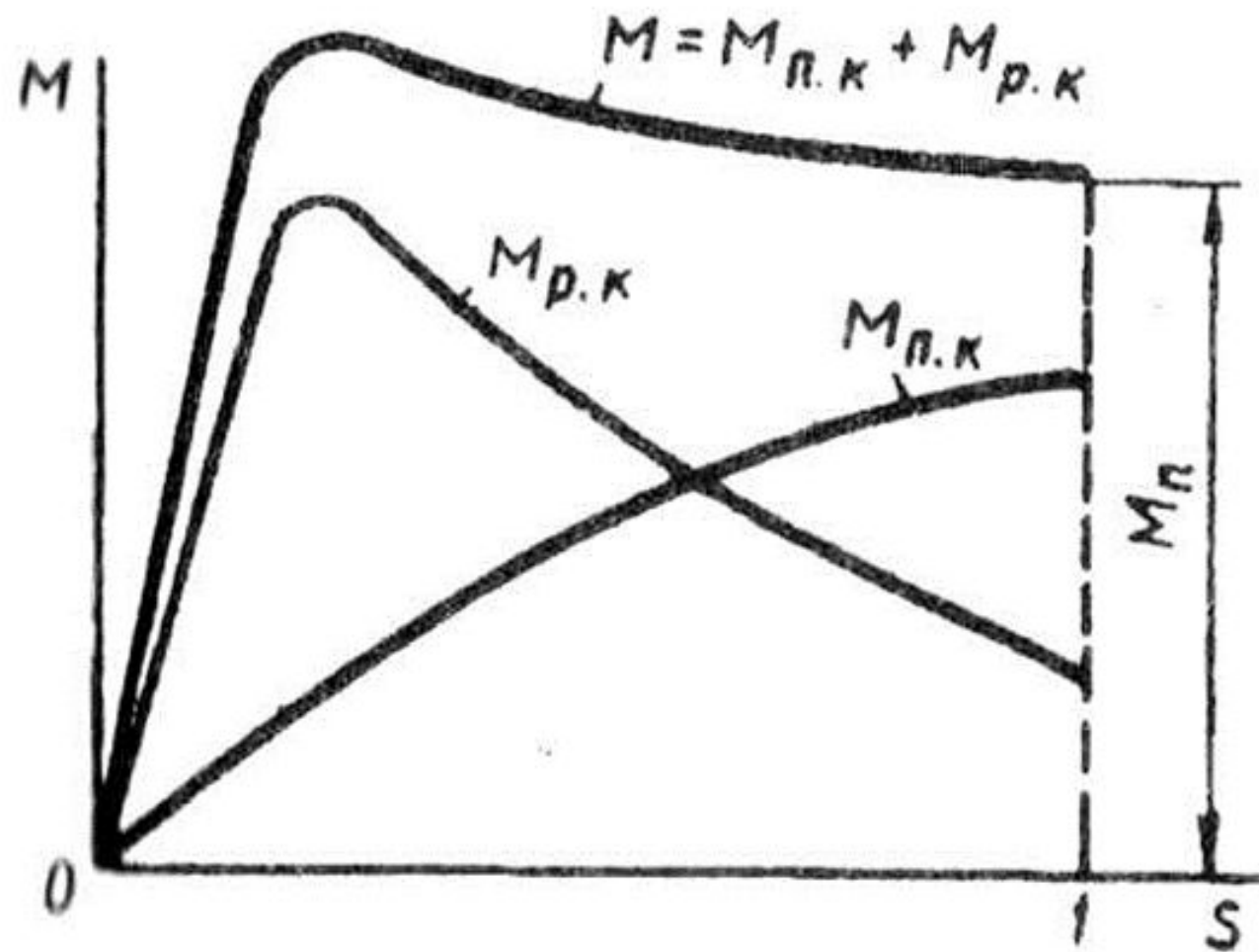


b)

## Двухклеточный ротор:

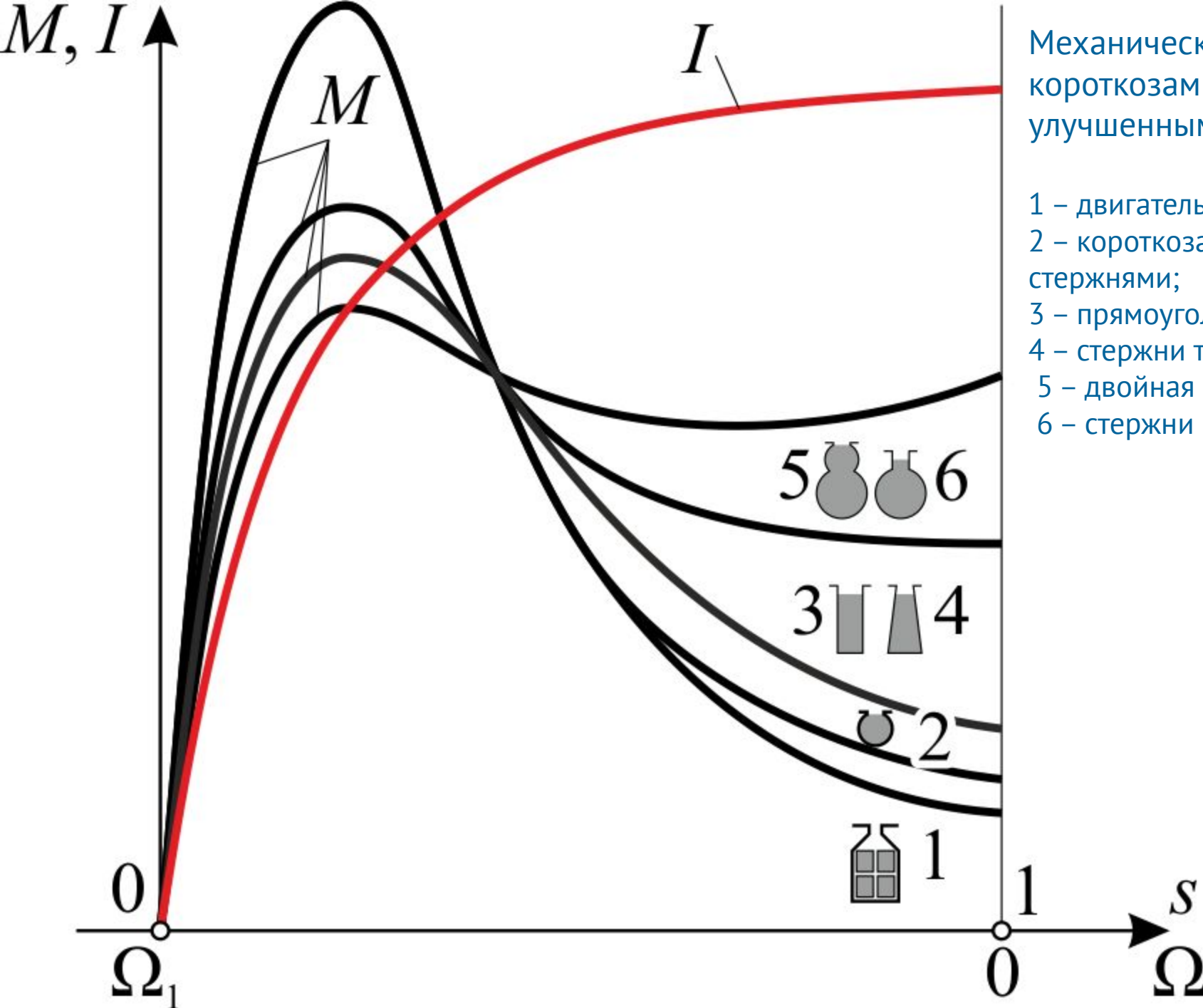


а – устройство; б – распределение плотности тока в рабочей и пусковой клетках при пуске и работе двигателя



Механическая характеристика двухклеточного асинхронного двигателя





Механические характеристики короткозамкнутых асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми свойствами:

- 1 – двигатель с фазным ротором;
- 2 – короткозамкнутая обмотка с круглыми стержнями;
- 3 – прямоугольные стержни в глубоких пазах;
- 4 – стержни трапецеидального профиля;
- 5 – двойная беличья клетка;
- 6 – стержни колбообразного профиля.

Увеличение пускового момента в короткозамкнутых двигателях с улучшенными пусковыми свойствами сопровождается снижением максимального момента на 15–25 % и коэффициента мощности на 4–6 % по сравнению с двигателями с круглыми пазами на роторе по причине связи с возрастания индуктивного сопротивления рассеяния обмотки ротора.

## Пуск двигателей с фазным ротором

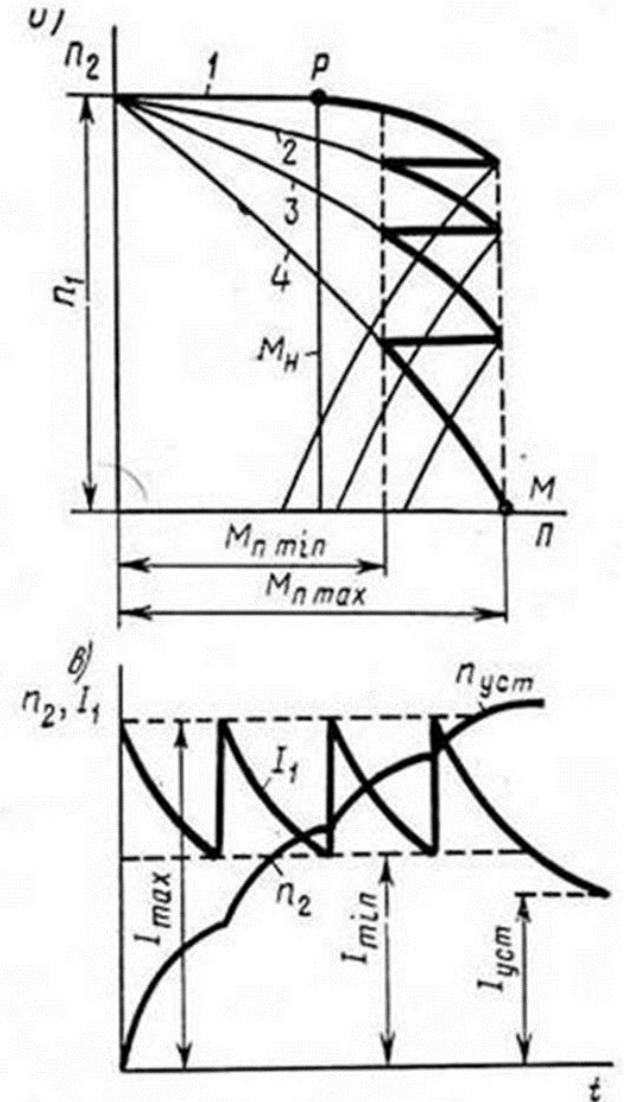
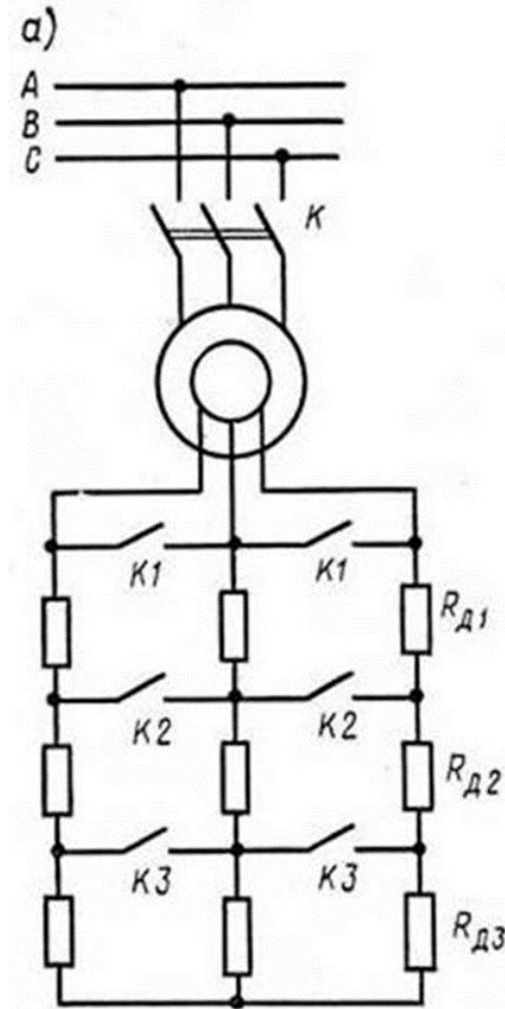
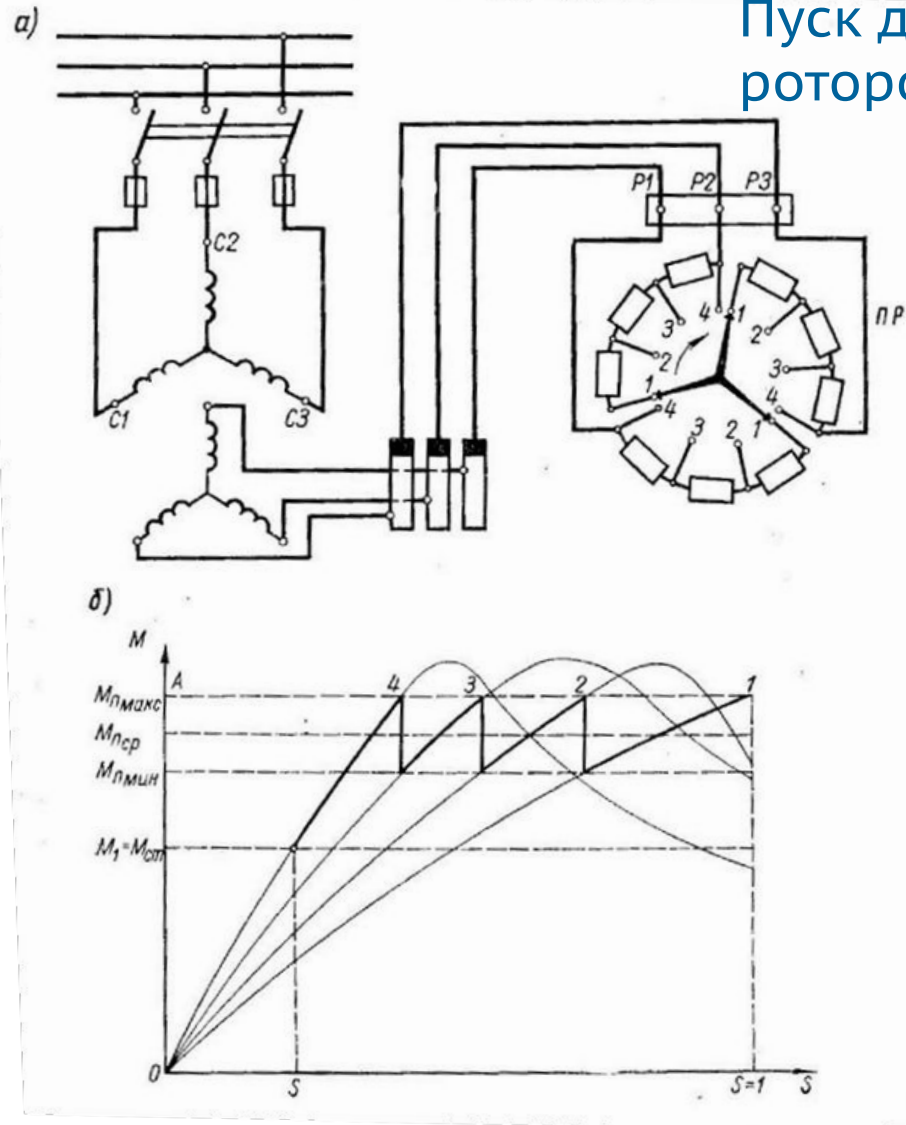


Схема включения пускового реостата (а) и построение графика пускового момента (б)

## Классификация способов регулирования асинхронных двигателей



## Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

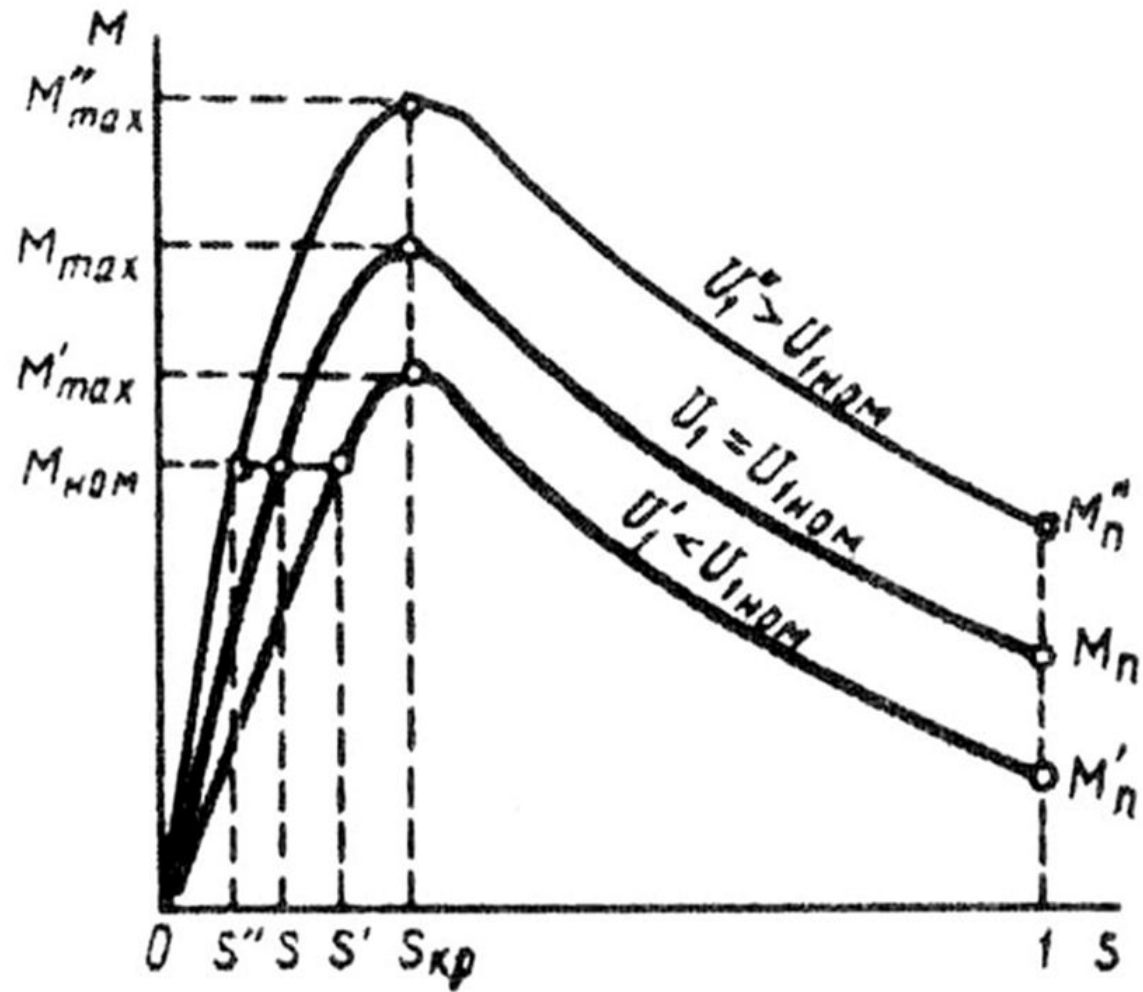
$$n_2 = n_1(1 - s) = (f_1 60 / p)(1 - s).$$

Регулирование частоты вращения изменением скольжения  $s$  возможно тремя способами:

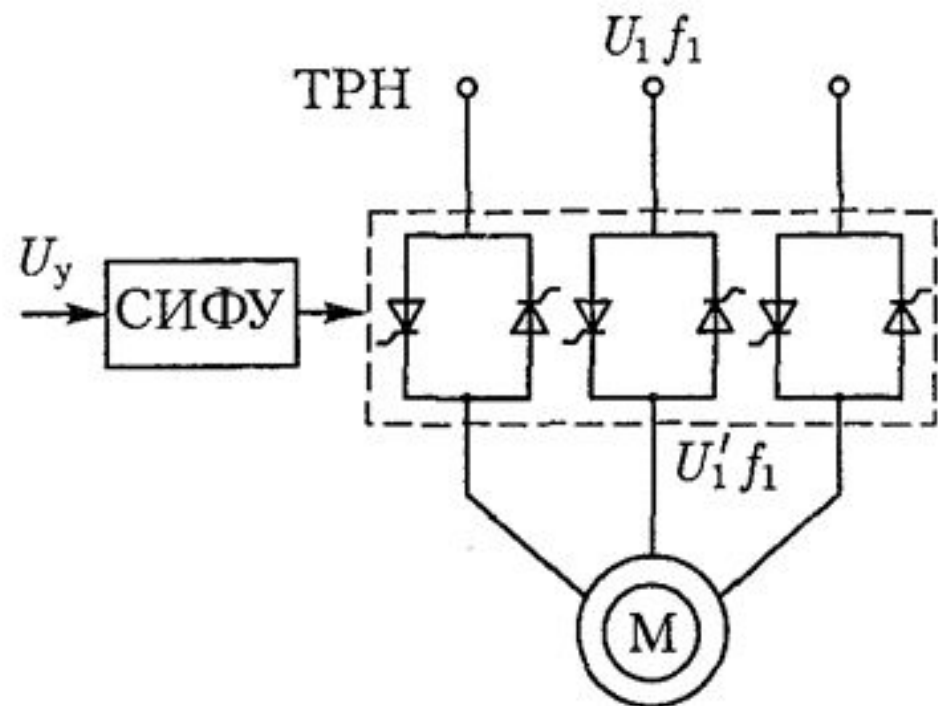
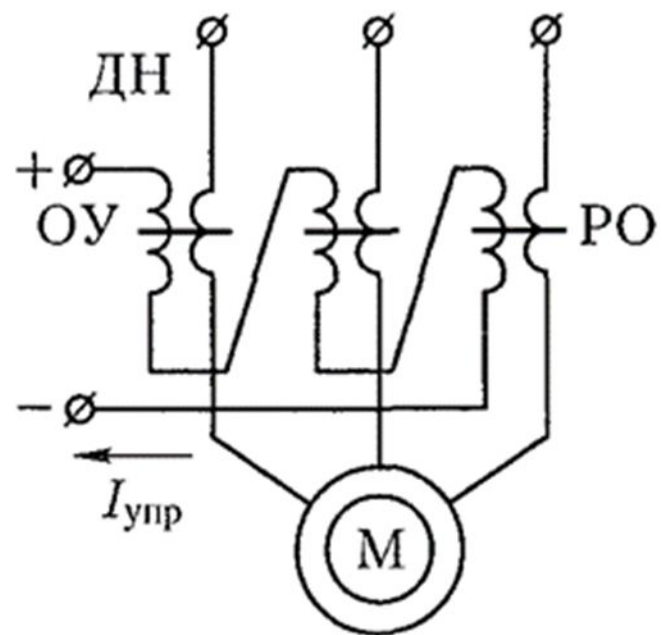
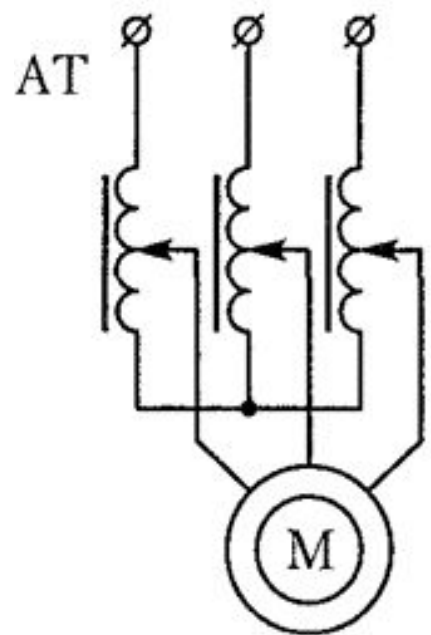
- изменением подводимого к обмотке статора напряжения,
- нарушением симметрии этого напряжения
- изменением активного сопротивления обмотки ротора.

Регулировка частоты вращения изменением скольжения происходит только в нагруженном двигателе. В режиме холостого хода скольжение, а, следовательно, и частота вращения остаются практически неизменными, мало отличающимися от синхронной частоты вращения.

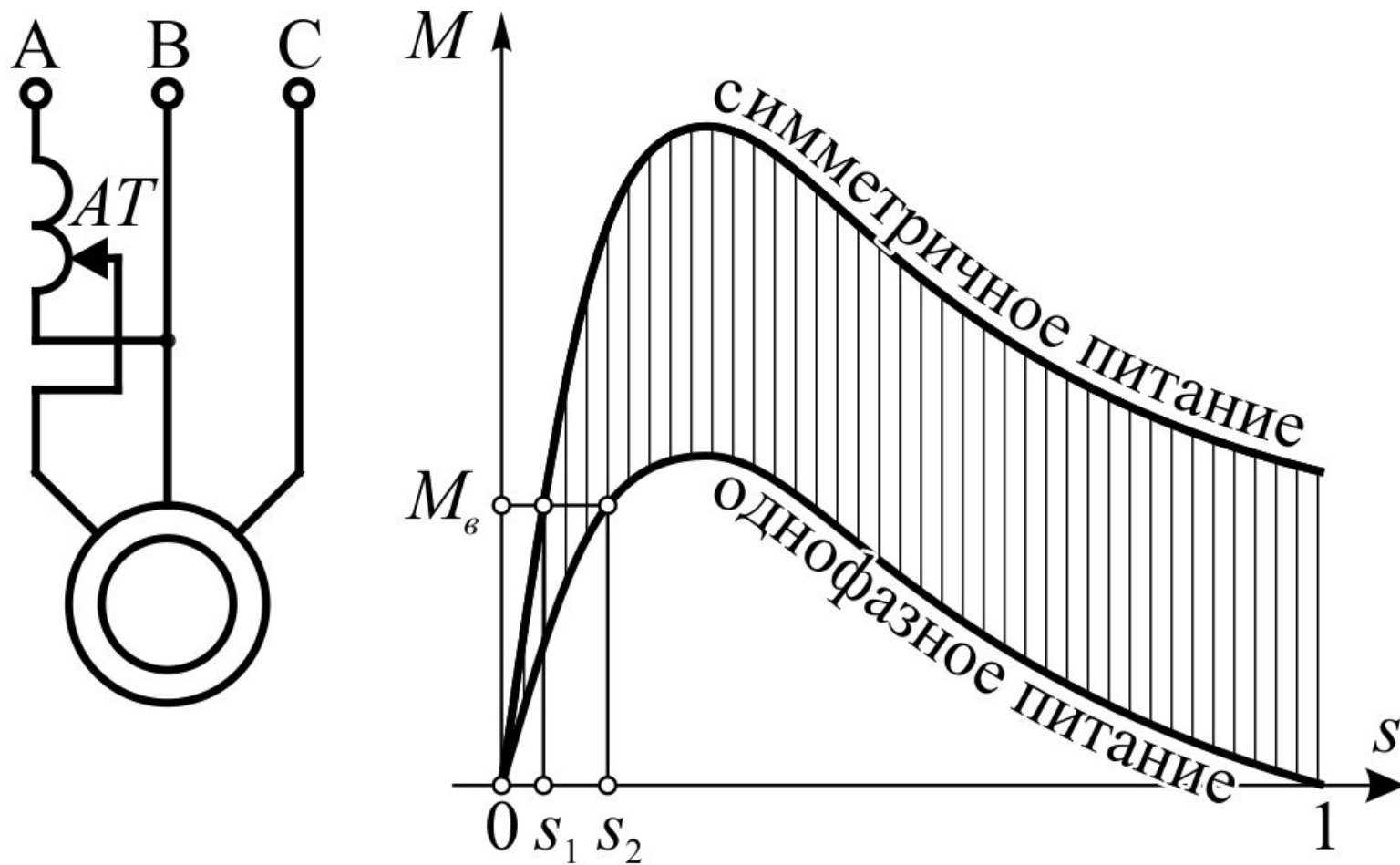
# Регулирование частоты вращения изменением подводимого напряжения.



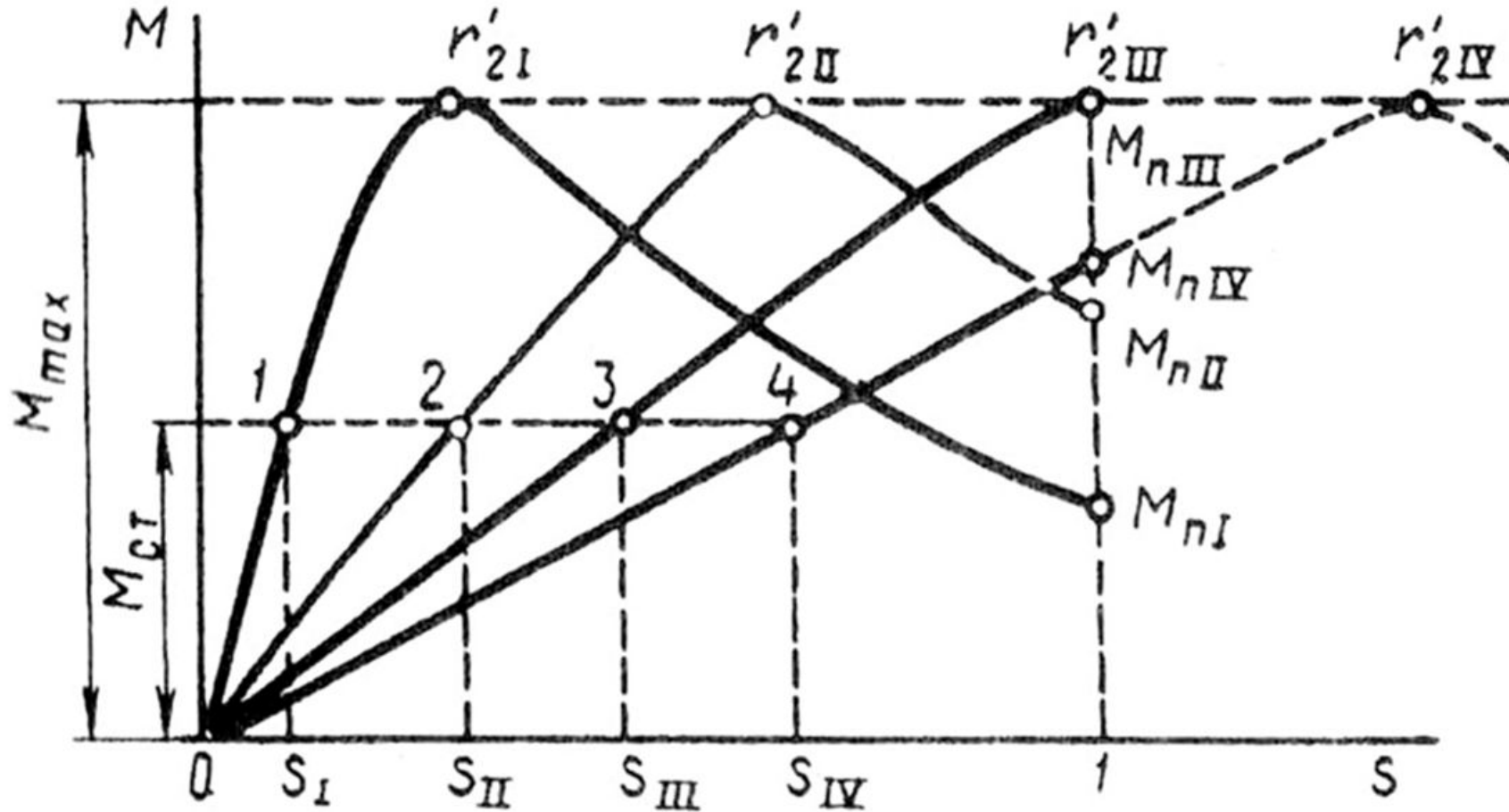
Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя



Регулирование частоты вращения нарушением симметрии подводимого напряжения.

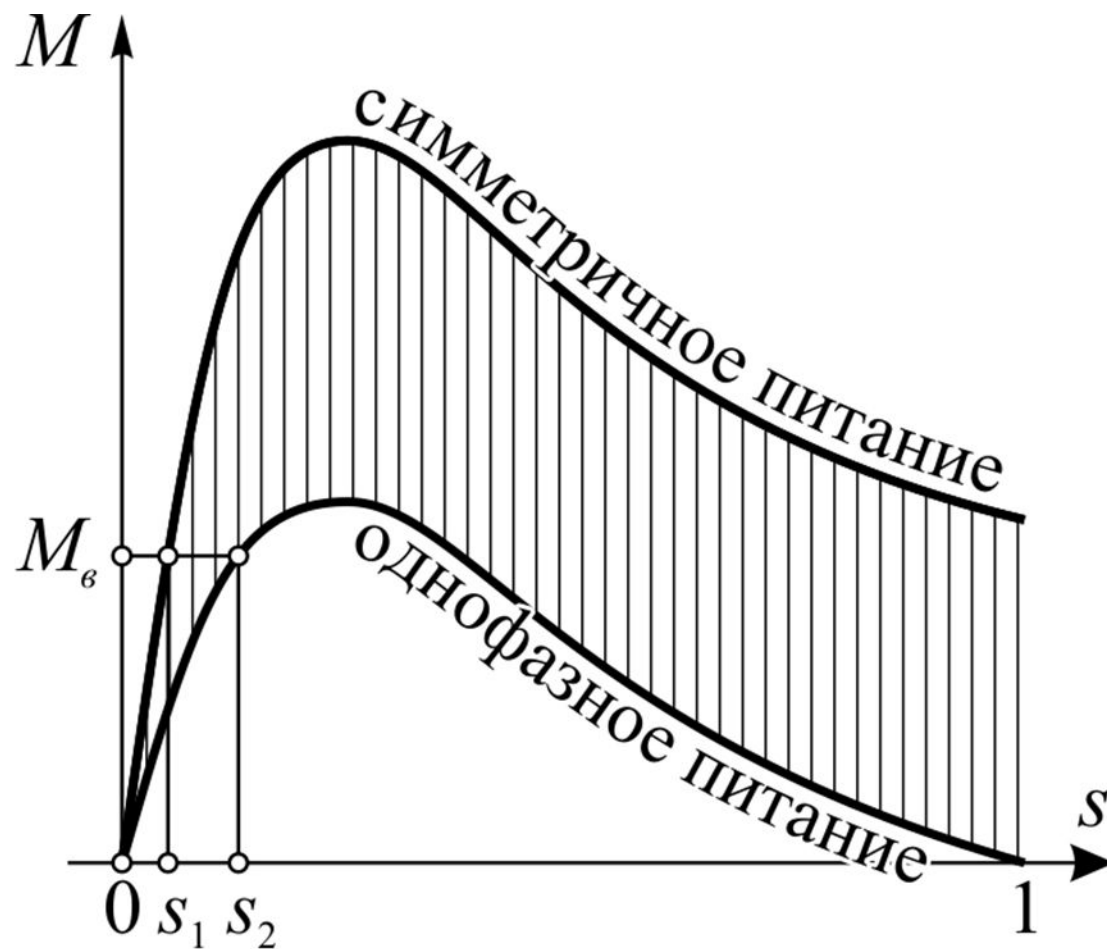
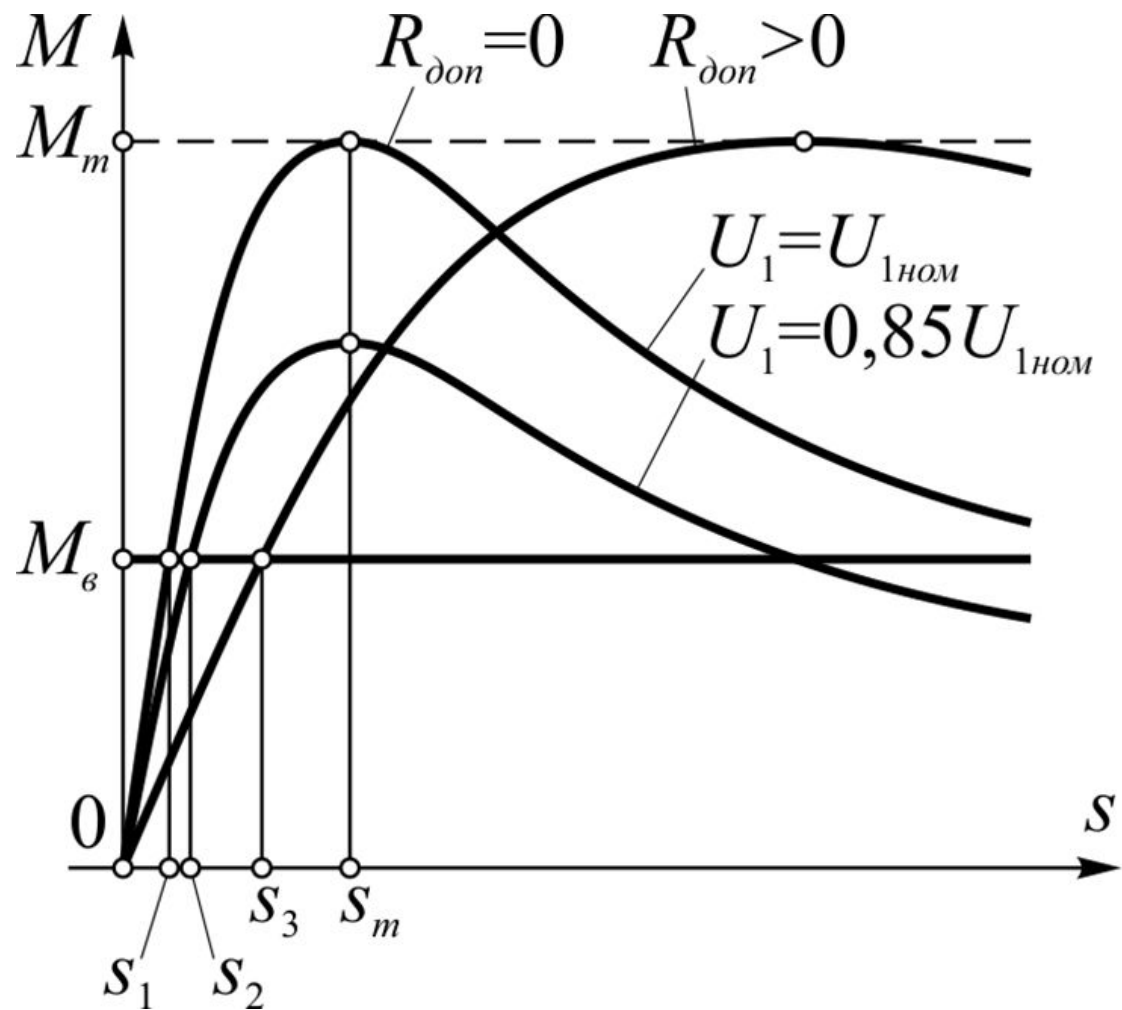


# Регулирование частоты вращения изменением активного сопротивления в цепи ротора.



Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя





Механические характеристики при регулировании частоты вращения ротора изменением подводимого напряжения, введением в цепь обмотки ротора дополнительного активного сопротивления, искажением симметрии напряжений статора.

## Регулирование частоты вращения изменением частоты тока в статоре.

закона изменения момента нагрузки и определяется уравнением

$$U'_1/U_1 = (f'_1/f_1) \sqrt{M'/M}$$

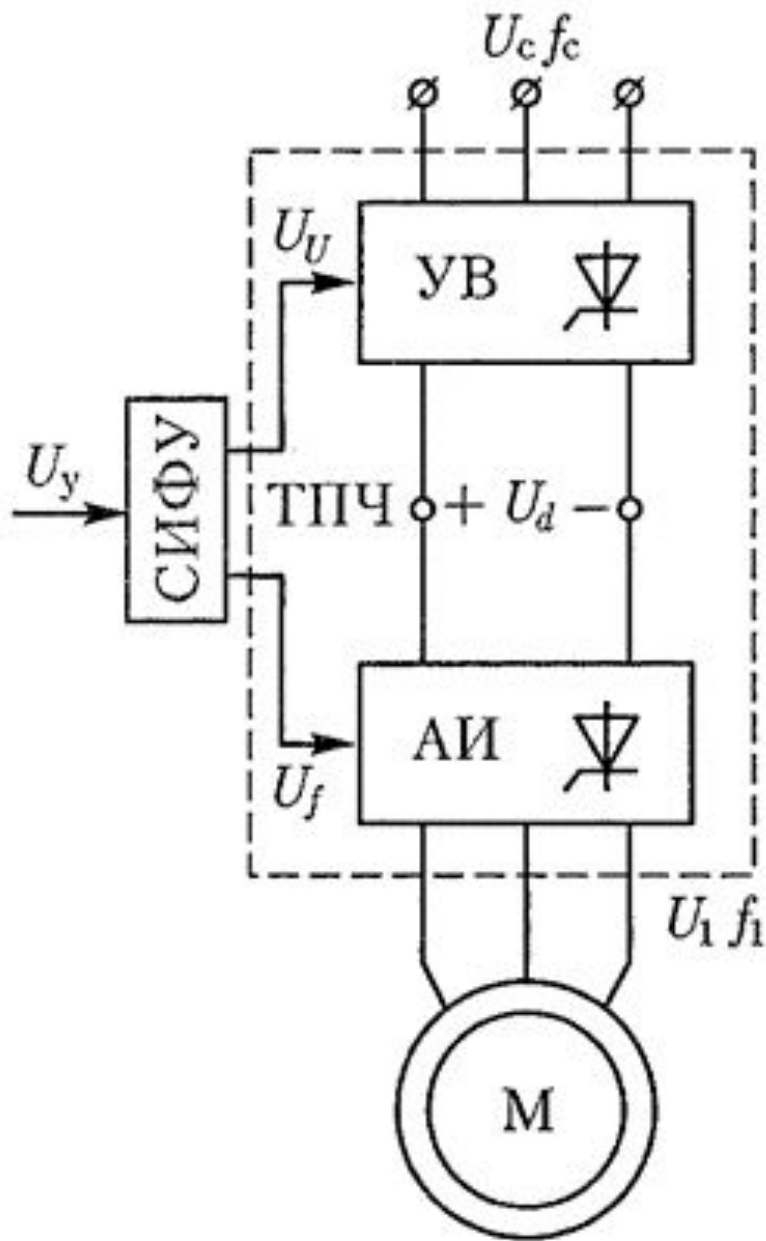
где  $U_1$  и  $M$  – напряжение и момент при частоте  $f_1$ ;  $U'_1$  и  $M'$  -напряжение и момент при частоте  $f'_1$ .

частота вращения двигателя регулируется при условии постоянства момента нагрузки  $M = M' = \text{const}$

$$U'_1 = U_1 f'_1/f_1$$

регулирование при условии постоянства мощности двигателя  $P_{эм} = M\omega_1 = \text{const}$

$$U'_1 = U_1 \sqrt{f'_1/f_1}$$

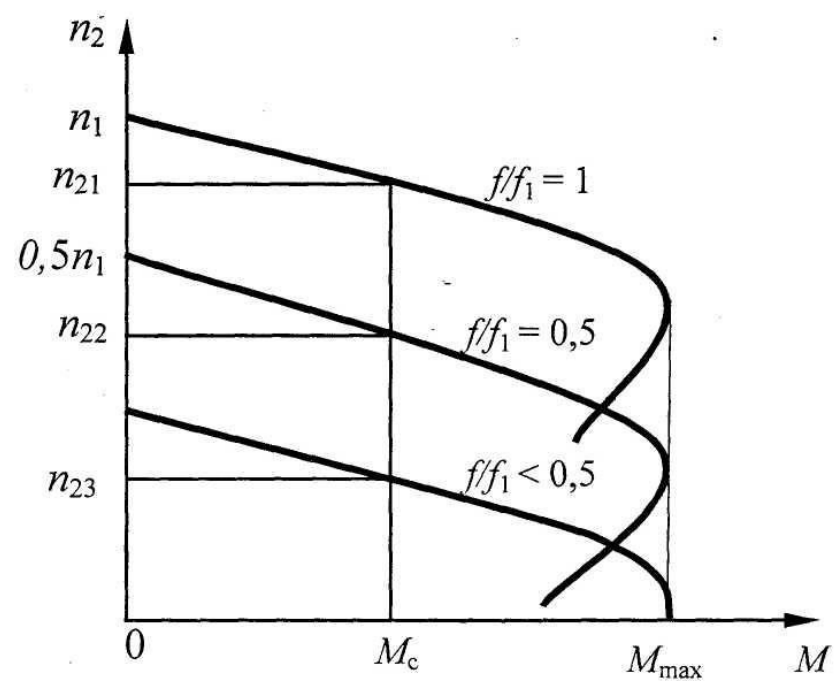
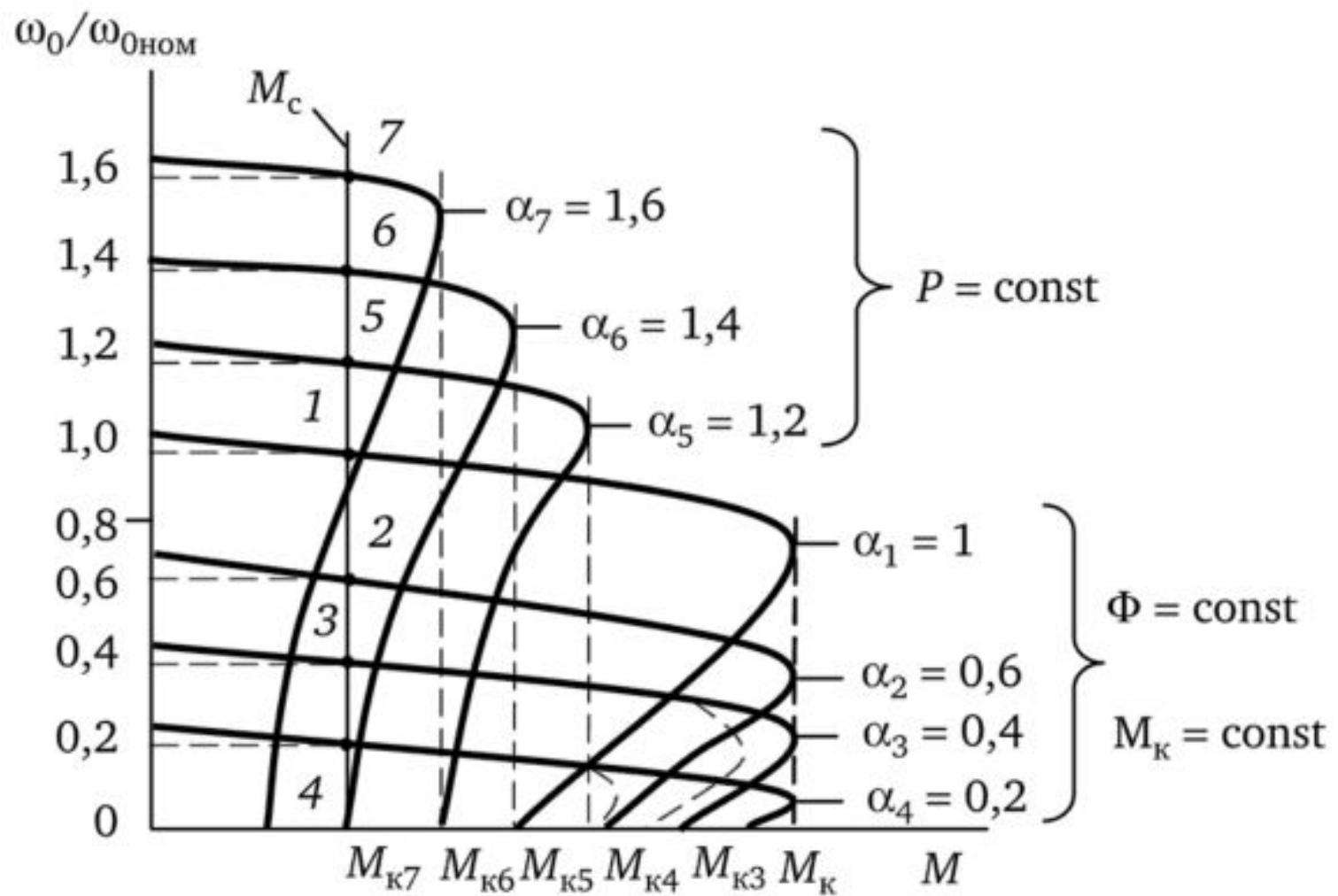


Наибольшее применение для частотного регулирования асинхронных двигателей получили *тиристорные преобразователи частоты ТПЧ*. Обычно такой преобразователь состоит из управляемого выпрямителя УВ и автономного инвертора АИ. Оба блока построены на тиристорах, для управления которыми используется система импульсно-фазового управления СИФУ

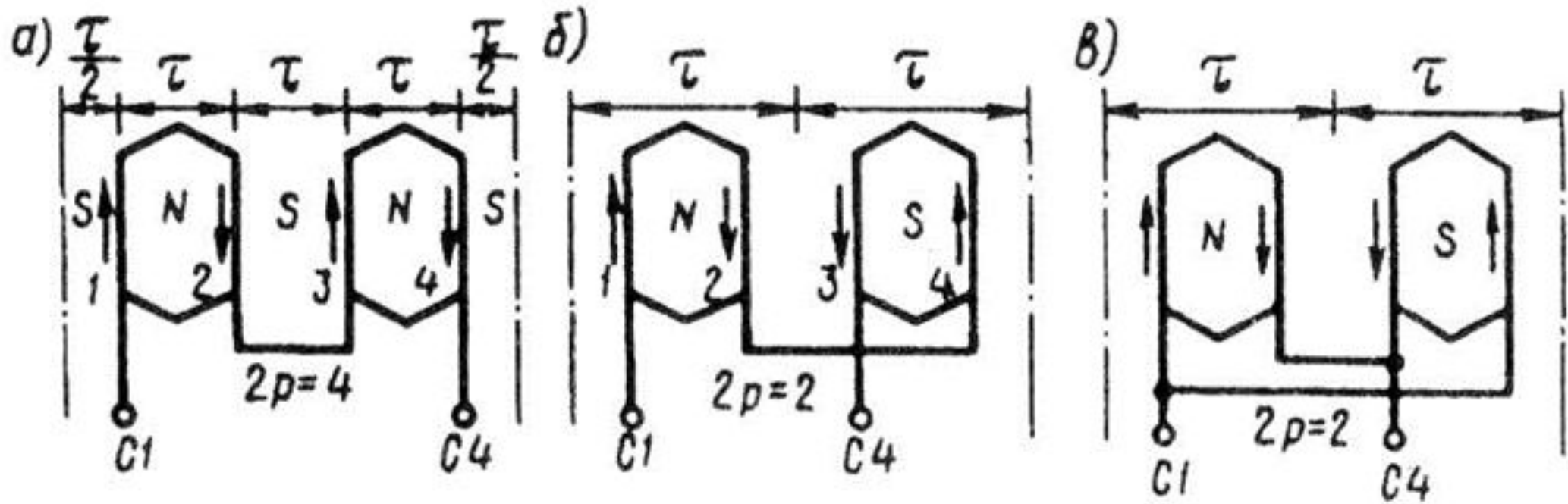
Управляющий сигнал  $U_y$  поступает на вход СИФУ из системы автоматического управления (САУ). Этот сигнал несет информацию о значениях напряжения  $U_1$  и частоты  $f_1$ , которые необходимо подать на обмотку статора, чтобы обеспечить требуемый режим работы двигателя. На выходе СИФУ образуются сигналы  $U_U$  и  $U_f$ . Сигнал  $U_U$  подается на вход управляемого выпрямителя УВ и определяет напряжение постоянного тока  $U_d$ , которое подается на вход автономного инвертора АИ, чтобы на выходе ТПЧ обеспечить требуемое значение напряжения  $U_1$ . Сигнал  $U_f$  поступает на инвертор АИ и определяет необходимое значение частоты переменного тока  $f_1$  на выходе ТПЧ.

Достоинство: обеспечивает плавное регулирование частоты в требуемом диапазоне.

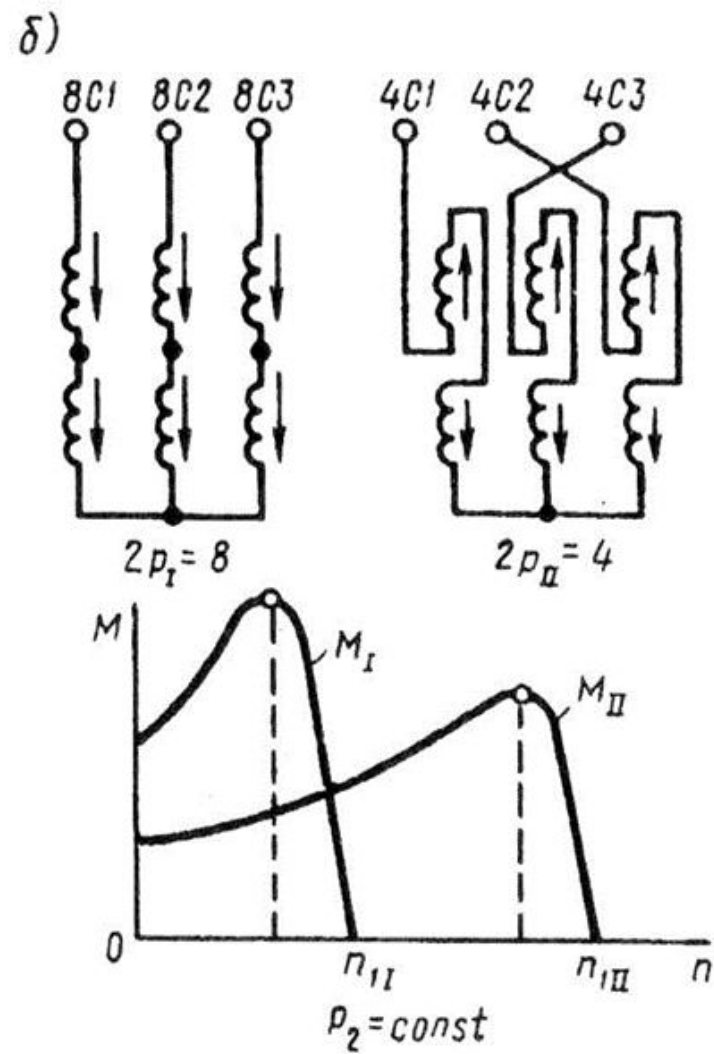
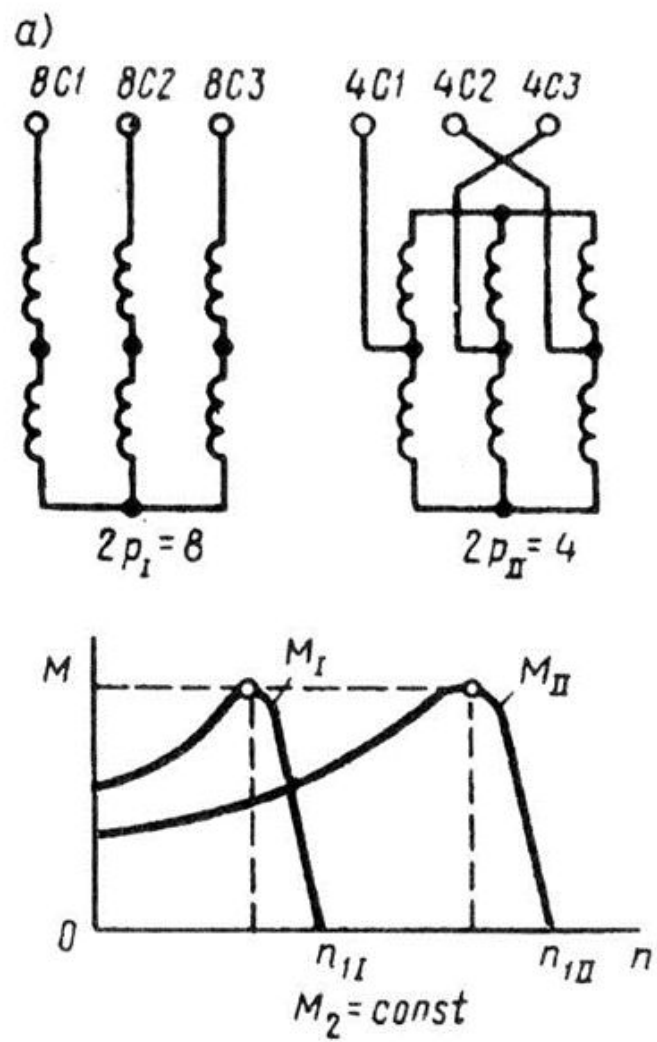
Основной недостаток — некоторая несинусоидальность переменного напряжения на выходе, которая, как известно, ведет к росту потерь в двигателе.



# Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов обмотки статора

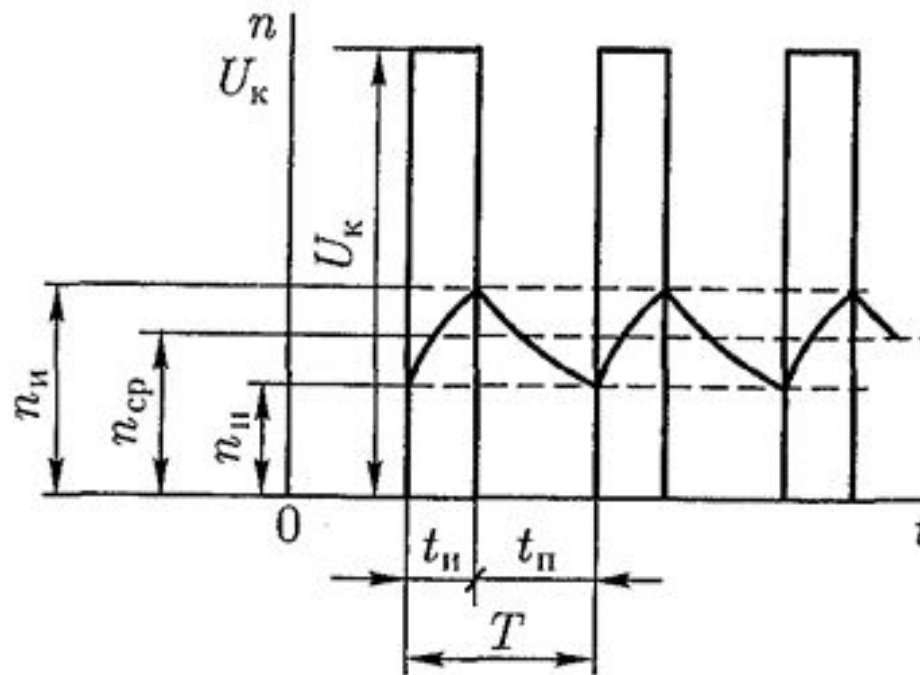
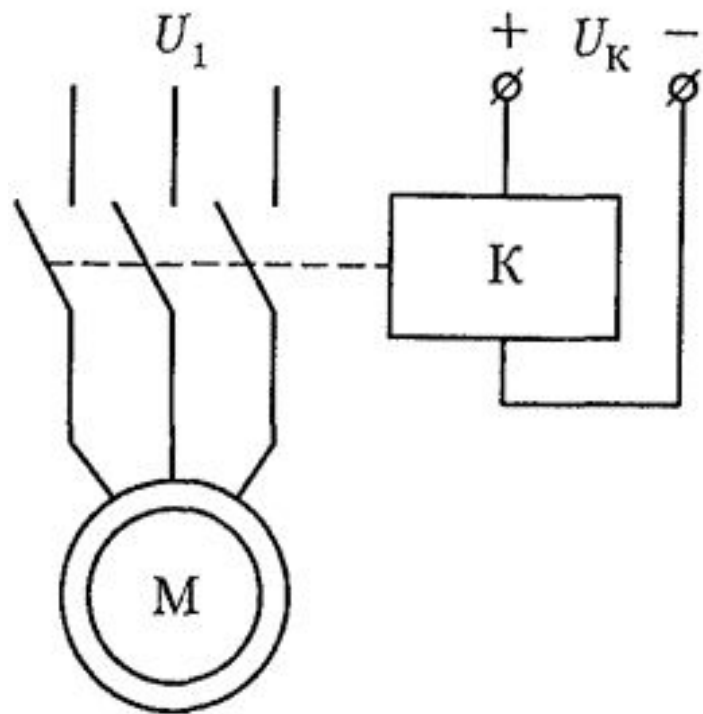


Схемы включения обмотки статора на разное число полюсов



Схемы переключения числа полюсов и механические характеристики в режимах постоянного момента (а) и постоянной скорости (б)

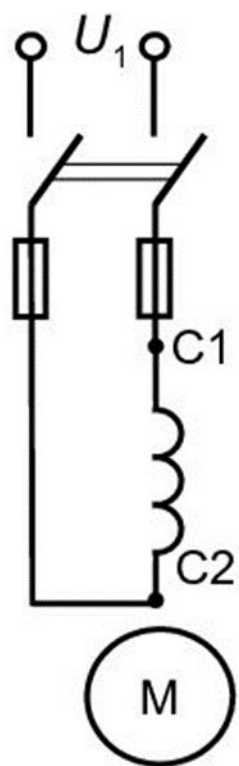
## Импульсное регулирование частоты вращения.



Импульсное регулирование посредством контактора К не обеспечивает достаточной надежности работы привода из-за быстрого выхода из строя контактов, коммутирующих силовую цепь АД. Более надежным является применение для этого бесконтактных устройств, например тиристорного ключа.

# Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели

## Принцип действия однофазного АД



Устройство однофазного АД:

- статор, в пазах которого уложена однофазная обмотка;
- короткозамкнутый ротор.

При включении в сеть МДС обмотки статора создает пульсирующий магнитный поток, который можно разложить на два потока  $\Phi_{\text{пр}}$  и  $\Phi_{\text{обр}}$ , вращающихся в противоположные стороны с частотой  $n_{\text{пр}} = n_{\text{обр}} = n_1$ .

Скольжение ротора относительно потока  $\Phi_{\text{пр}}$

$$S_{\text{пр}} = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = S;$$

скольжение ротора относительно потока  $\Phi_{\text{обр}}$

$$S_{\text{обр}} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{2n_1 - (n_1 - n_2)}{n_1} = 2 - S.$$



# Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели

Например, при  $n_1 = 1500$  об/мин и  $n_2 = 1450$  об/мин

$$S_{\text{пр}} = 0,033 \text{ и } S_{\text{обр}} = 1,967, \quad \text{т.е. } S_{\text{пр}} < S_{\text{обр}}$$

Следовательно, частота токов в роторе, наведенных прямым и обратными потоками  $f_{2\text{обр}} \gg f_{2\text{пр}}$ , а индуктивное сопротивление обмотки ротора току  $I_{2\text{обр}}$  во много раз больше активного сопротивления.

Этот ток  $I_{2\text{обр}}$  является почти чисто индуктивным и оказывает сильное *размагничивающее влияние* на обратное поле  $\Phi_{\text{обр}}$  и тогда  $M_{\text{обр}} \ll M_{\text{пр}}$ .

В результате однофазный АД имеет вращающий момент  $M = M_{\text{пр}} - M_{\text{обр}}$

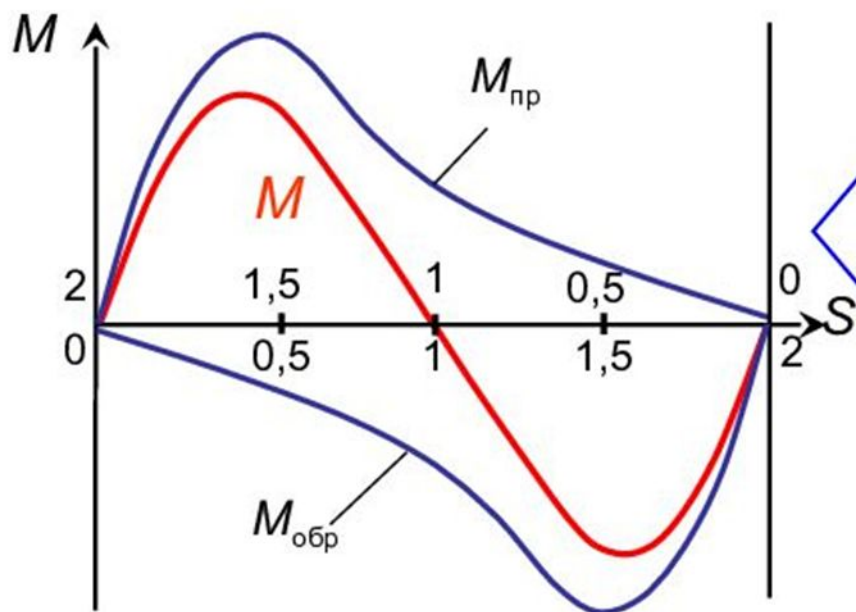


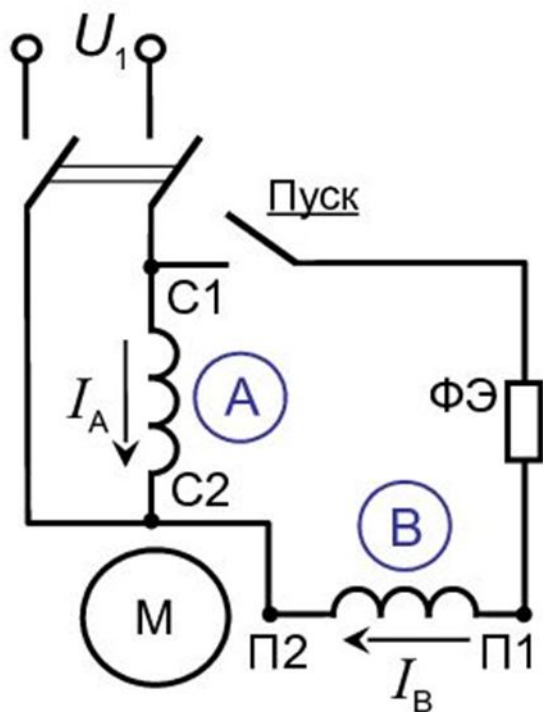
График  $M = f(S)$  может быть получен наложением графиков  $M_{\text{пр}} = f(S)$  и  $M_{\text{обр}} = f(S)$

При  $S_{\text{пр}} = S_{\text{обр}} = 1$  момент  $M_{\text{пр}} = M_{\text{обр}}$

Пусковой момент однофазного АД равен нулю

# Однофазные и конденсаторные асинхронные двигатели

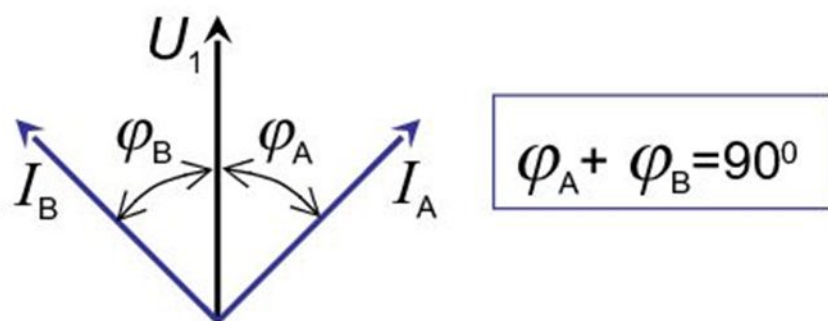
Для создания пускового момента необходимо во время пуска создать вращающееся магнитное поле.



С этой целью применяют пусковую обмотку B.

Обмотки **A** и **B** располагают на статоре со смещением на 90 эл. градусов.

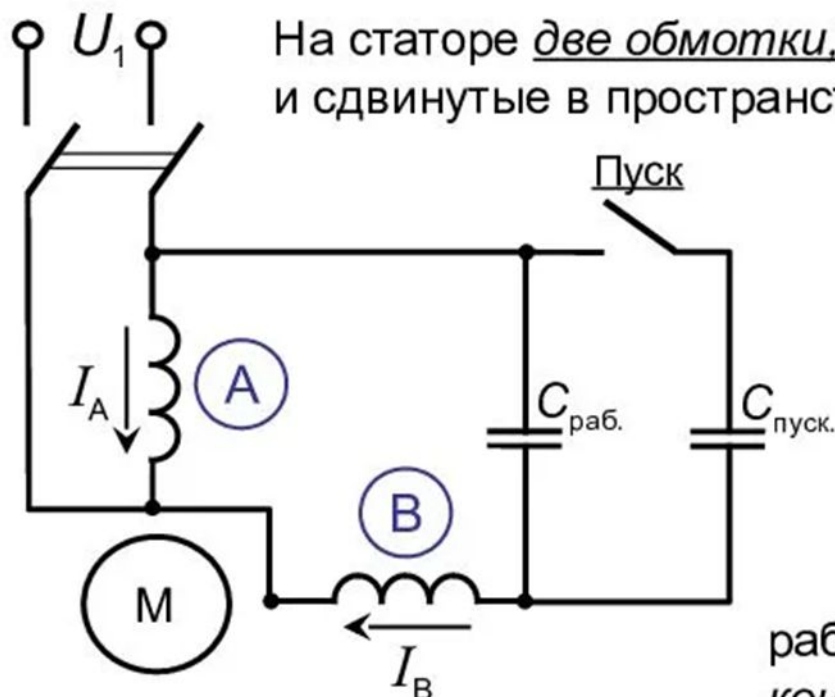
Токи в обмотках статора  $I_A$  и  $I_B$  должны быть сдвинуты по фазе на  $90^\circ$ .



Для этого в цепь пусковой обмотки включают фазосмещающий элемент (чаще всего C).

После достижения частоты вращения близкой к номинальной пусковую обмотку отключают.

## Асинхронные конденсаторные двигатели



На статоре две обмотки, занимающие одинаковое число пазов и сдвинутые в пространстве на 90 эл. градусов.

Главную обмотку A включают непосредственно в сеть, а вспомогательную обмотку B включают в ту же сеть, но через конденсатор  $C_{\text{раб.}}$ .

Вспомогательная обмотка B после пуска не отключается.

Таким образом, если однофазный АД работает с пульсирующей МДС статора, то конденсаторный АД - с вращающейся МДС.

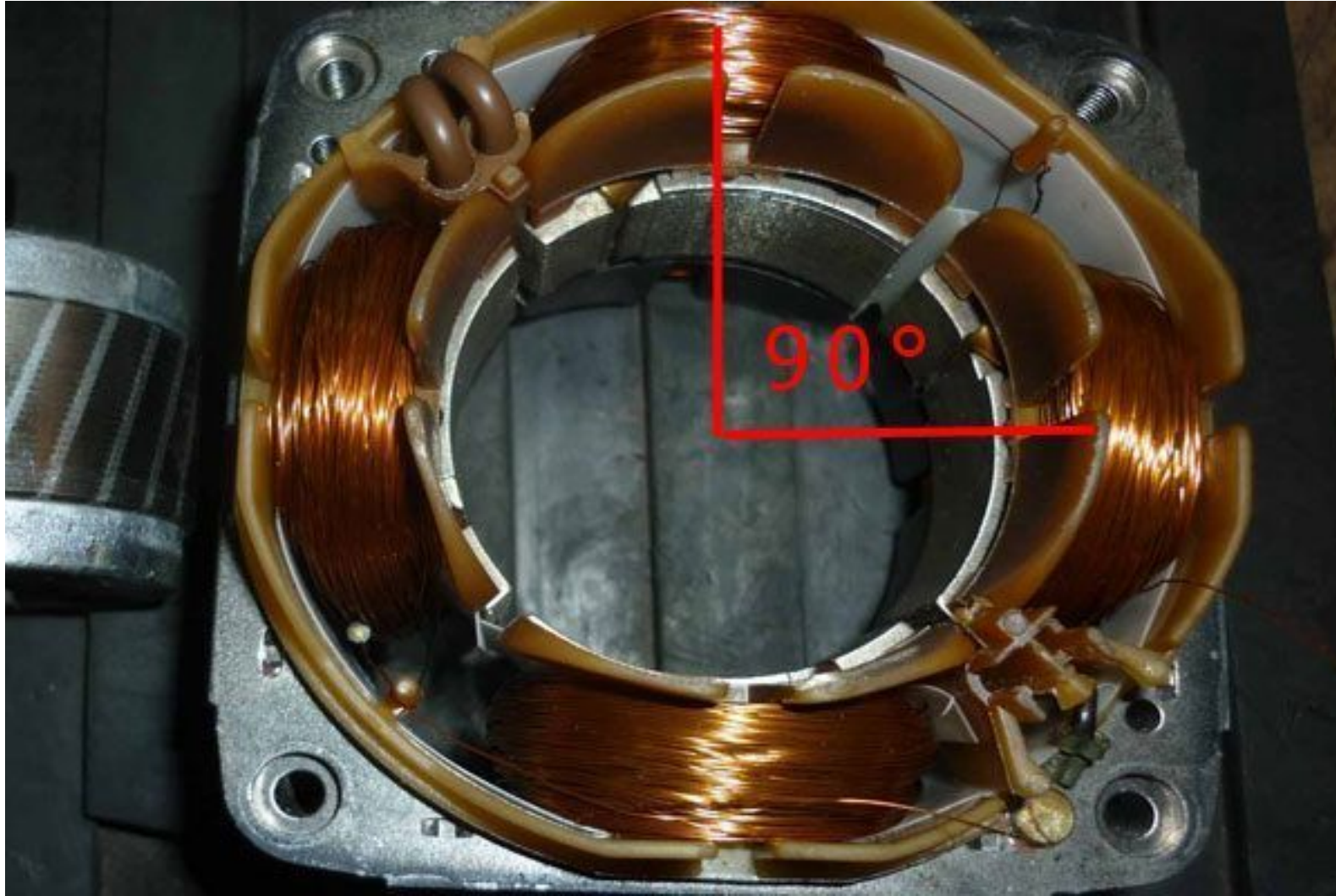
Емкость конденсатора  $C_{\text{раб.}}$ , необходимая для получения кругового вращающегося поля

$$C_{\text{раб.}} = \frac{1,6 \cdot 10^5 I_A \sin \varphi_A}{f_1 \cdot U_1 \cdot k^2},$$

где  $k = \frac{w_B \cdot k_B}{w_A \cdot k_A}$  - коэффициент трансформации.

Для повышения пускового момента параллельно конденсатору  $C_{\text{раб.}}$  включают пусковой конденсатор  $C_{\text{пуск}}$ , емкость которого рассчитывается из условия получения кругового поля при пуске двигателя.

Однофазные асинхронные двигатели питаются от обычной сети переменного напряжения 220 В. Наиболее распространённая конструкция таких двигателей содержит две (или более) обмотки - рабочую и фазосдвигающую. Рабочая питается напрямую, а дополнительная через конденсатор, который сдвигает фазу на 90 градусов, что создаёт вращающееся магнитное поле. Поэтому такие двигатели ещё называют двухфазными или конденсаторными.



Однофазные моторы имеют в основном бытовое назначение:

пылесосы;

вентиляторы;

электронасосы;

холодильники;

машины для переработки сырья.



Для того, чтобы выполнить подключение асинхронного двигателя нужна однофазная сеть переменного тока.

Такие двигатели работают при напряжении 220 Вольт и частоте 50 Гц.

Прилагательное «асинхронный» указывает на то, что скорость вращения якоря отстает от магнитного поля статора.

Однофазные двигатели имеют две независимых цепи, но работают они в основном на одной, отсюда и название.

Основные части двигателя:

- Статор (неподвижный элемент)
- Ротор (вращающаяся часть)
- Механическое соединение этих двух частей.
- Поворотные подшипники.

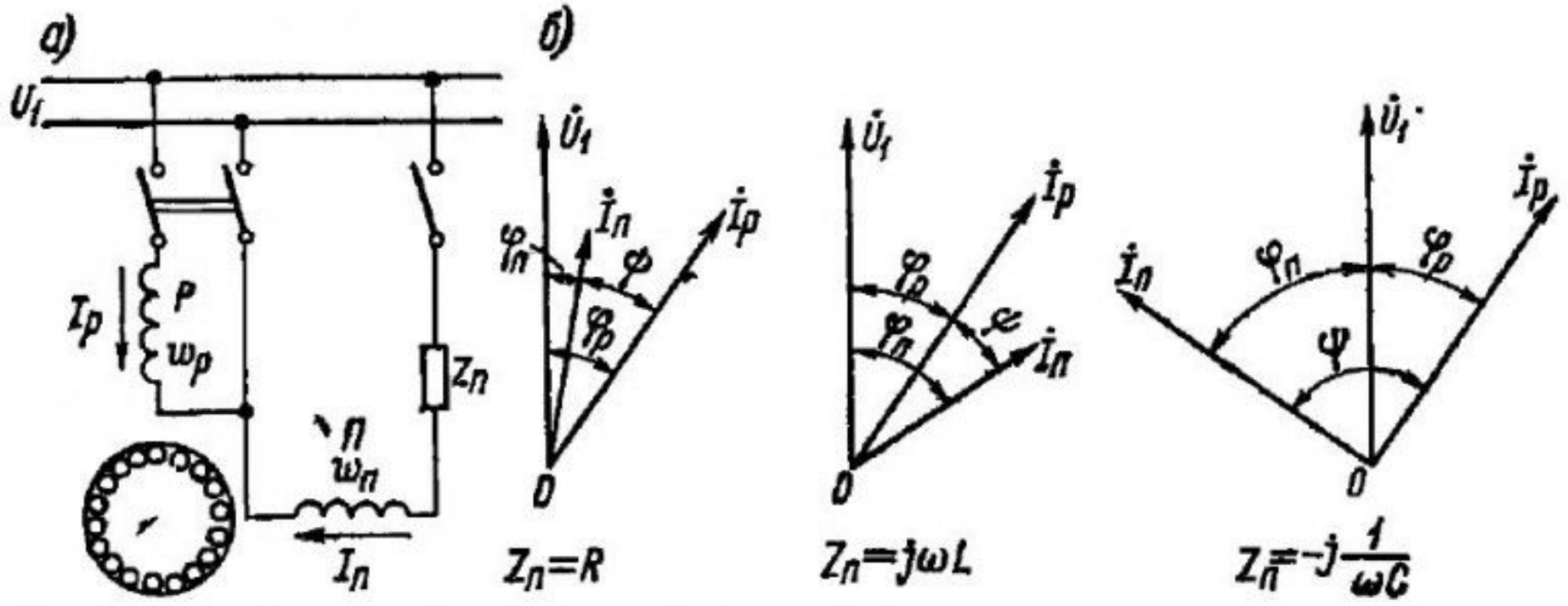
Соединение состоит из внутренних колец, установленных на закрепленных втулках вала ротора, наружных колец в защитных боковых крышках, прикрепленных к статору.

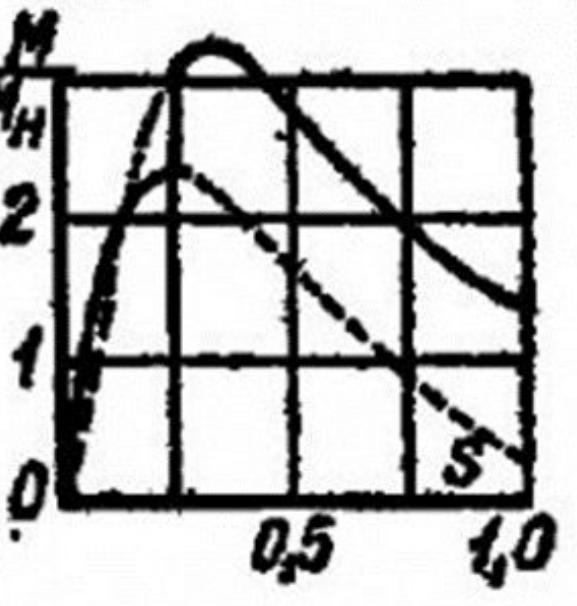
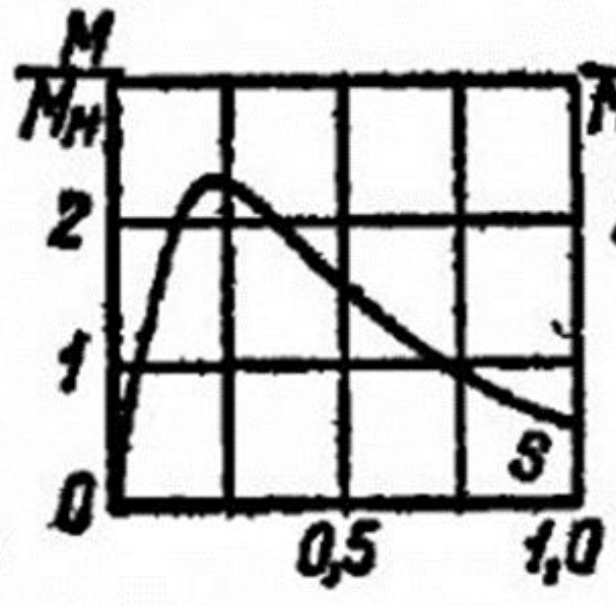
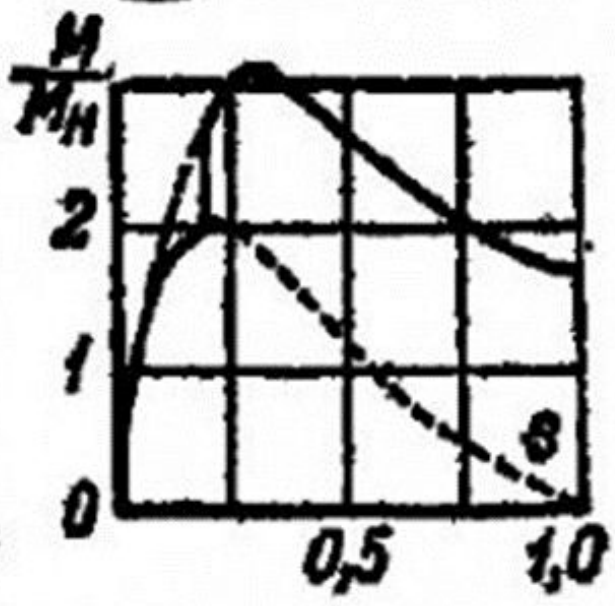
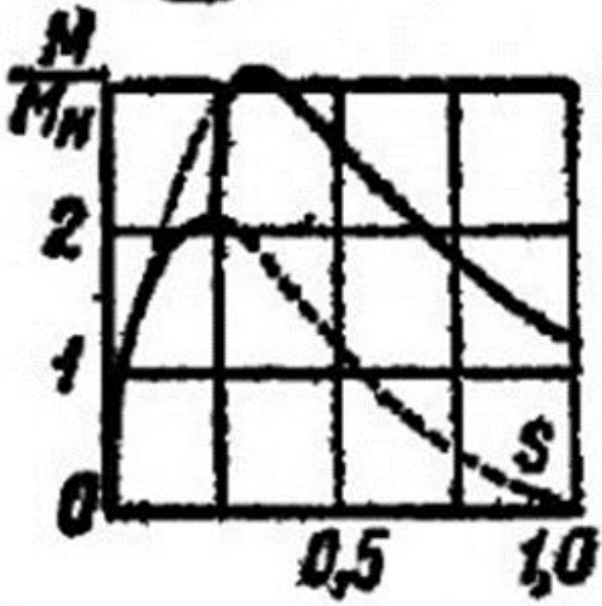
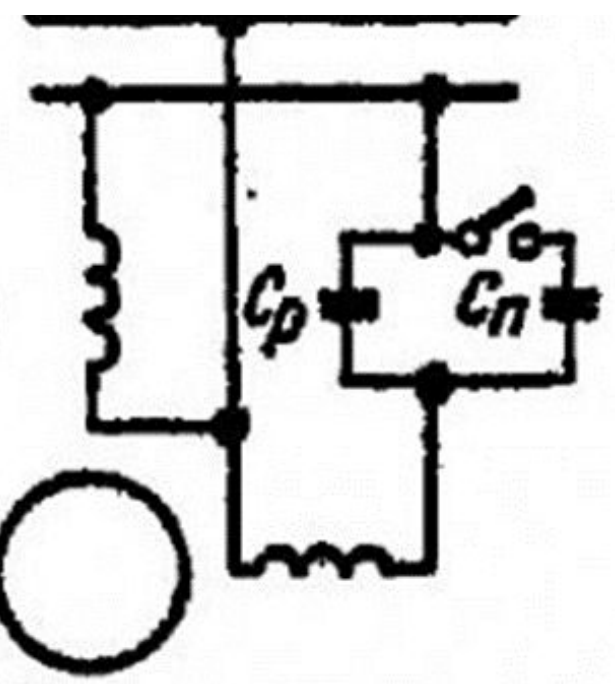
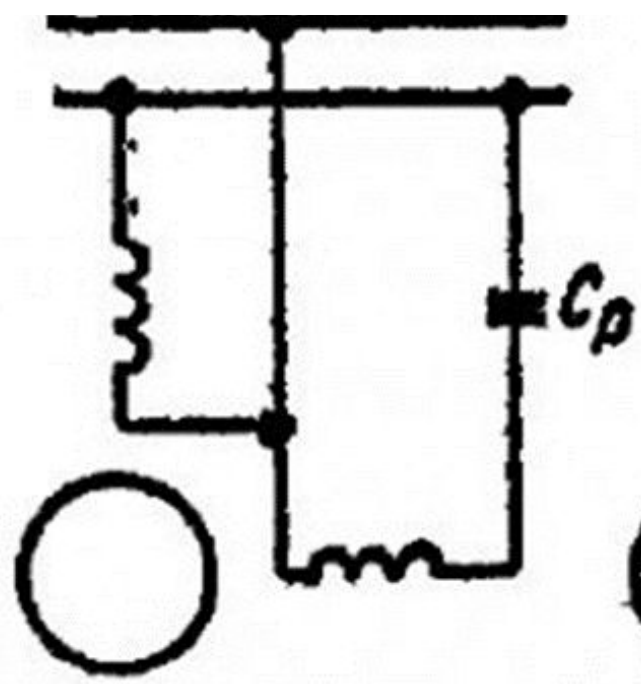
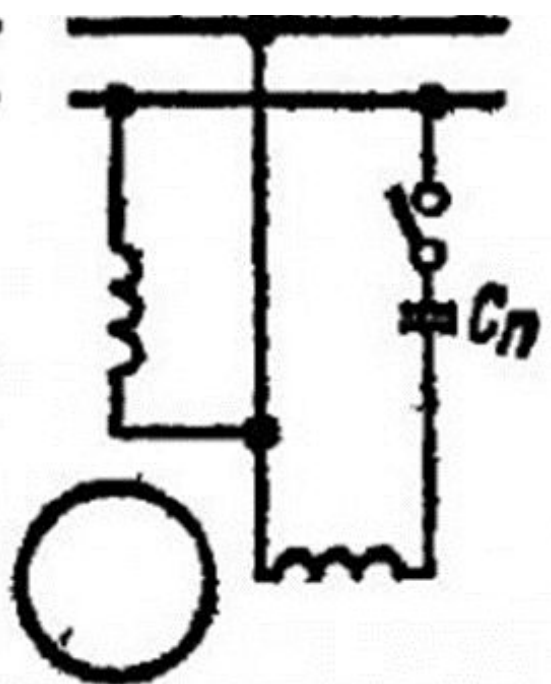
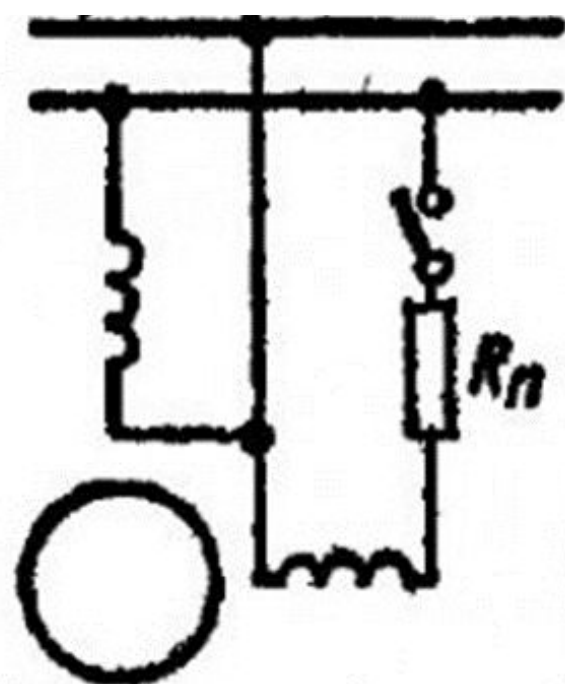
Для запуска однофазного асинхронного двигателя с пусковой обмоткой установлена другая катушка. Обмотка стартера установлена со смещением от рабочей катушки на  $90^\circ$ . Для создания сдвига тока, в цепи однофазного двигателя имеется схема сдвига фаз.

Сдвиг можно получить при помощи различных элементов.

Это могут быть:

- Активное сопротивление.
- Емкостное.
- Индуктивное.





## Автотрансформаторное регулирование напряжения

Автотрансформатор – это обычный трансформатор, но с одной обмоткой и с отводами от части витков. При этом нет гальванической развязки от сети, но она в данном случае и не нужна, поэтому получается экономия из-за отсутствия вторичной обмотки.

На схеме изображён автотрансформатор T1, переключатель SW1, на который приходят отводы с разным напряжением, и двигатель M1.

Регулировка получается ступенчатой, обычно используют не более 5 ступеней регулирования.

Преимущества данной схемы:

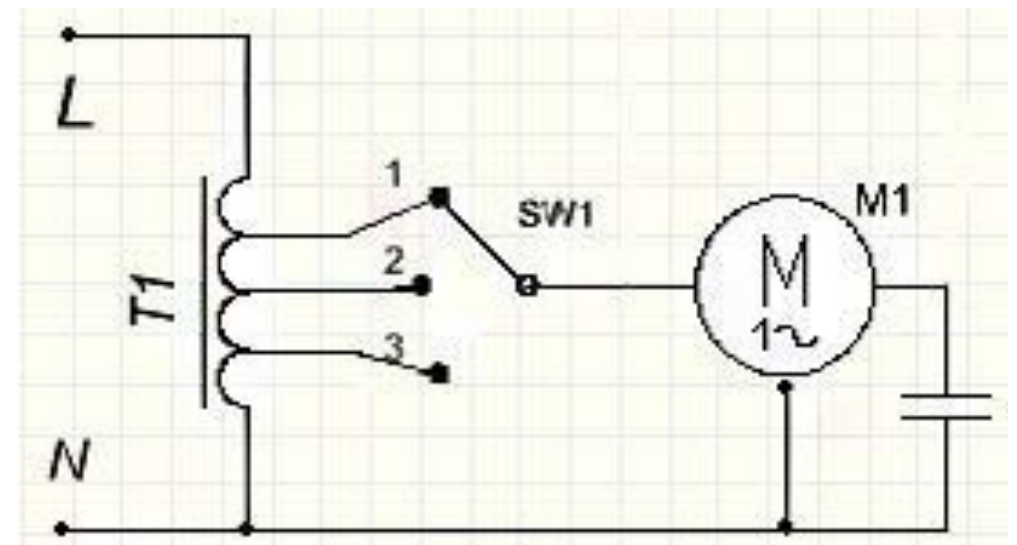
неискажённая форма выходного напряжения (чистая синусоида)

хорошая перегрузочная способность трансформатора

Недостатки:

большая масса и габариты трансформатора (зависят от мощности нагрузочного мотора)

все недостатки присущие регулировке напряжением.





## ОБОЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

<b>АИР</b>	<b>С</b>	<b>80</b>	<b>В</b>	<b>2</b>	<b>Е</b>	<b>У</b>	<b>З</b>	<b>IP 54</b>	<b>2,2 кВт</b>	<b>3000 об/мин</b>	<b>IM 1081</b>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

1. серия (тип) электродвигателя
2. электрические модификации
3. габарит электродвигателя
4. длина сердечника и/или длина станины
5. количество полюсов
6. конструктивные модификации
7. климатическое исполнение
8. категория размещения
9. степень защиты
10. мощность
11. число оборотов
12. монтажное исполнение

- **Серия (тип) электродвигателя:**

Общепромышленные электродвигатели:

АИ - обозначение серии общепромышленных электродвигателей, Р, С (АИР и АИС) - вариант привязки мощности к установочным размерам, т.е. АИР (А, 5А, 4А, АД) - электродвигатели, изготавливаемые по ГОСТ, АИС (6А, IMM, RA) - электродвигатели, изготавливаемые по евростандарту DIN (CENELEC).

Взрывозащищенные электродвигатели:

ВА, АВ, АИМ, АИМР, 2В, 3В и др.

- **Электрические модификации:**

М - модернизированный электродвигатель: АИРМ, 5АМ

Н - электродвигатель защищенного исполнения с самовентиляцией: 5АН

Ф - электродвигатель защищенного исполнения с принудительным охлаждением:  
5АФ

К - электродвигатель с фазным ротором: 5АНК

С - электродвигатель с повышенным скольжением: АИРС, АС, 4АС, 5АС и др.

Е - однофазный электродвигатель 220V: АИРЕ, 5АЕУ

В - встраиваемый электродвигатель.

- **Габарит электродвигателя** (высота оси вращения, равен расстоянию от низа лап до центра вала в миллиметрах):

50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355, 400, 450 и выше.

- **Длина сердечника** и/или **длина станины**:

A, B, C - длина сердечника (первая длина, вторая длина, третья длина)

XK, X, YK, Y - длина сердечника статора высоковольтных двигателей

S, L, M - установочные размеры по длине станины.

- **Количество полюсов электродвигателя:**

2, 4, 6, 8, 10, 12, 4/2, 6/4, 8/4, 8/6, 12/4, 12/6, 6/4/2, 8/4/2, 8/6/4, 12/8/6/4 и др.

○ **Конструктивные модификации электродвигателя:**

Е - электродвигатель с встроенным электромагнитным тормозом: АИР 100L6 Е УЗ

Е2 - электродвигатель с встроенным электромагнитным тормозом и ручкой расторможения: АИР 100L6 Е2 УЗ

Б - со встроенным датчиком температурной защиты: АИР 180М4 БУЗ

Ж - электродвигатель со специальным выходным концом вала для моноблочных насосов: АИР 80В2 ЖУ2

П - электродвигатель повышенной точности по установочным размерам: АИР 180М4 ПУЗ

РЗ - электродвигатель для мотор-редукторов: АИР 100L6 РЗ

С - электродвигатель для станков-качалок: АИР 180М8 СНБУ1

Н - электродвигатель малошумного исполнения: 5АФ 200 МА4/24 УХЛ4

Л - электродвигатель для привода лифтов: 5АФ 200 МА4/24 УХЛ4.

- **Климатическое исполнение электродвигателя (ГОСТ 15150-69):**

У - умеренный климат

Т - тропический климат

ХЛ - холодный климат

ОМ - на судах морского и речного флота.

- **Категория размещения:**

5 - в помещении с повышенной влажностью

4 - в помещении с регулируемыми климатическими условиями

3 - в помещении

2 - на улице под навесом

1 - на открытом воздухе.

○ **Степень защиты электродвигателя (IP, ГОСТ 17494-87):**

Первая цифра: защита от твердых объектов:

0 - без защиты

1 - защита от твердых объектов размерами свыше 50 мм (например, от случайного касания руками)

2 - защита от твердых объектов размерами свыше 12 мм (например, от случайного касания пальцами)

3 - защита от твердых объектов размерами свыше 2,5 мм (например, инструментов, проводов)

4 - защита от твердых объектов размерами свыше 1 мм (например, тонкой проволоки)

5 - защита от пыли (без осаждения опасных материалов).

Вторая цифра: защита от жидкостей:

0 - без защиты

1 - защита от вертикально падающей воды (конденсация)

2 - защита от воды, падающей под углом  $15^\circ$  к вертикали

3 - защита от воды, падающей под углом  $60^\circ$  к вертикали

4 - защита от водяных брызг со всех сторон

5 - защита от водяных струй со всех сторон.

- **Монтажное исполнение электродвигателей (ГОСТ 2479-79):**

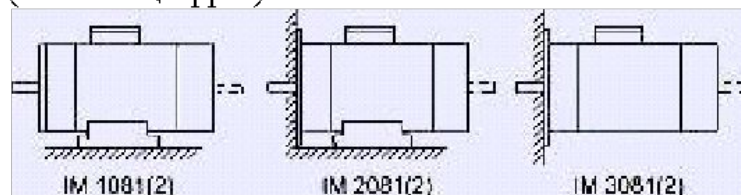
Устанавливаются следующие условные обозначения конструктивных исполнений электрических машин (1-я цифра):

- 1 - машины на лапах с подшипниковыми щитами: с пристроенным редуктором;
- 2 - машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах);
- 3 - машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах); с цокольным фланцем;
- 4 - машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;
- 5 - машины без подшипниковых щитов;
- 6 - машины на лапах с подшипниковыми щитами и со стояковыми подшипниками;
- 7 - машины на лапах со стояковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);
- 8 - машины с вертикальным валом, кроме машин групп от IM 1 до IM 4;
- 9 - машины специального исполнения по способу монтажа.



## Условное обозначение способа монтажа электрических машин групп от IM 1 до IM 9

(2 и 3-я цифры):



Примечание: полные таблицы есть в ГОСТе.

### Устанавливаются следующие условные обозначения исполнений концов вала электрических машин

(4-я цифра):

0 - без конца вала;

1 - с одним цилиндрическим концом вала;

2 - с двумя цилиндрическими концами вала;

3 - с одним коническим концом вала;

4 - с двумя коническими концами вала;

5 - с одним фланцевым концом вала;

6 - с двумя фланцевыми концами вала;

7 - с фланцевым концом вала на стороне D (лев.) и цилиндрическим концом вала на стороне N (прав.);

9 - прочие исполнения концов вала.

Условные обозначения электрических машин малой мощности установлены  
**ГОСТ 23264-78.**

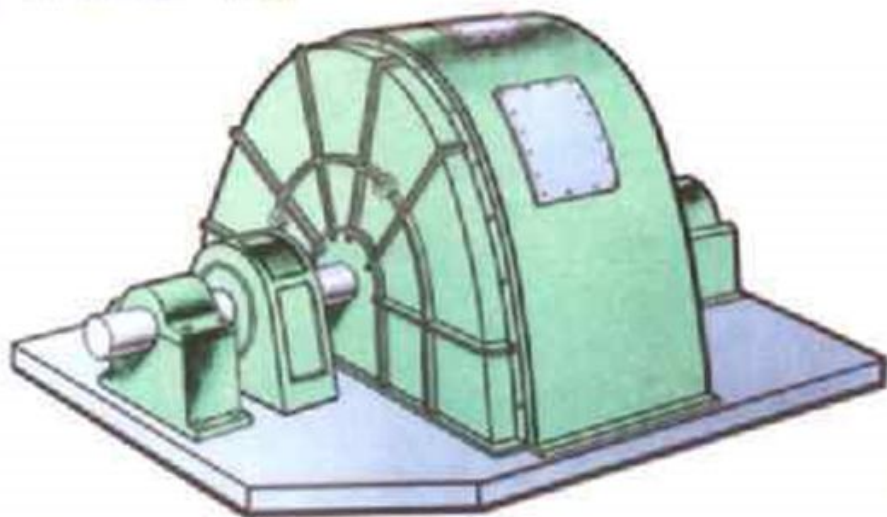
Установочные размеры проектируемых и модернизируемых - по **ГОСТ 18709-73.**

Поскольку обозначение типов двигателей в большинстве случаев не определены стандартами, приведенные обозначения дают только общую структуру.

## КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

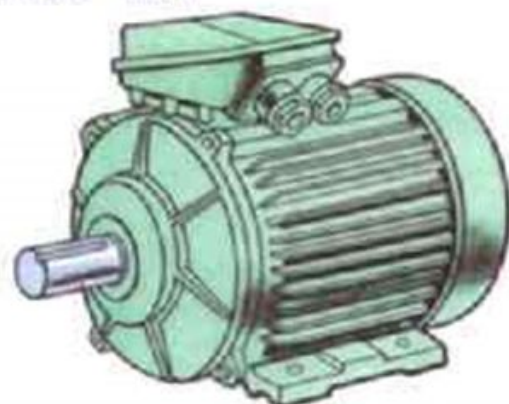
По способу монтажа

ГРУППА IM7



На выносных подшипниковых стойках

ГРУППА IM1



На лапах

ГРУППА IM3



Фланцевое

IM (International Mounting) – монтажное  
исполнение

В серии приняты следующие обозначения двигателей:

$4A0_10_20_3000_40_50_60_700_8$ :

4—Порядковый номер серии (четвертая)

A— Род двигателя (асинхронный)

$0_1$ — Исполнение по способу защиты от окружающей среды: буква Н - защищенное, отсутствие знака - закрытое обдуваемое исполнение

$0_2$ — Исполнение ротора двигателя: буква К - ротор фазный, отсутствие знака - ротор короткозамкнутый

$0_3$ — Исполнение двигателя по материалу станины и щитов: А - станина и щиты алюминиевые; Х - станина и щиты алюминиевые или чугунные в любом сочетании материалов; отсутствие знака - станина и щиты чугунные или стальные

$000_4$ — Высота оси вращения, мм (две или три цифры)

$0_5$ — Установочный размер по длине станины *S*, *H* или *L* (меньший, средний или больший)

$0_6$ — Длина сердечника А (меньшая) или В (большая) при определенном установочном размере; отсутствие знака означает, что при данном установочном размере (*S*, *M* или *L*) выполняются сердечники только одной длины

$0_7$ — Число полюсов (одна или две цифры)

$00_8$ — Климатическое исполнение и категория размещения (по ГОСТ 15150-69)

## Примеры обозначения двигателей

**4А180М4УЗ** – асинхронный двигатель 4-й серии, закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором, с чугунными станиной и щитами, высотой оси вращения  $h=180$  мм, средним (М) установочным размером по длине станины, четырехполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3

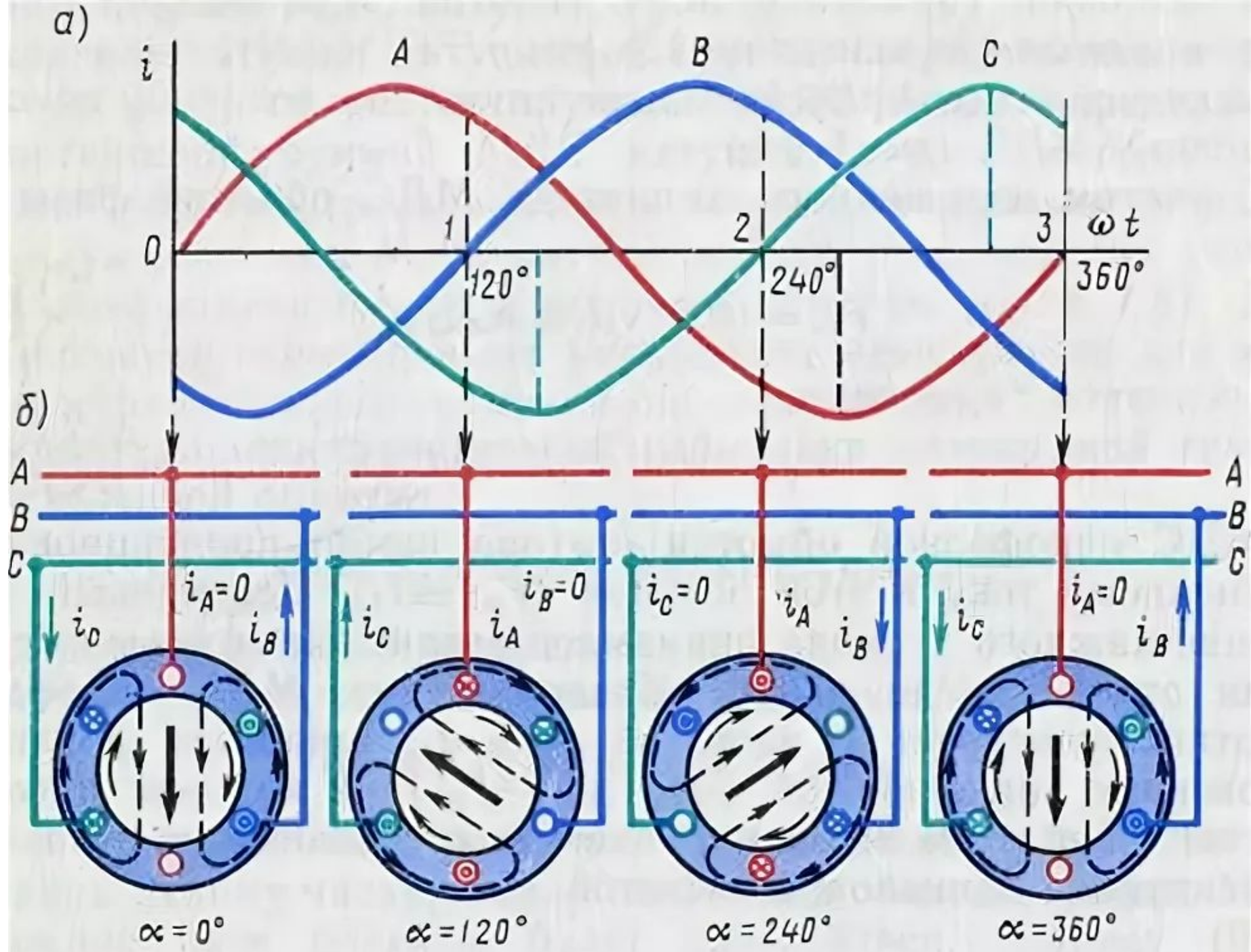
**4АН315S10УЗ** – асинхронный двигатель 4-й серии защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором, стальными станиной и щитами, высотой оси вращения 315 мм, со средним (S) установочным размером, десятиполюсный, климатического исполнения У и категории размещения 3

**4АНК315S10УЗ** – то же, что в предыдущем примере, но двигатель с фазным ротором

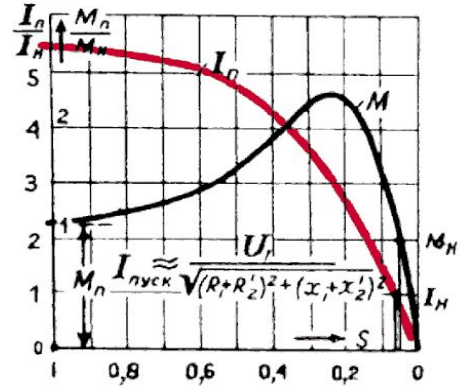
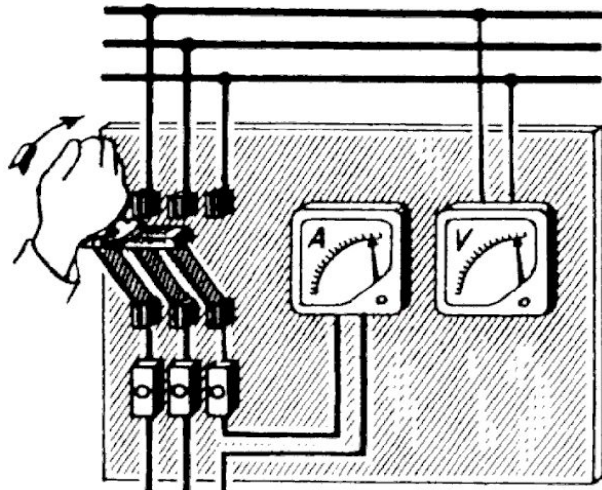
**4А315S10УЗ** – то же, что и ранее, но двигатель закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором.



ФГБОУ ВО ЮГУ  
ИНСТИТУТ  
НЕФТИ И ГАЗА



# ПУСК В ХОД ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ



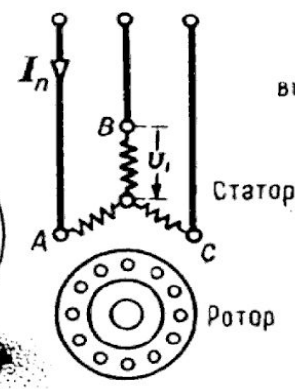
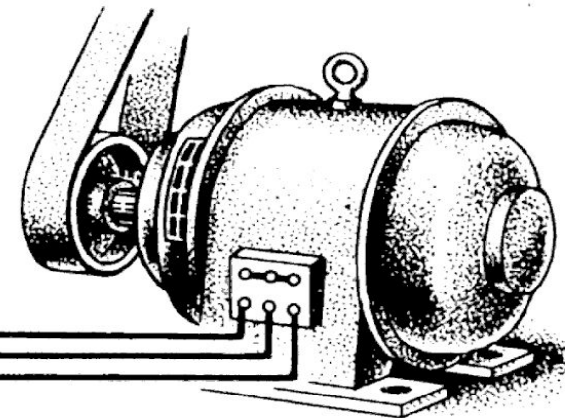
Изменение тока и крутящего момента при разбеге двигателя

$$K_i = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} \approx 4 \div 7$$

Кратность пускового тока

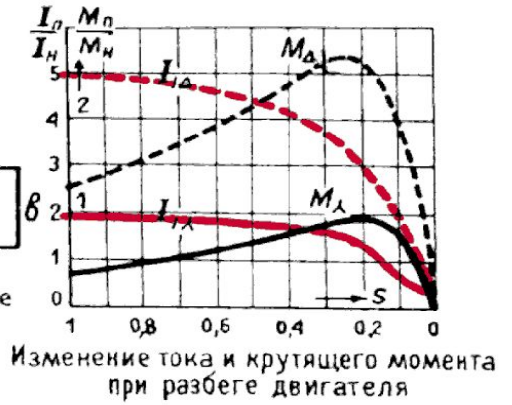
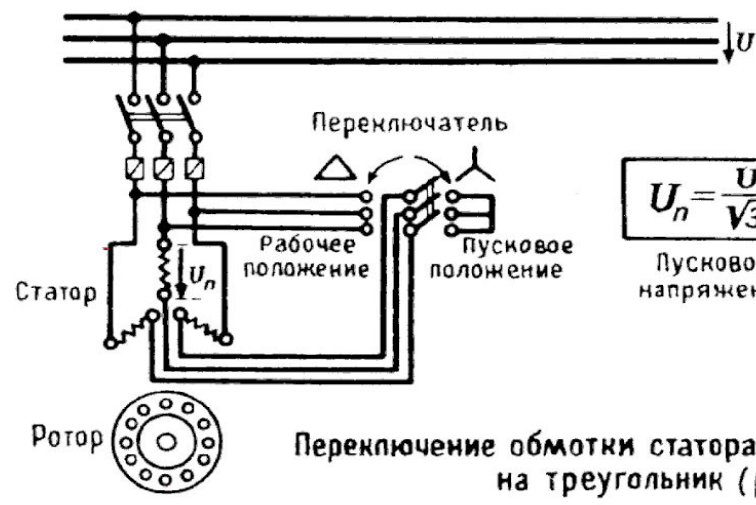
$$K_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} \approx 1,1 \div 1,4$$

Кратность пускового момента



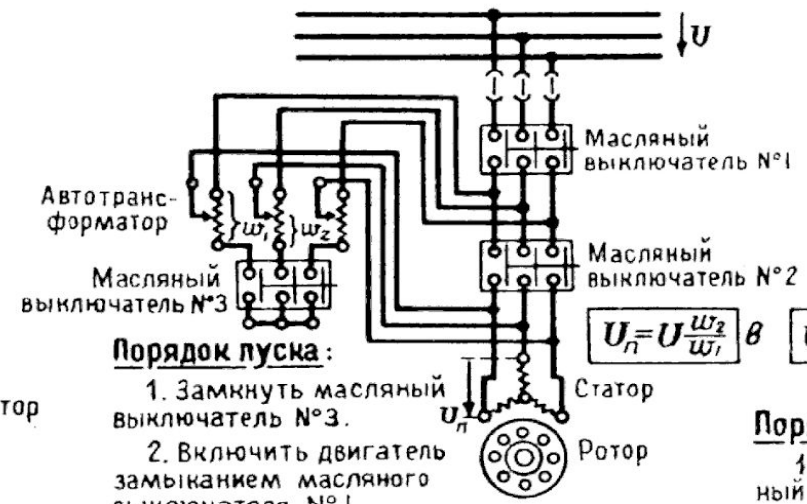
## ПРЯМОЙ ПУСК

(Непосредственное включение двигателя к напряжению сети  $U_1$ )



Изменение тока и крутящего момента при разбеге двигателя

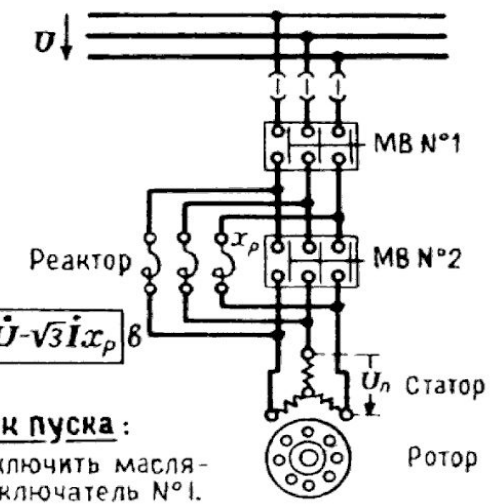
Переключение обмотки статора со звезды (пусковое положение) на треугольник (рабочее положение)



### Порядок пуска:

1. Замкнуть масляный выключатель №3.
2. Включить двигатель замыканием масляного выключателя №1.
3. По окончании разбега ротора разомкнуть масляный выключатель №3 и замкнуть масляный выключатель №2.

Применение понижающего автотрансформатора



### Порядок пуска:

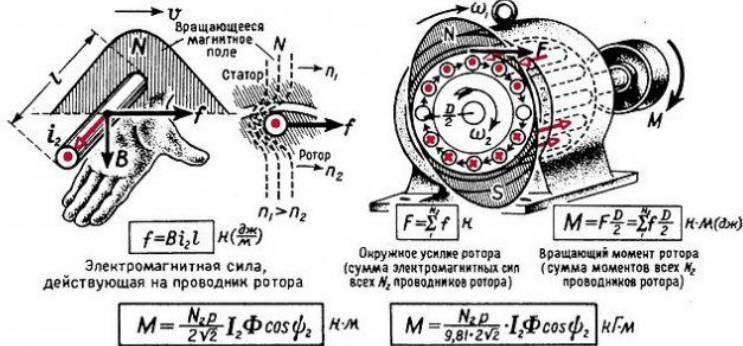
1. Включить масляный выключатель №1.
2. По окончании разбега ротора включить масляный выключатель №2.

Применение индуктивных сопротивлений (реакторов)

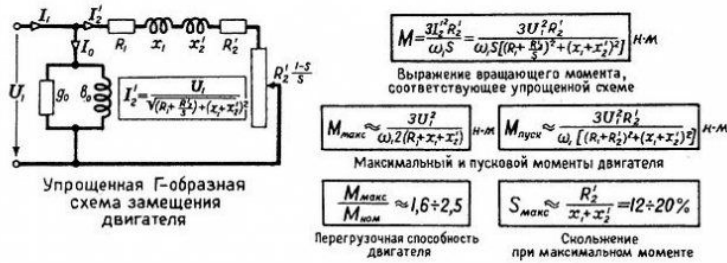
## ПУСК ПРИ ПОНИЖЕННОМ НАПЯЖЕНИИ

(Уменьшение пускового тока снижением напряжения, подводимого к двигателю)

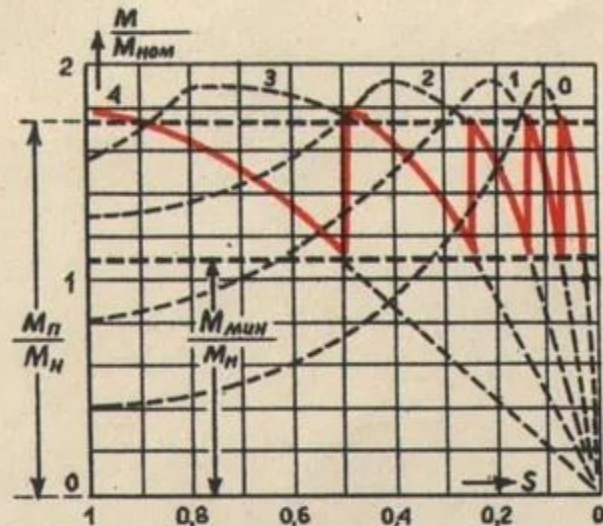
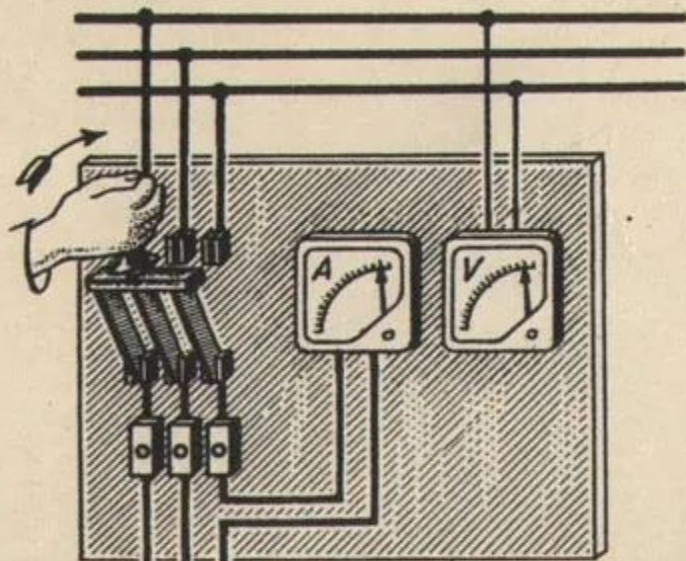
# ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ



## ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ (электромагнитный момент ротора)



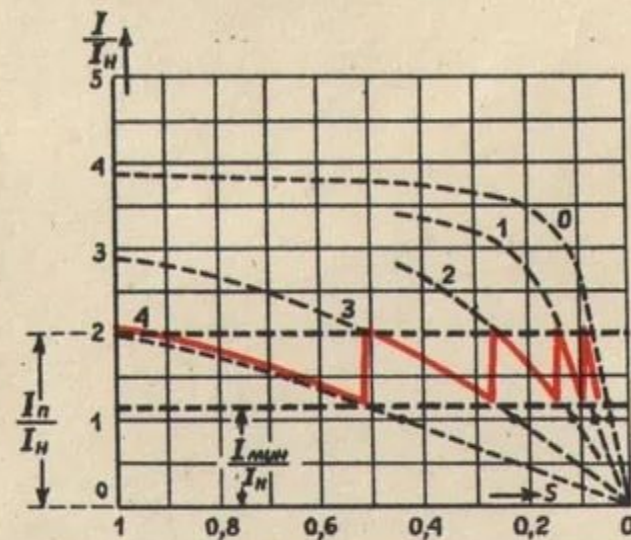




Изменение крутящего момента при разбеге двигателя

$$K_M = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном}}} \approx 1 \div 1,6$$

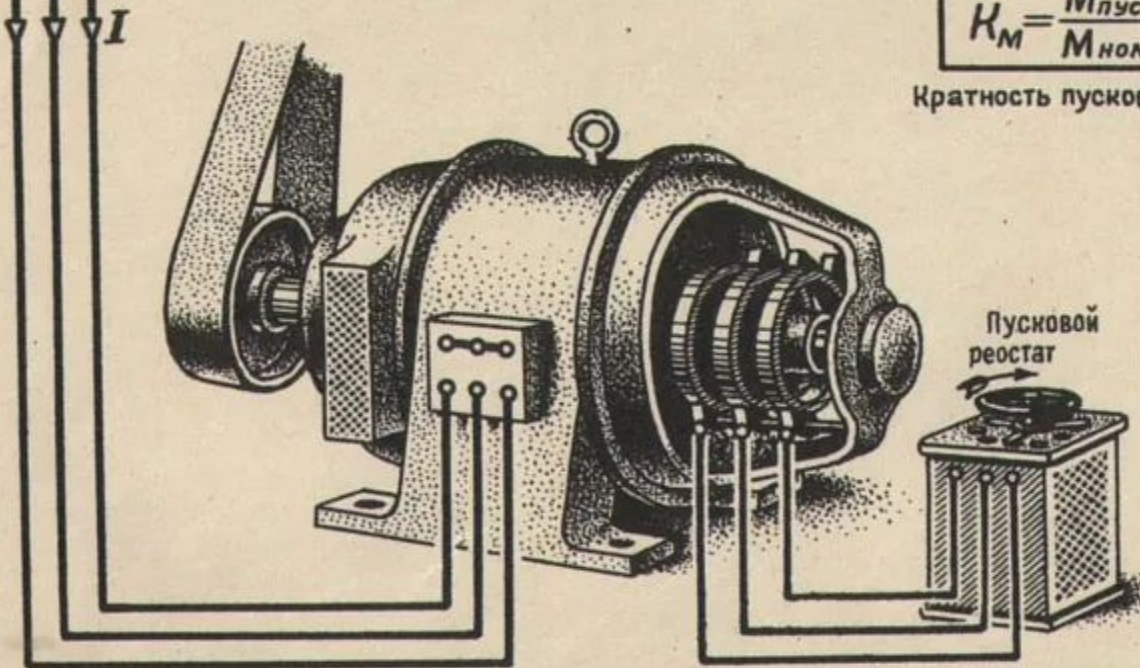
Кратность пускового момента



Изменение тока статора и ротора при разбеге двигателя

$$K_i = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} \approx 1 \div 2$$

Кратность пускового тока



Пуск с помощью реостата

### Порядок пуска :

1. Проверить, наложены ли щетки на кольца.
2. Включить обмотку статора в сеть.
3. Постепенно вывести реостат по мере разбега двигателя.
4. По окончании разбега замкнуть кольца накоротко.
5. Привести реостат в исходное положение, подготовив его к следующему пуску.

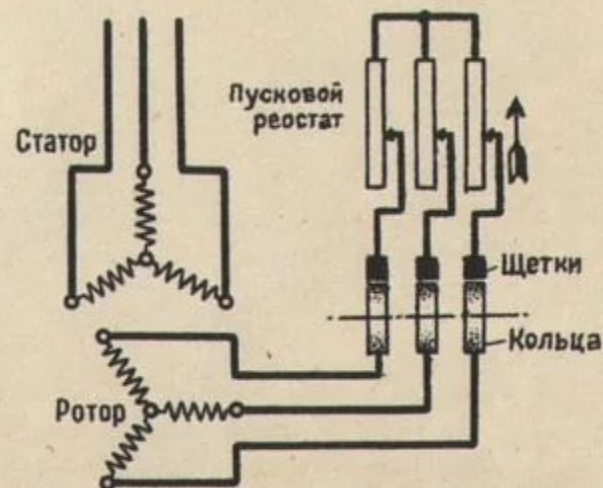
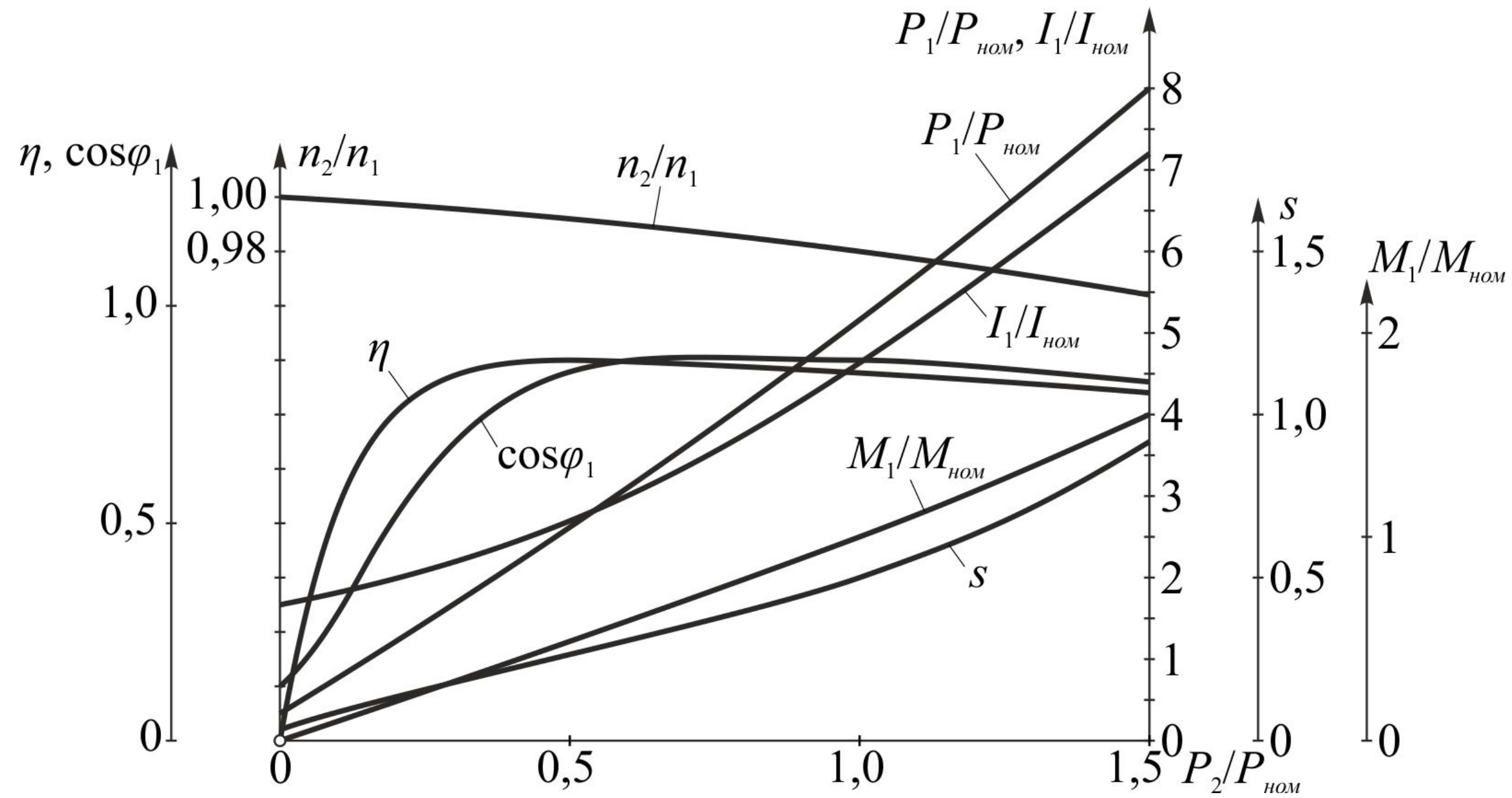
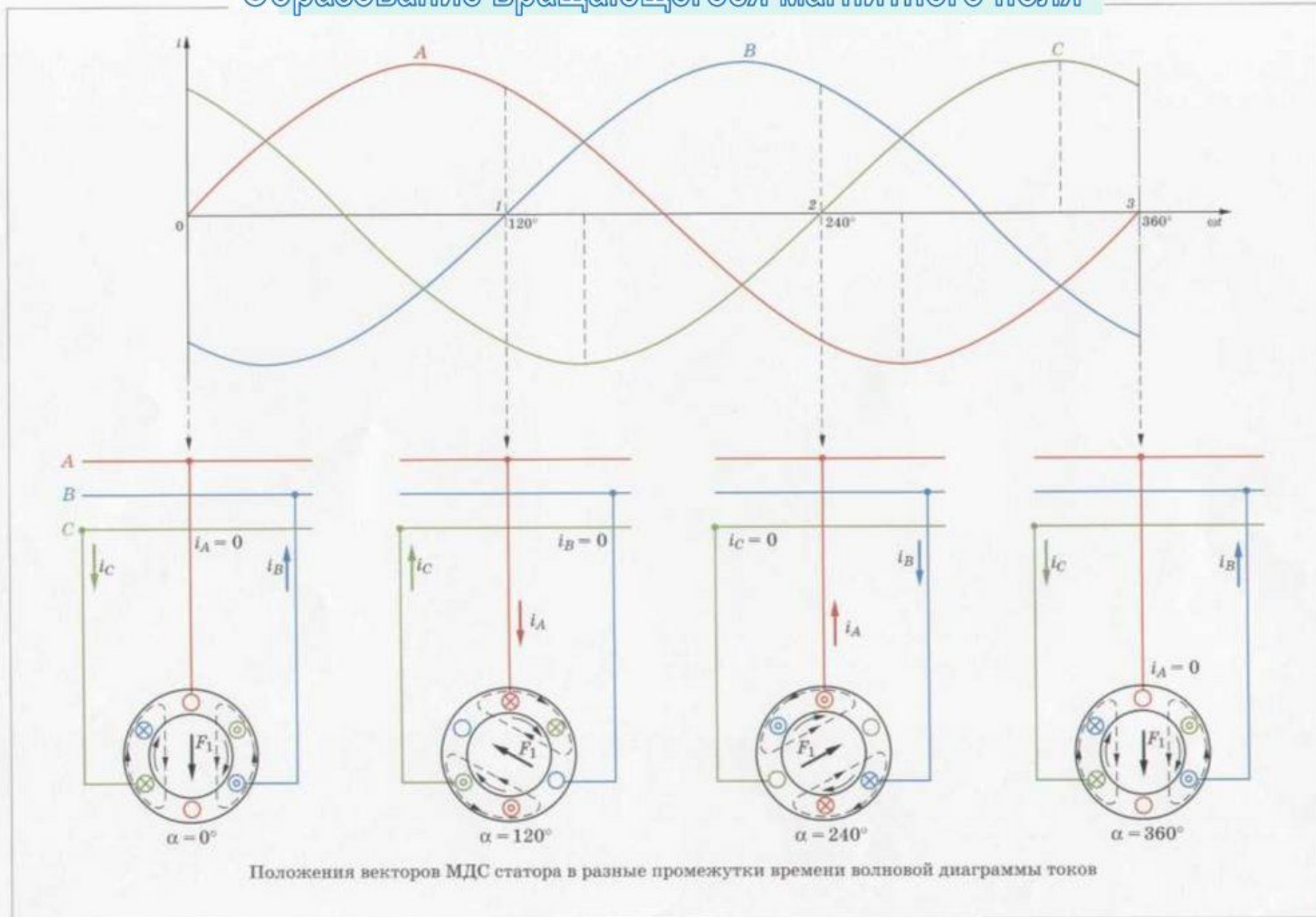


Схема включения пускового реостата



# Образование вращающегося магнитного поля



Положения векторов МДС статора в разные промежутки времени волновой диаграммы токов