АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ (АД)

Номинальные данные АД на табличке корпуса:

1. Номинальная мощность – это номинальная механическая мощность на валу.
2. Линейное напряжение обмотки статора. Обычно в виде дроби: при большем напряжении сети обмотка соединяется по схеме звезда, а при меньшем – по схеме треугольник.
3. Линейные токи также указываются в виде дроби.

4. Частота вращения ротора.
5. Коэффициент мощности.
6. Коэффициент полезного действия

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе. Обмотку статора асинхронного двигателя можно рассматривать как первичную обмотку трансформатора, а обмотку ротора – как вторичную.

АД при заторможенном роторе

Вращающееся магнитное поле статора, пересекая неподвижные обмотки статора и ротора, будет индуктировать в них соответственно ЭДС E_1 и E_2:

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 k_{o1} \Phi_m$$

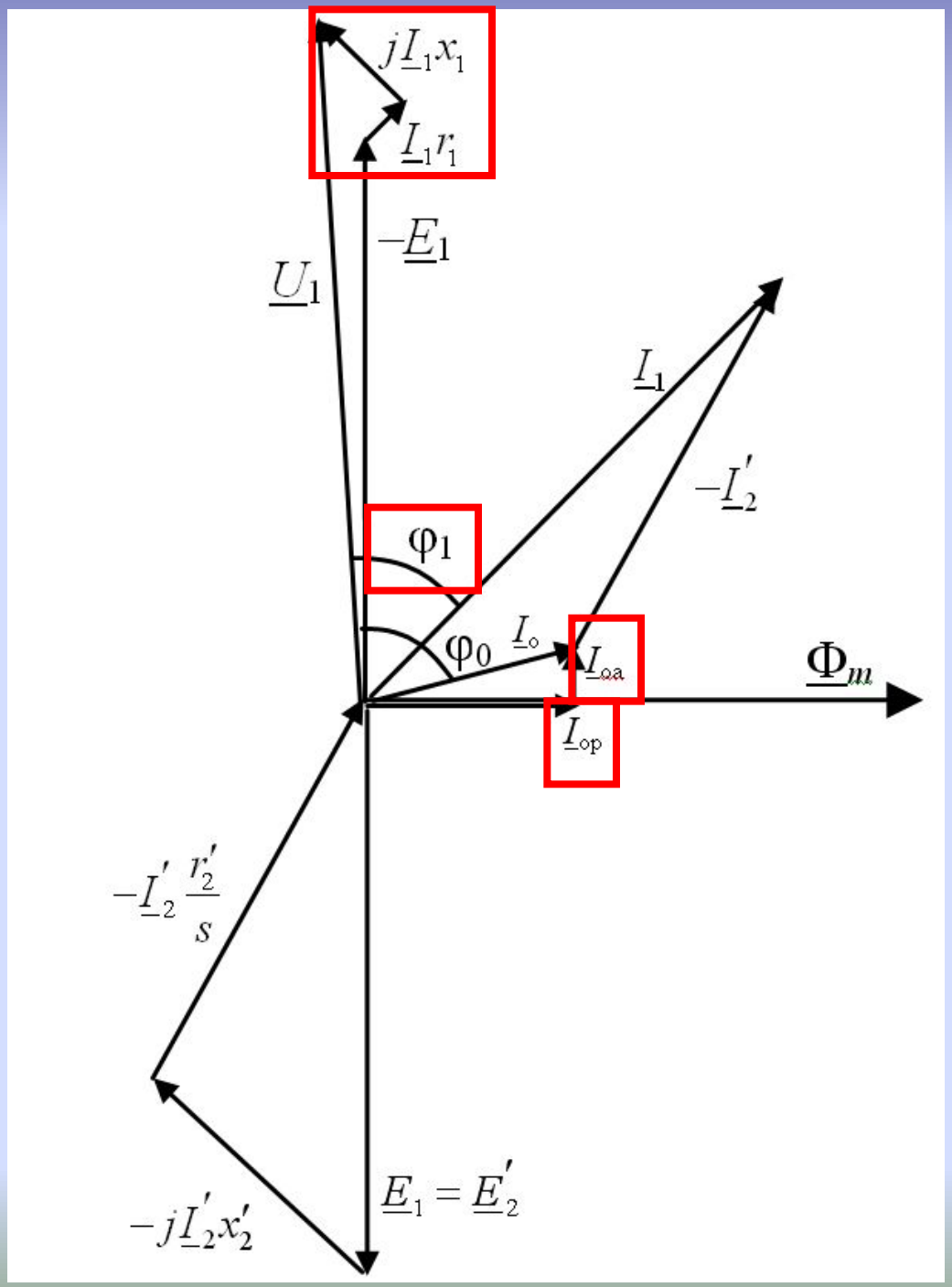
$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 k_{o2} \Phi_m$$

Ток холостого хода I_0 АД из-за наличия воздушного зазора между ротором и статором значительно больше, чем в трансформаторе

(20–40 % от номинального по сравнению с 2–5 % у тр-ра)

Реактивная составляющая тока I_o является намагничивающей, так как она создает поток Ф.

Активная составляющая I_{oa} вызывается магнитными потерями в стали статора, возникающими от потока Ф



Векторная диаграмма АД при нагрузке

Для уменьшения тока холостого хода заводы-изготовители стремятся выполнить в асинхронных двигателях **минимально возможные воздушные зазоры**.

В двигателе мощностью 5 кВт он равен **0,2–0,3** мм.

Асинхронный двигатель при вращающемся роторе:

Вращающийся магнитный поток статора, обгоняя ротор, индуктирует в нем ЭДС и токи с частотой

$$f_{2s} = f_1 s$$

ЭДС фазы вращающегося ротора

$$E_{2s} = E_2 s$$

Индуктивное сопротивление ротора

$$x_{2s} = \left(2\pi f_1 L_2\right) s = x_2 s$$

Ток вращающегося ротора

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}$$

Основные уравнения приведенного АД

Уравнение равновесия напряжений в обмотке статора

$$\underline{U}_1 = \left(-\underline{E}_1\right) + \underline{I}_1 \underline{z}_1$$

Уравнение равновесия напряжений в обмотке ротора

$$\underline{E}_2' - \underline{I}_2' \underline{z}_2' = \underline{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s}$$

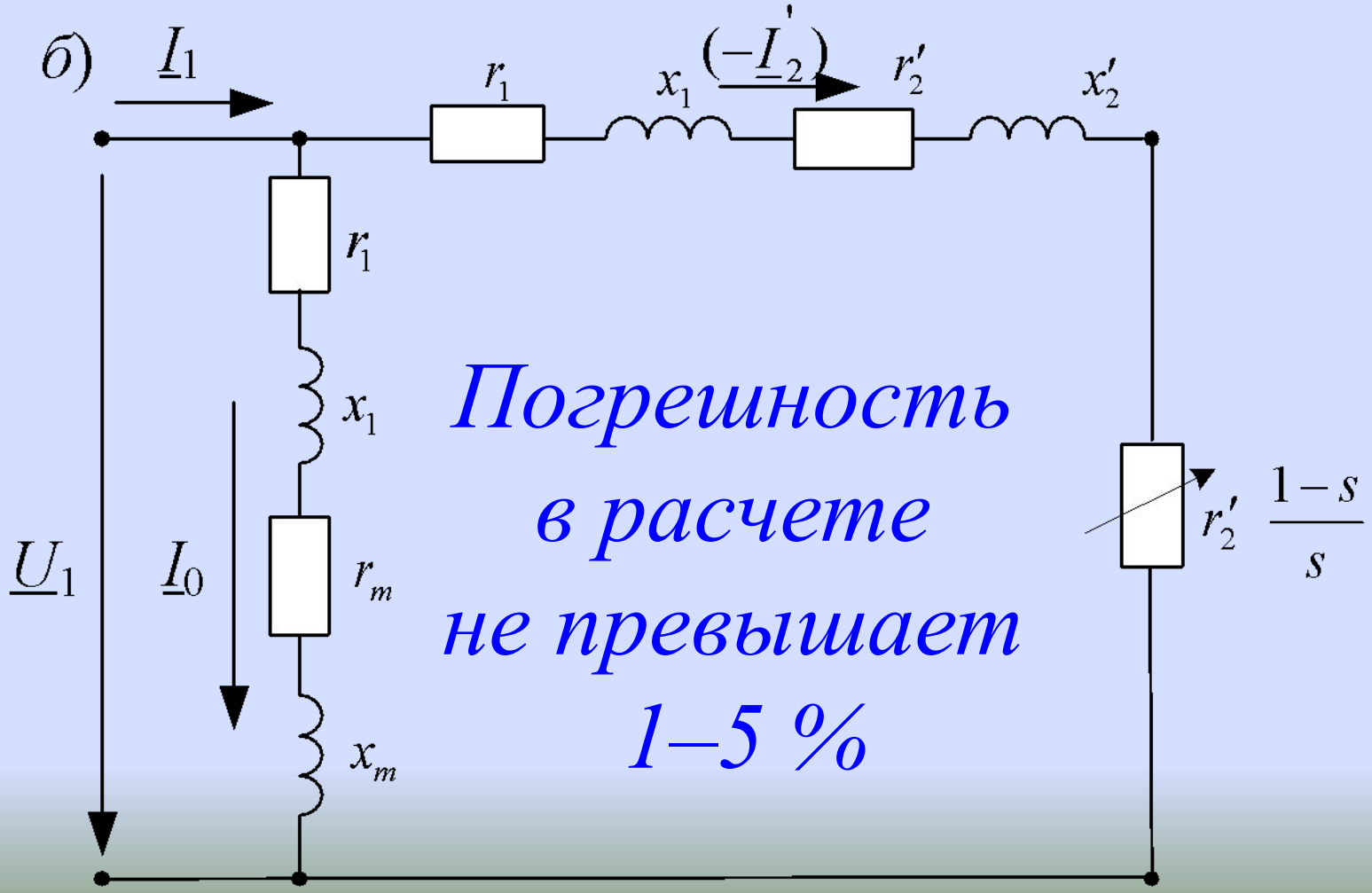
Приведение роторной обмотки осуществляется к числу витков и числу фаз статорной

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \left(-\underline{I}_2'\right)$$

Схемы замещения АД

Для расчета характеристик АД и исследования различных режимов его работы удобно использовать схемы замещения

Большое практическое применение для анализа работы АД находит *Г*-образной схемой замещения



Погрешность в расчете не превышает 1–5 %

Обозначения:

r_1 **и** x_1 **– активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки статора;**

r_2' и x_2' **– приведенные активное и индуктивное сопротивления фазной обмотки ротора.**

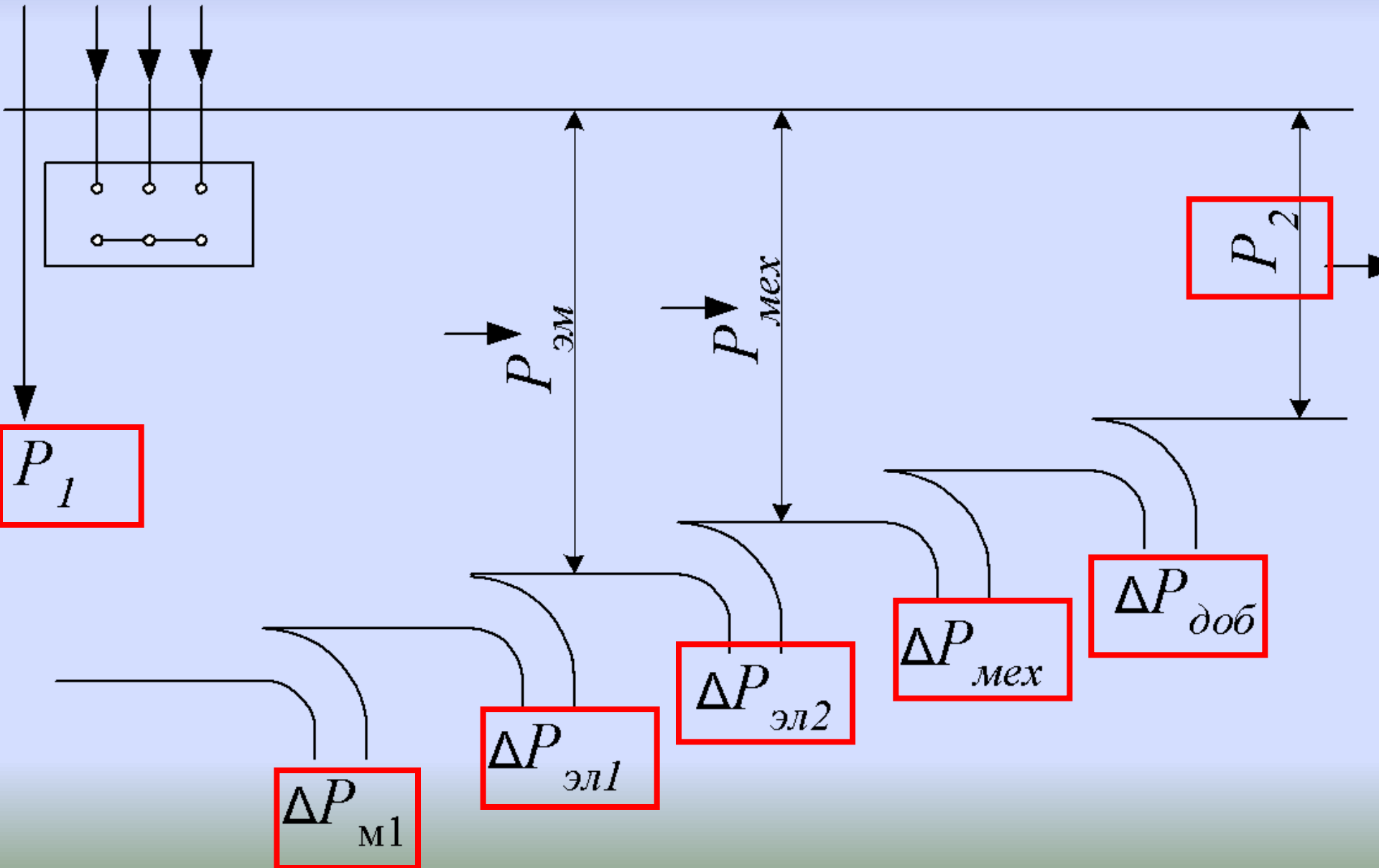
$\underline{z}_m = r_m + jx_m$ – параметры намагничивающей ветви схемы. Индуктивная x_m составляющая является индуктивным сопротивлением **взаимной индукции**. Как и в трансформаторе, сопротивление зависит от подведенного напряжения U_1. С повышением U_1 **сопротивление уменьшается**.

Сопротивление $\frac{r_2' \frac{1-s}{s}}{}$ **зависит от скольжения, и мощность, выделяемая в нем, численно равна механической мощности двигателя** $P_{мех}$. ***Следовательно, сопротивление в схеме замещения выполняет роль нагрузки двигателя.***

Из *Г*-образной схемы замещения приведенный ток роторной обмотки

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + r_2'/s\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}}$$

Энергетическая диаграмма АД



К АД из сети подводится активная мощность

$$P_{1л} = \sqrt{3}\, U_{11л}\, I \cos\varphi$$

Часть этой мощности затрачивается на магнитные потери в стали $\Delta P_{м1}$ и электрические потери в обмотке статора $\Delta P_{эл1}$

$$\Delta P_{ЭЛ1} = I_{1ф}^2\, r_1$$

Остальная мощность электромагнитным путем передается на ротор и называется электромагнитной мощностью

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{м1} - \Delta P_{эл1}$$

Частично $P_{эм}$ расходуется на потери в обмотке ротора $\Delta P_{эл2}$

$$\Delta P_{эл2} = 3 I'^{2}_{2Ф} \, r'_2$$

Магнитные потери в роторе из-за малой частоты перемагничивания стали (0,5...2) Гц малы, и поэтому их **не учитывают**.

$P_{мех}=P_{эм}-\Delta P_{эл2}$ – **полная** мех. мощность

Полезная механическая мощность P_2, **снимаемая с вала двигателя**, меньше $P_{мех}$ на значение механических потерь $\Delta P_{мех}$ **на трение в подшипниках, вентиляцию** и добавочных потерь $\Delta P_{доб}$

Добавочные потери $\Delta P_{доб}$ связаны с **высшими гармониками МДС в магнитном поле** из-за зубчатого строения статора и ротора. $\Delta P_{доб}$ трудно поддаются определению и принимаются равными **0,5% подводимой мощности.** При других нагрузках **пропорциональны квадрату тока статора**.

КПД асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2 / P_1,$$

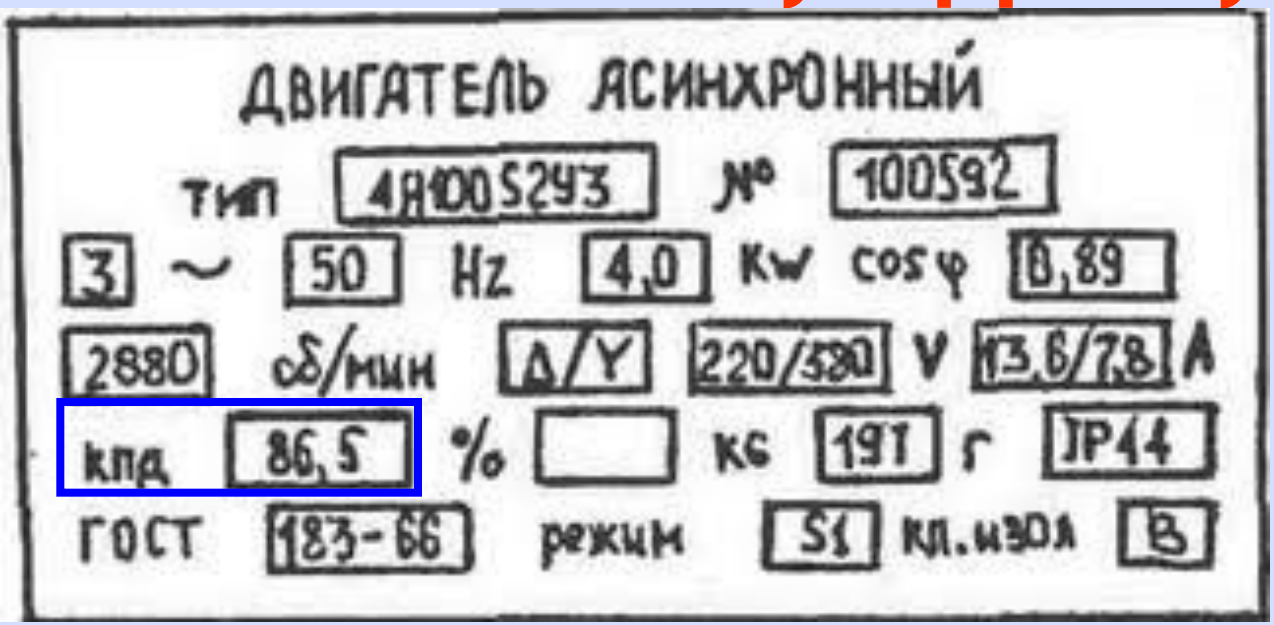
или

$$= \frac{P_1 - \Sigma\Delta P}{P_1}$$

где

$$\Sigma\Delta P = \Delta P_{м1} + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}$$

КПД асинхронных двигателей достаточно высокий – от 0,7 до 0,95,



причем КПД увеличивается с повышением мощности двигателя и с увеличением его частоты вращения

КПД асинхронного двигателя:

$$\eta = P_2 / P_1,$$

или

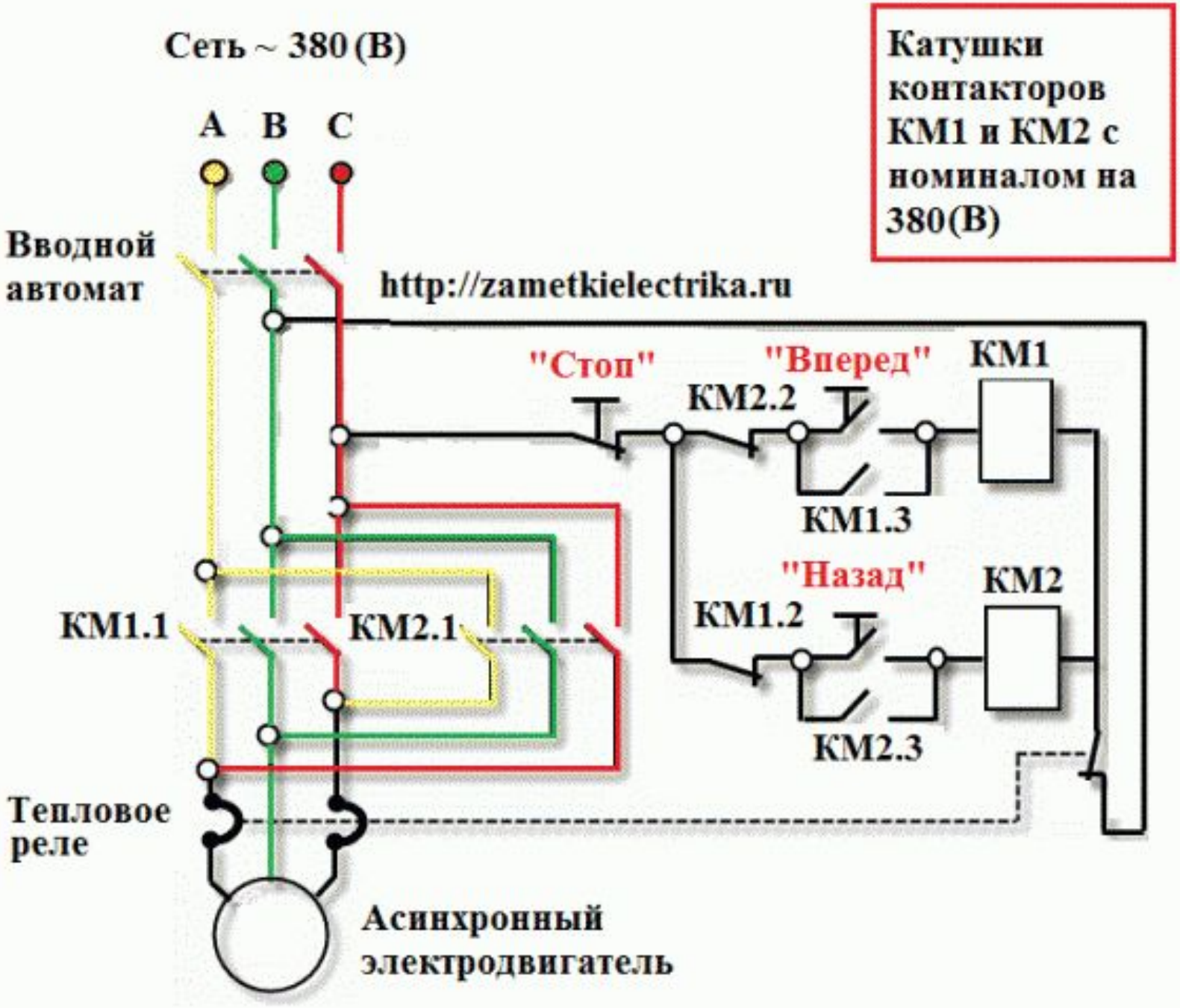
$$= \frac{P_1 - \Sigma\Delta P}{P_1}$$

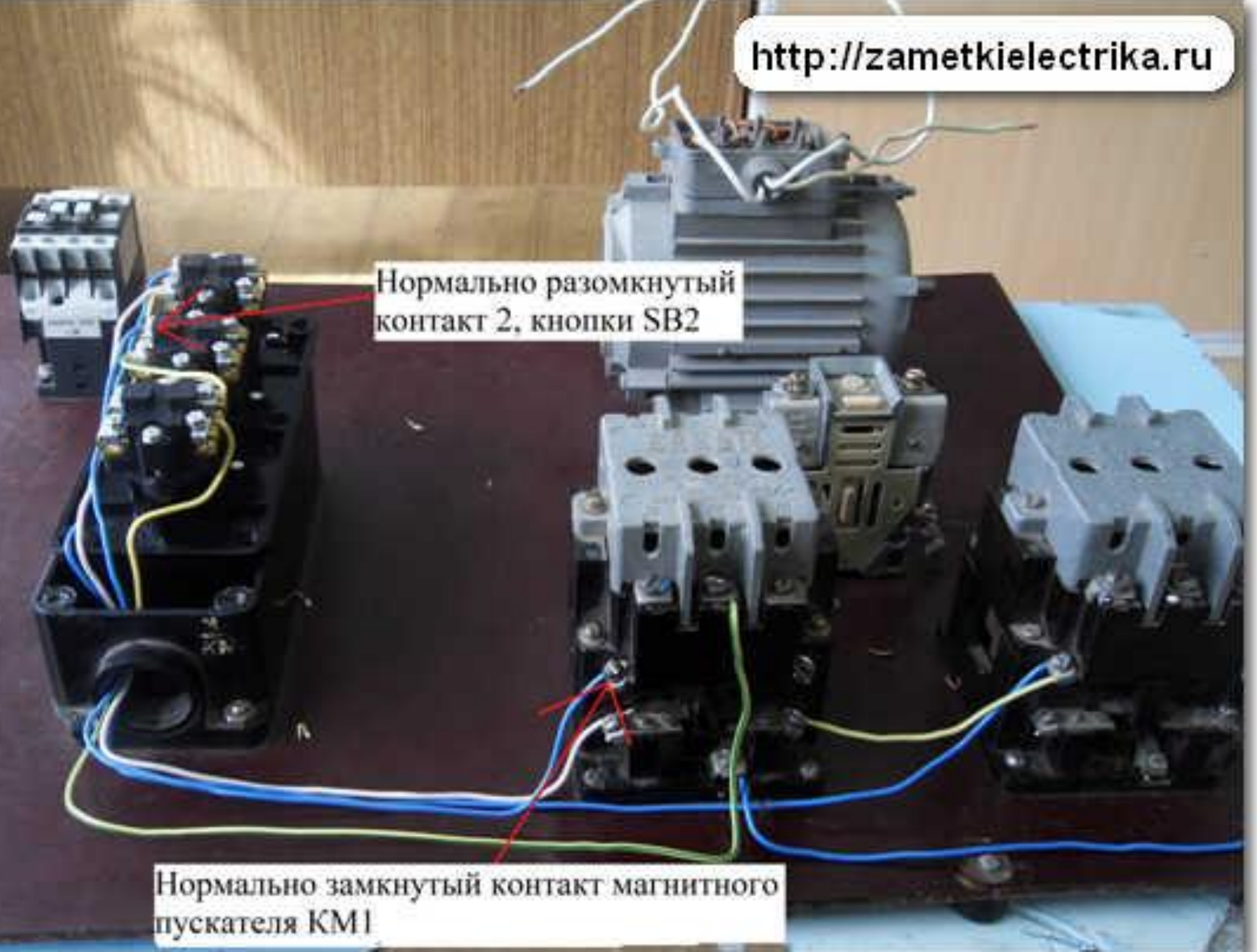
где

$$\Sigma\Delta P = \Delta P_{м1} + \Delta P_{эл1} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{мех} + \Delta P_{доб}$$

Реверс

Реверс – это изменение направления вращения ротора. Необходимо изменить направление вращения магнитного поля статора, что в достигается переменой мест двух любых проводов на клеммах трехфазной сети.


Сеть ~ 380 (В)
Катушки контакторов КМ1 и КМ2 с номиналом на 380(В)
A
B
C
Вводной автомат
http://zametkielectrika.ru
"Стоп"
"Вперед"
КМ1
КМ2.2
КМ1.3
"Назад"
КМ2
КМ1.2
КМ1.1
КМ2.1
КМ2.3
Тепловое реле
Асинхронный электродвигатель


http://zametkielectrika.ru
Нормально разомкнутый контакт 2, кнопки SB2
Нормально замкнутый контакт магнитного пускателя КМ1

http://zametkielectrika.ru

Рассчитать механическую характеристику можно по паспортным данным АД с помощью формул М. Клосса:

$$M = \frac{2M_{\text{макс}}}{\dfrac{s}{s_{\text{кр}}} + \dfrac{s_{\text{кр}}}{s}},$$

$$n_2 = n_1\left(1 - s\right).$$

Пусковые свойства двигателя характеризуются кратностью пускового момента

$$k_{\text{п}} = M_{\text{п}} / M_{\text{н}}, \quad k_{\text{п}} = 0,9...1,5.$$

Перегрузочная способность двигателя оценивается кратностью максимального момента

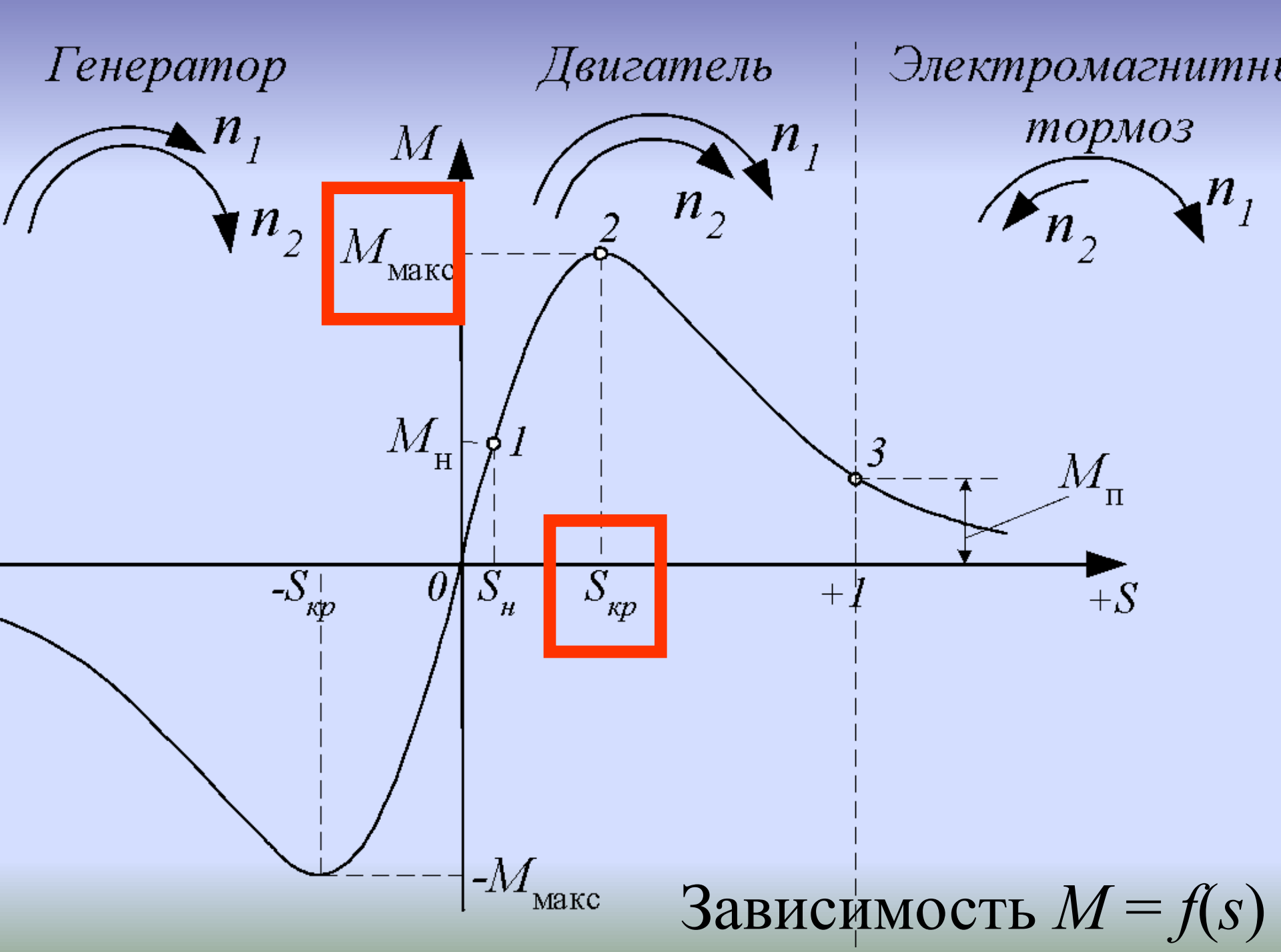
$$k_{\text{м}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}, \qquad k_{\text{м}} = 1,7...3,4$$

Критическое скольжение

$$при \quad s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}$$

Максимальный момент

$$M_{макс} = \pm \frac{3\,U_1^2}{2\omega_1 \left(x_1 + x_2'\right)}$$



Зависимость $M = f(s)$

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{3\,U_1^2}{2\omega_1\left(x_1 + x_2'\right)}$$

Максимальный момент не зависит от активного сопротивления обмотки ротора , однако это сопротивление оказывает влияние на скольжение $s_{\text{кр}}$

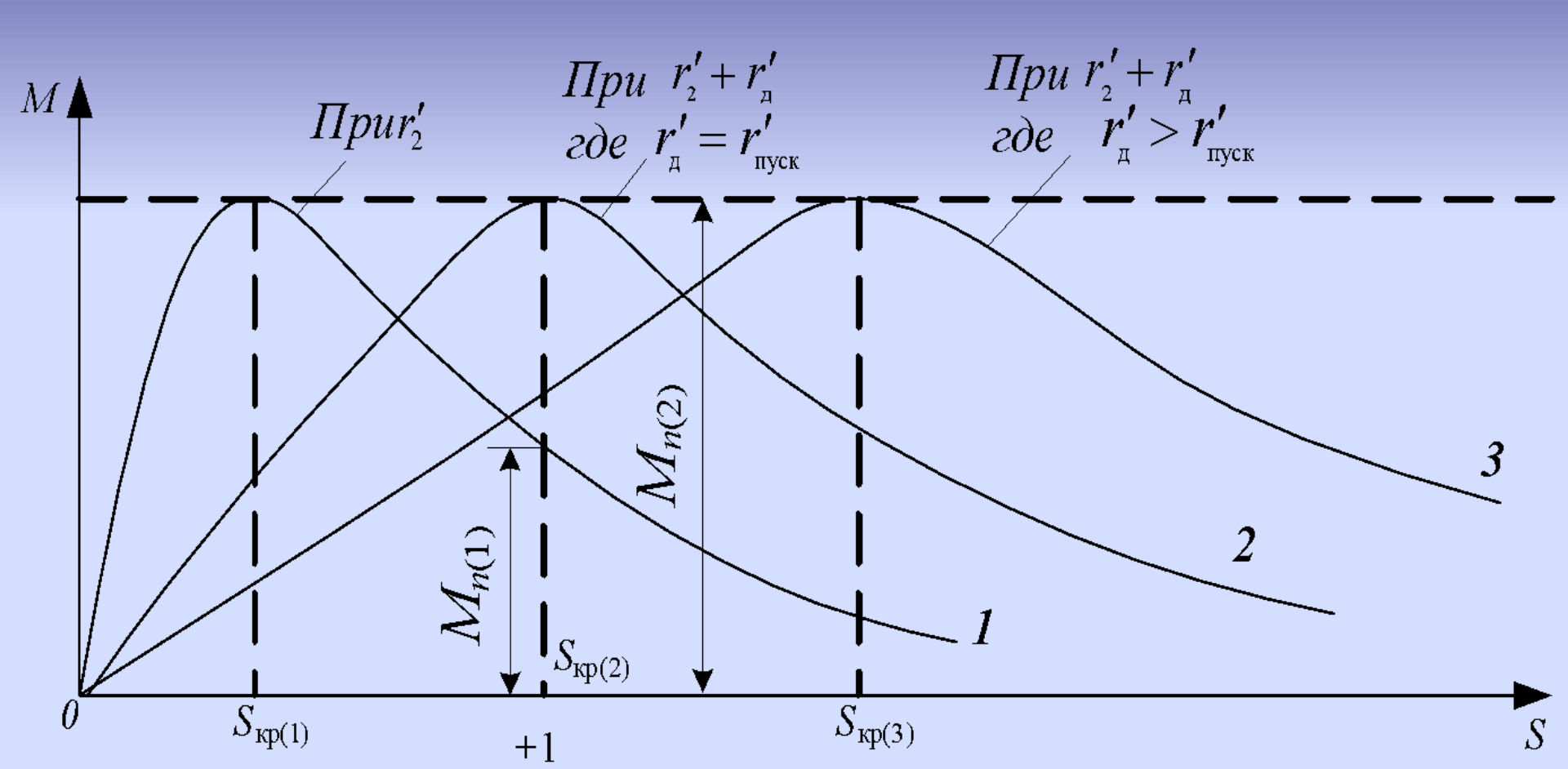
r_2'

$$s_{\text{кр}} = \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'}$$

Для двигателей с фазным ротором при пуске ($s = 1$) в цепь ротора включается пусковой реостат, чтобы двигатель развивал пусковой момент, равный максимальному.

$$s_{кр} = \frac{r'_{пуск} + r'_2}{x_1 + x'_2} = 1,$$

$$r'_{пуск} = x_1 + x'_2 - r'_2,$$



Зависимости *M* = *f*(*s*) при различных значениях сопротивления пускового реостата

Зависимость $M \equiv U_1^2$ является недостатком АД.

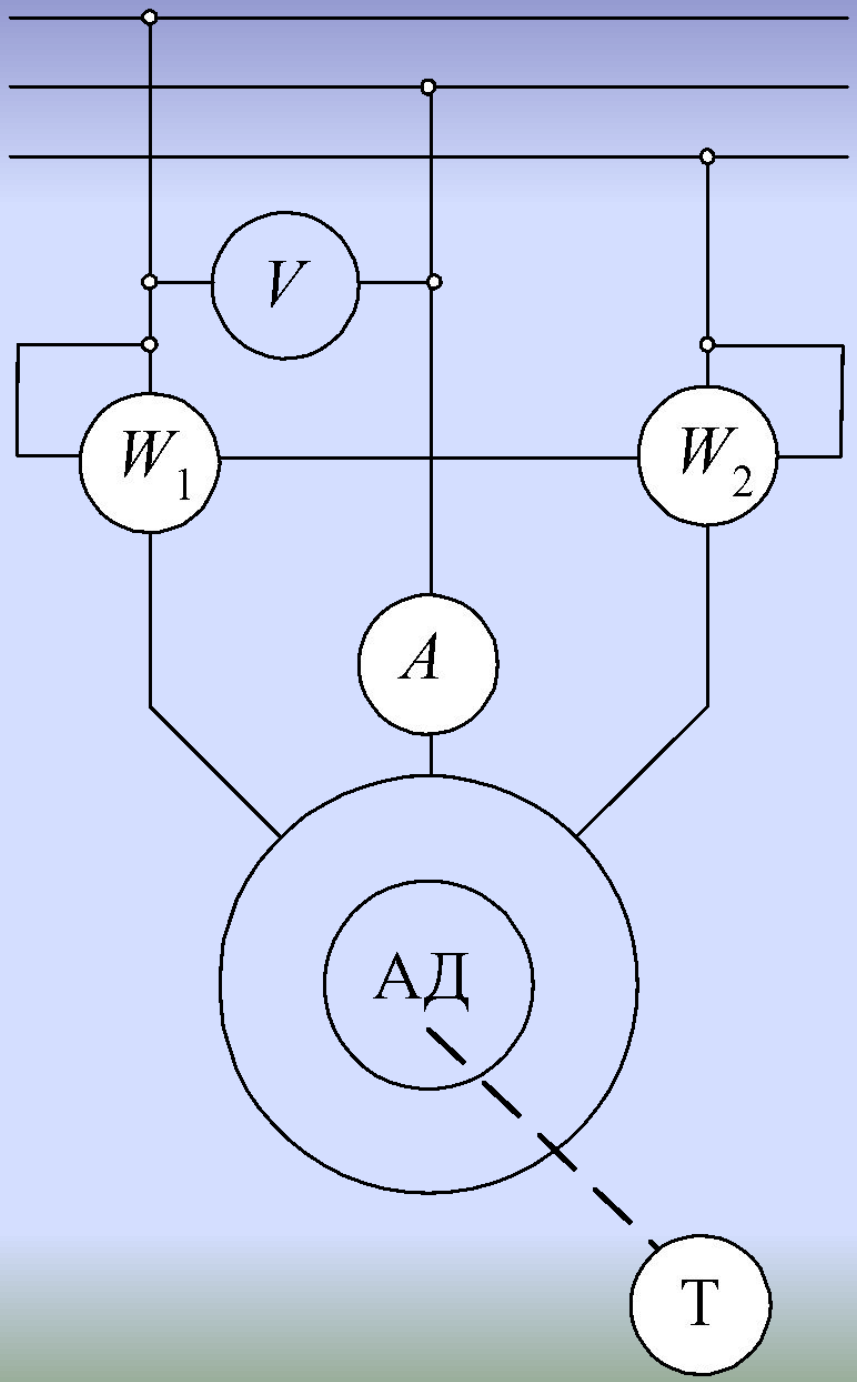
Например, если U_1 понизится на 25%, т. е. $U_1 = 0{,}75U_{1н}$, то при этом кратность максимального момента составит $0{,}752 \approx 0{,}56$, частота вращения уменьшается до тех пор, пока $M < M_C$

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

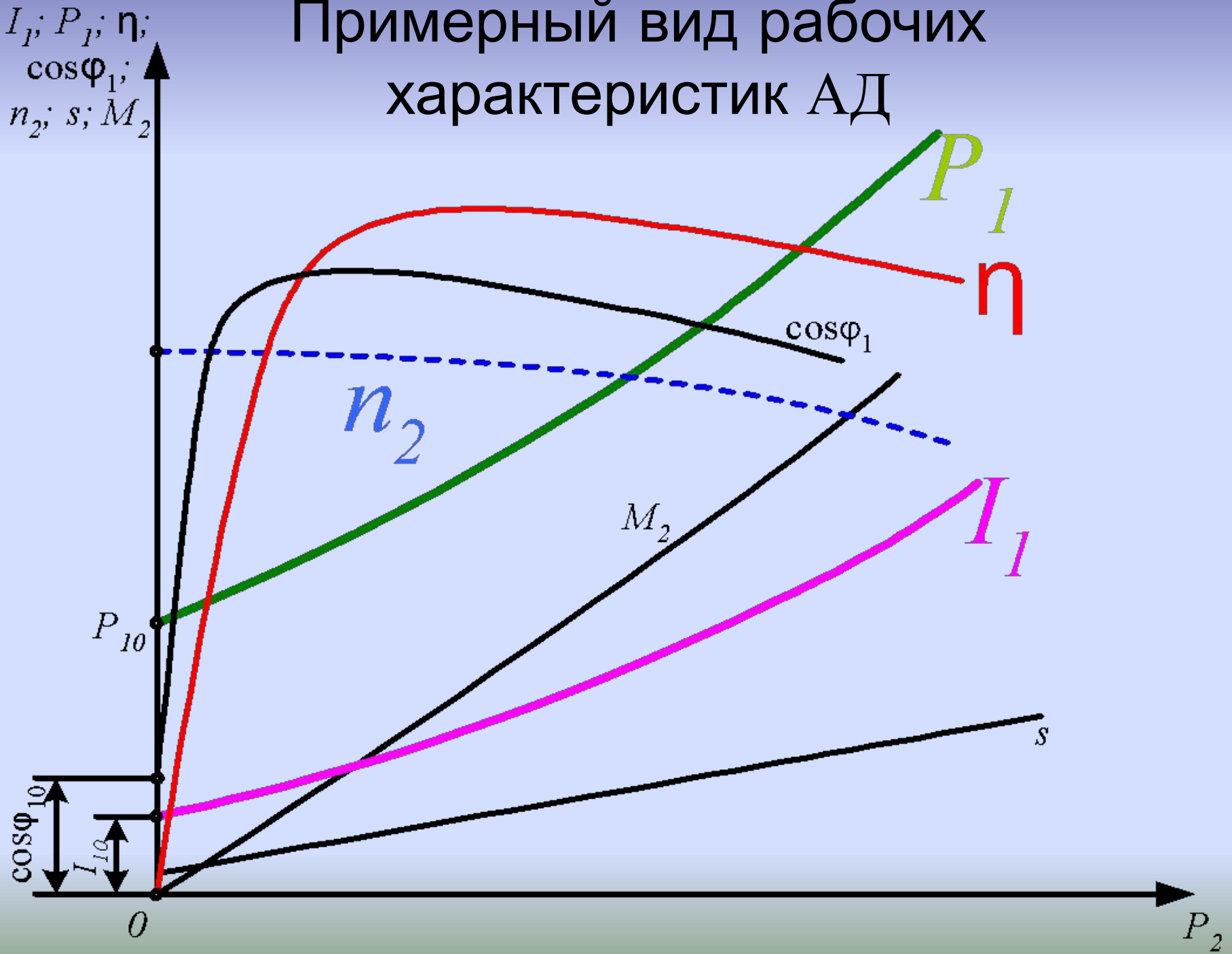
При изменении нагрузки двигателя происходит изменение тока I_1, мощности P_1, частоты вращения ротора n_2, скольжения s, КПД η и $\cos\varphi_1$.

Схема для определения характеристик АД

Метод непосредствен-ной нагрузки



Примерный вид рабочих характеристик АД



При холостом ходе (P_2=0 и M_2=0) ток I_1 равен току холостого хода I_0. Как и в трансформаторе, этот ток является намагничивающим и создает основное магнитное поле.

Однако из-за наличия воздушного зазора между статором и ротором он значительно больше, чем у трансформатора, и составляет 20–50 % номинального тока статора.

Мощность P_{10} при холостом ходе расходуется на потери внутри машины:

-механические потери $\Delta P_{мех}$,

-магнитные потери в стали статора $\Delta P_{м1}$,

-электрические потери в обмотке статора от тока I_0.

Увеличение момента M_2 сопровождается увеличением тока ротора I_2, что связано с увеличением ЭДС E_{2S} вследствие снижения частоты вращения n_2 и увеличения s.

У большинства АД изменение n_2 незначительно и хар-ка $n_2=f(P_2)$ является жесткой

Пуск в ход АД

$$n=0$$

$$U_1 = c_e n \Phi \left(- I_E \boxed{} z \right) + \quad -1 - 1$$

В момент пуска ротор неподвижен и в роторе индуктируется большая ЭДС, следовательно, протекает большой роторный ток.

При пуске должны удовлетворяться требования:

- пуск должен быть простым;
- пусковой момент должен быть достаточно большим;
- пусковые токи – малыми.

Практически используют следующие способы пуска:

1. Включение обмотки статора в сеть (прямой пуск);

2. Понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;

3. Подключение к обмотке ротора пускового реостата, *только для фазного ротора*.

1. Прямой пуск

Применяют для пуска АД с короткозамкнутым ротором. Если $M_П < M_С$, то двигатель разогнаться не сможет. Недостаток прямого пуска- большой ток, применяется для малых и средних мощностей.

Пусковой момент

$$M_{п} = \frac{3\,U_1^2 r_2'}{\omega_1\left[\left(r_1 + r_2'\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2\right]}.$$

Для АД с короткозамкнутым ротором мощностью

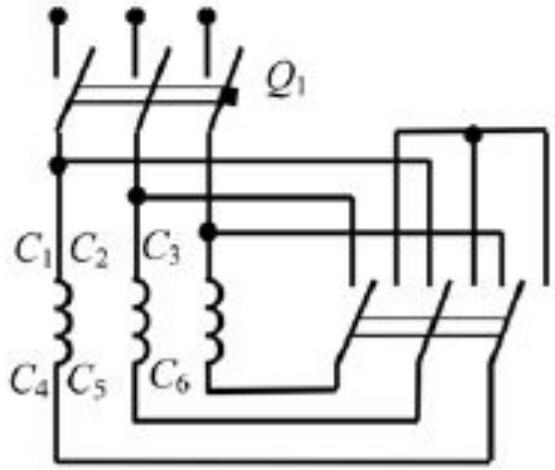
0,6–100 кВт: $k_{п} = M_{п}/M_{н} = 1{,}0...2{,}0$;

100–1000 кВт: $k_{п} = 0{,}7...1{,}0$.

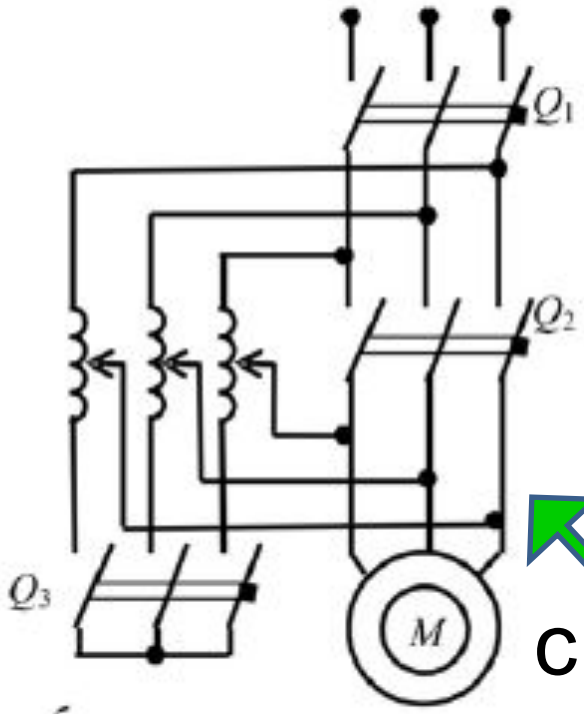
***Пуск при пониженном напряжении*. Для АД с КЗР большой мощности. Понижение напряжения выполняют путем переключения обмотки статора при пуске с рабочей схемы Δ на пусковую схему Y**

Применяется только в случае, если обмотка статора двигателя нормально соединена по схеме треугольник

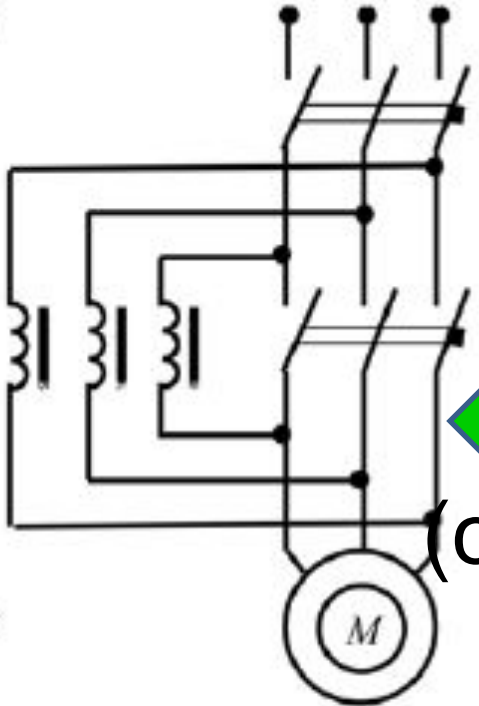
Пуск при пониженном напряжении. Для АД с КЗР



а



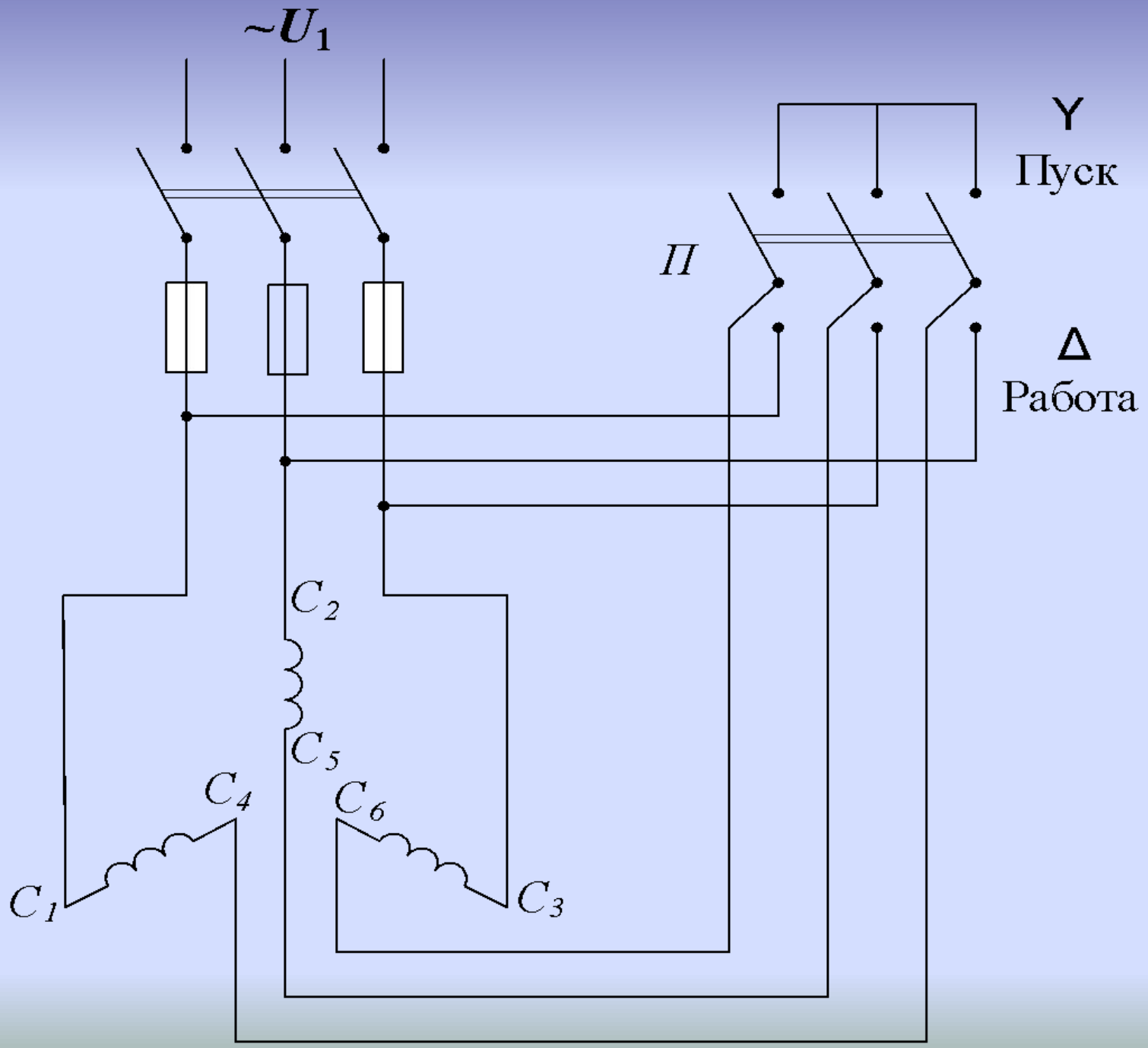
б



в

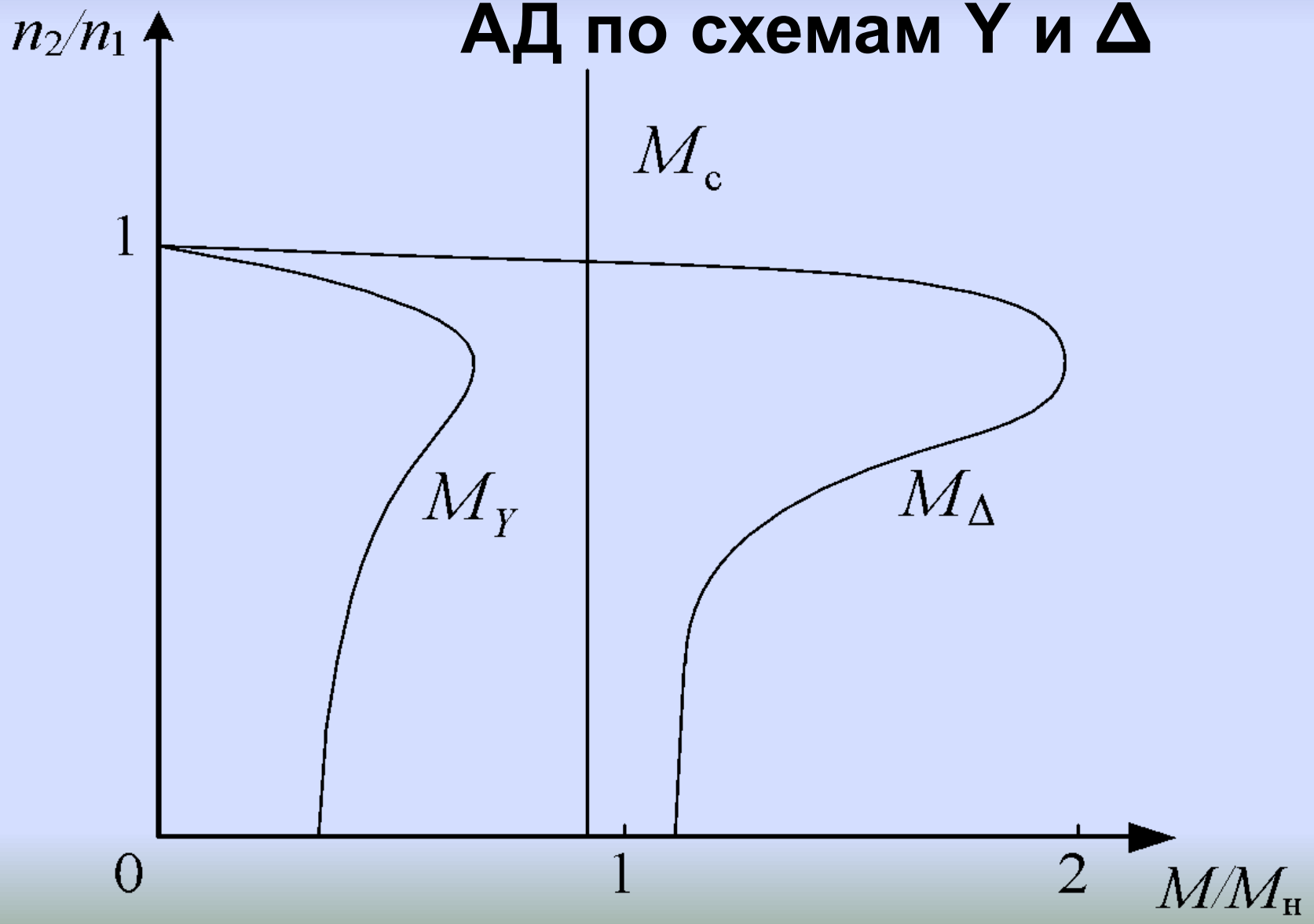
с помощью реактора (снижение момента в квадрате)

с помощью автотрансфор-матора (дороже)


~U1
Y
Пуск
П
Δ
Работа
C2
C5
C4
C6
C1
C3

При включении обмотки статора по схеме Y линейные токи уменьшаются в 3 раза по сравнению с пуском по схеме Δ. По окончанию процесса пуска и разгона двигателя обмотку статора переключают обратно на схему Δ.

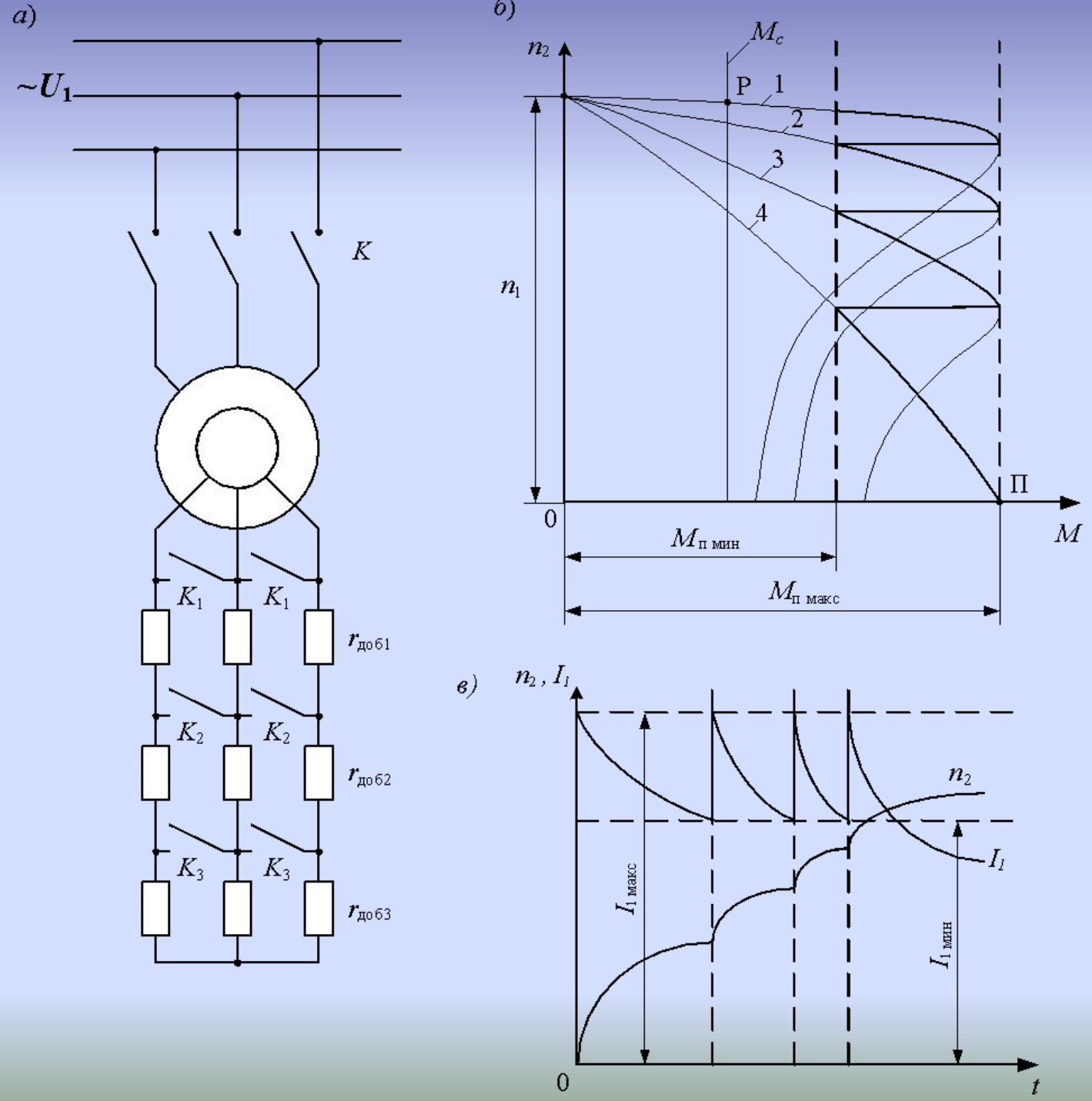
Механические характеристики при включении обмотки статора АД по схемам Y и Δ



Недостаток: пусковой и вращающий моменты двигателя, пропорциональные квадрату напряжения сети, уменьшаются в 3 раза.

***Пуск с помощью реостата в цепи ротора*. Применяют только для пуска АД с фазным ротором.**

Пусковой реостат имеет три – шесть ступеней, для плавного уменьшения пускового тока и высокого момента в период разгона двигателя

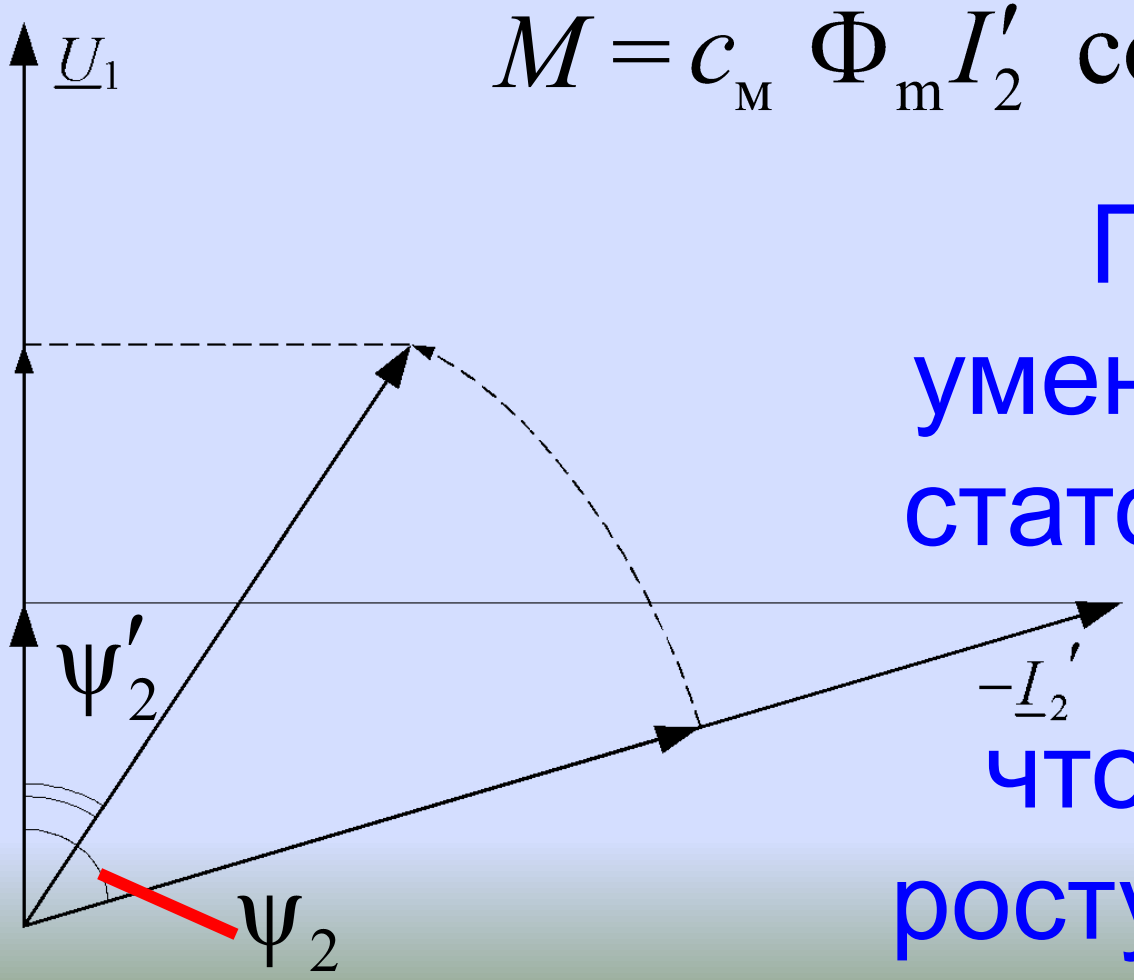

а)
~U1
K
K1
K1
rдоб1
K2
K2
rдоб2
K3
K3
rдоб3
б)
n2
Mc
P
1
2
3
4
n1
П
0
M
Mп мин
Mп макс
в)
n2 , I1
n2
I1
I1 макс
I1 мин
0
t

Включение сопротивления уменьшает пусковой ток двигателя

$$I_2' = U_1 \Big/ \sqrt{\left(r_1 + r_2' + r'_{\text{пуск}}\right)^2 + \left(x_1 + x_2'\right)^2}$$

Увеличение $M_п$ за счет включения пускового реостата в цепь ротора при пуске двигателя может быть объяснено рисунком

$$M = c_м \Phi_m I_2' \cos\psi_2$$



При пуске уменьшается ток статора и угол ψ_2, что приводит к росту момента *M*.

Недостаток пуска АД с фазным ротором – сложность.

Кроме того, АД с ФР имеют худшие рабочие характеристики, чем АД с КЗР (кривые η и $\cos\varphi_2$ ниже)

Недостаток пуска АД с фазным ротором – сложность.

Кроме того, АД с ФР имеют худшие рабочие характеристики, чем АД с КЗР (кривые η и $\cos\varphi_2$ ниже)

Регулирование частоты вращения АД

Из формулы $$n_2 = \frac{60 f_1}{p}(1 - s)$$

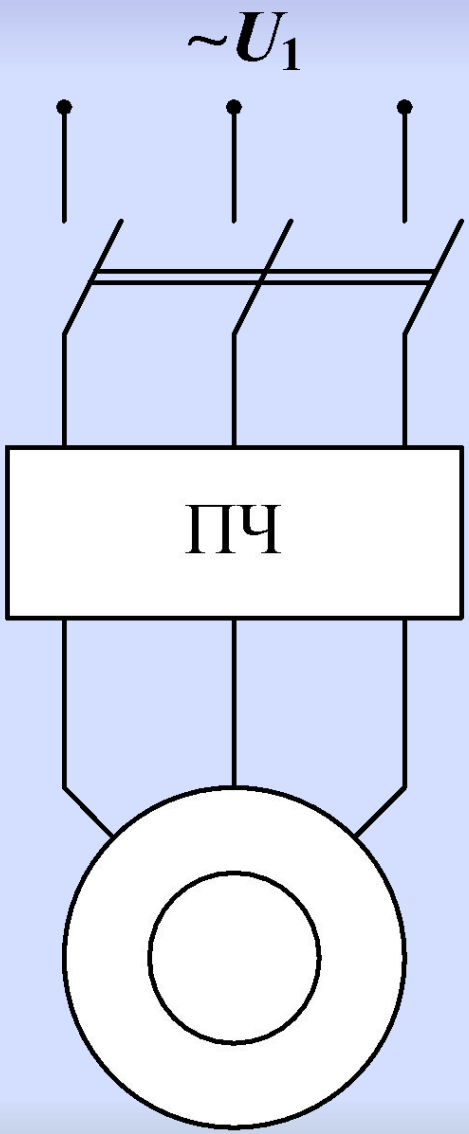
следует, что частоту вращения можно регулировать изменяя :

1.- частоту f_1 напряжения,

2.- число пар полюсов p;

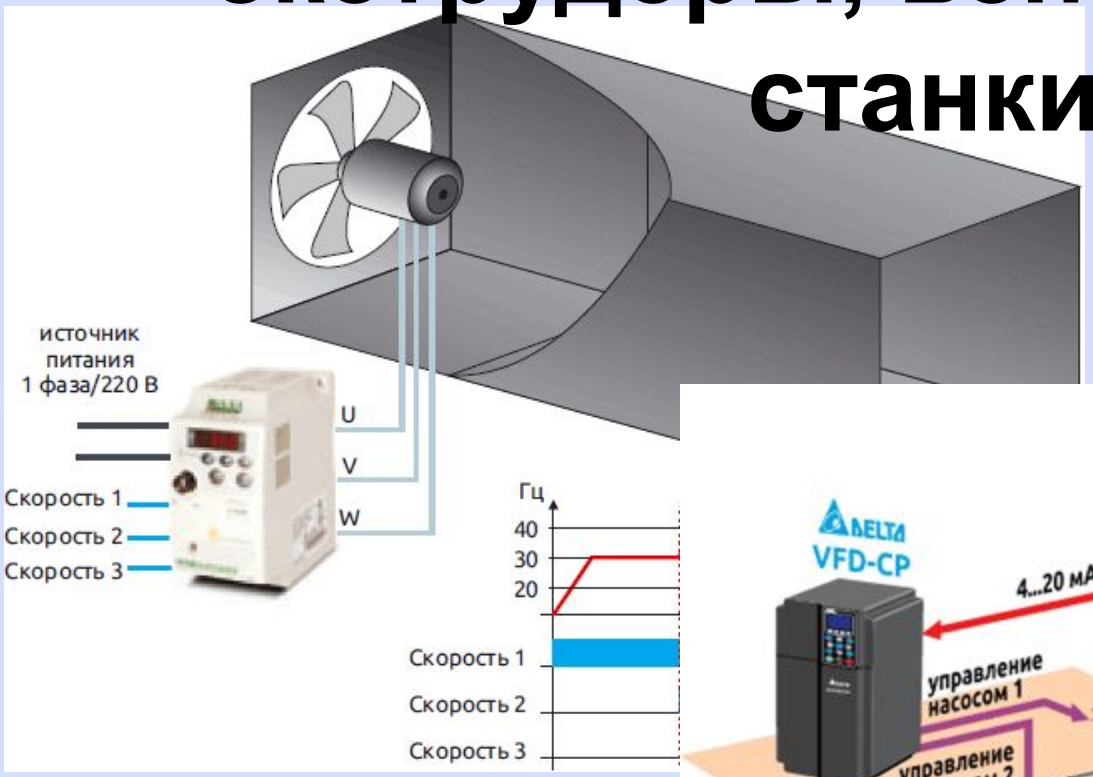
3.- величину скольжения s.

Частотное регулирование



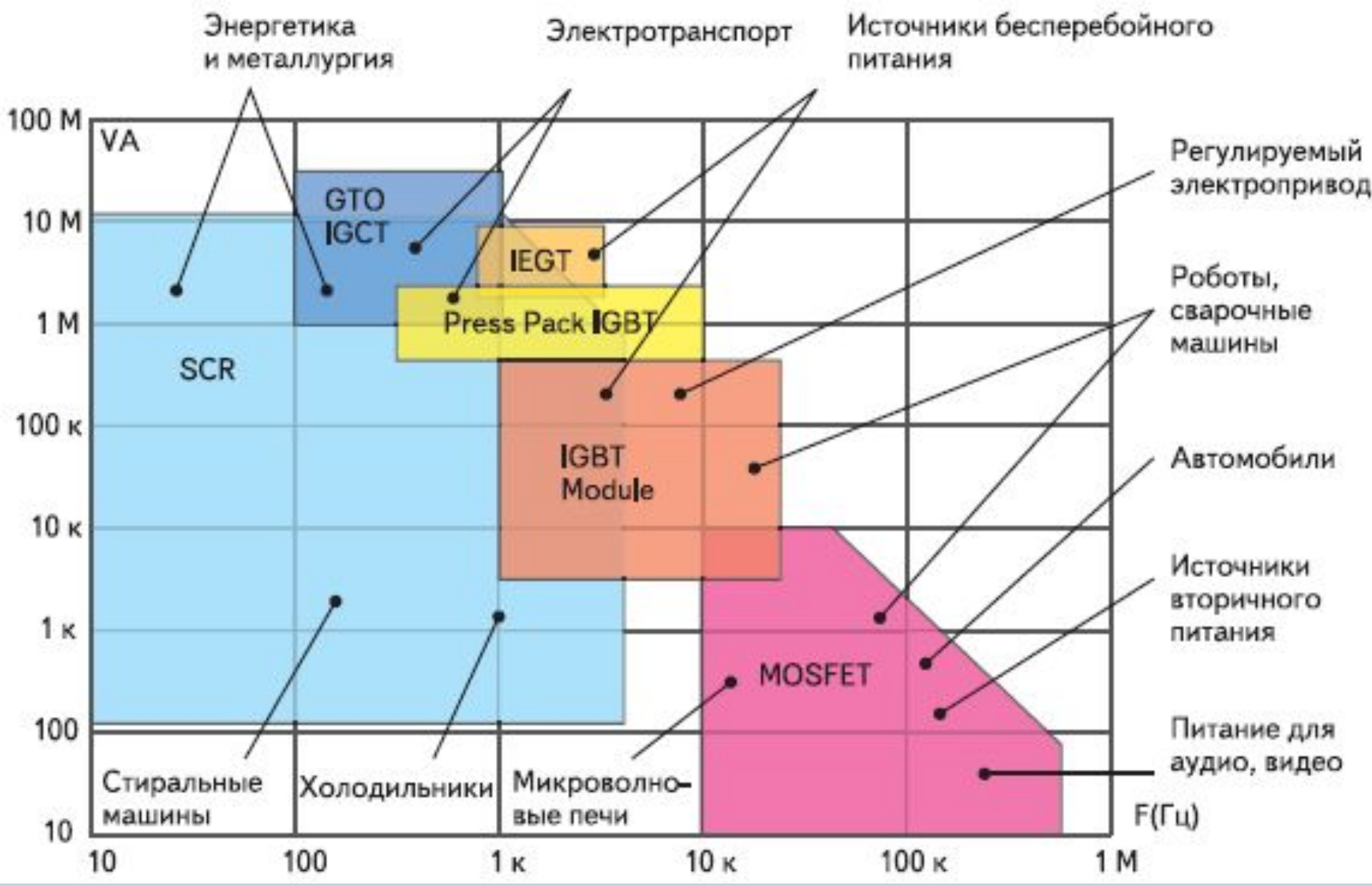
В качестве источника изменения частоты применяются полупроводниковые преобразователи частоты

Область применения: насосы, лифты , компрессоры, экструдеры, вентиляторы, станки



1-2,5 кВт
180-200 $

изменением частоты f_1 питающего напряжения!!!


Энергетика
и металлургия
Электротранспорт
Источники бесперебойного
питания
100 М
10 М
1 М
100 к
10 к
1 к
100
10
VA
GTO
IGCT
IEGT
Press Pack IGBT
SCR
IGBT
Module
MOSFET
Регулируемый
электропривод
Роботы,
сварочные
машины
Автомобили
Источники
вторичного
питания
Питание для
аудио, видео
Стиральные
машины
Холодильники
Микроволно-
вые печи
F(Гц)
10
100
1 к
10 к
100 к
1 М

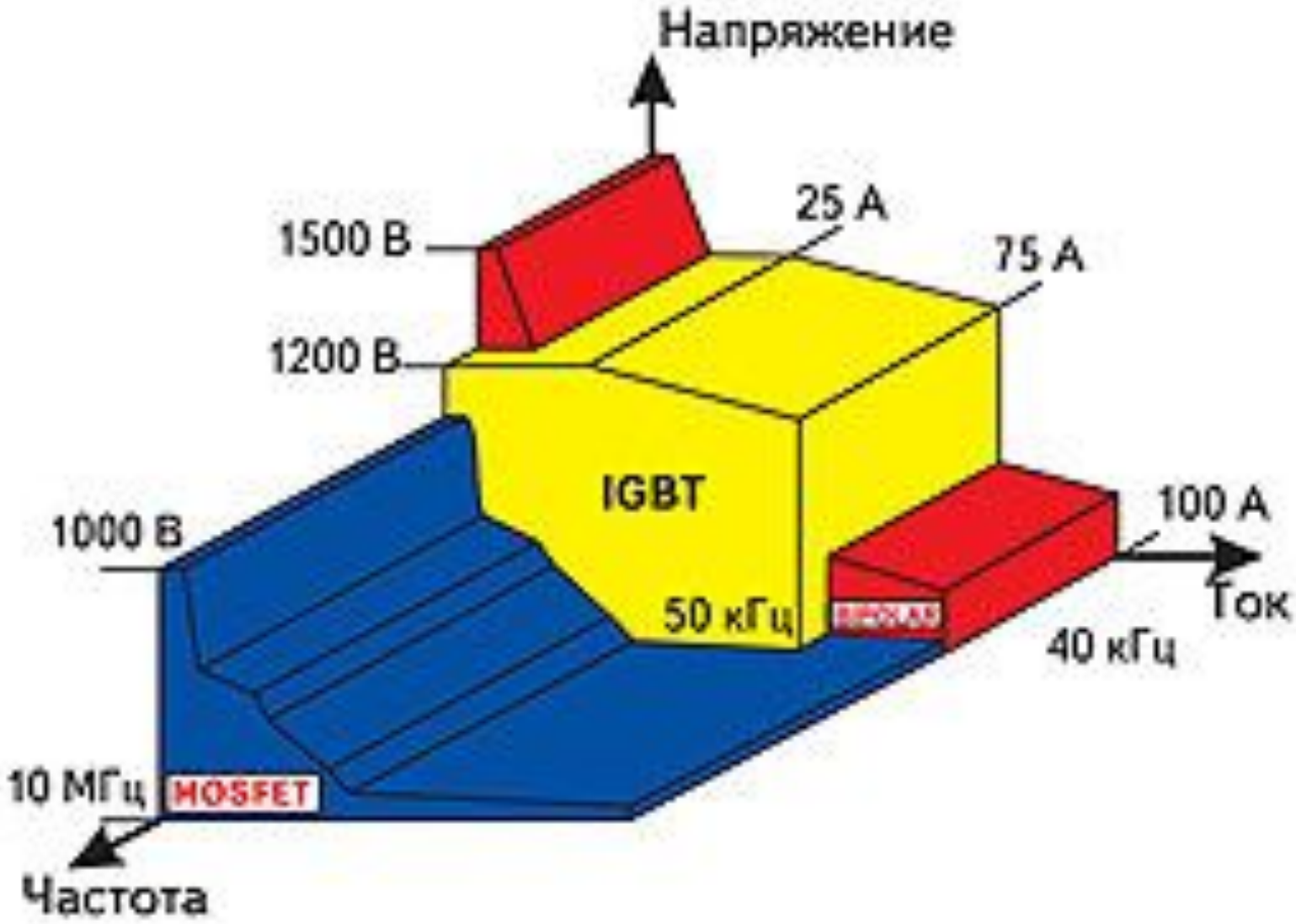
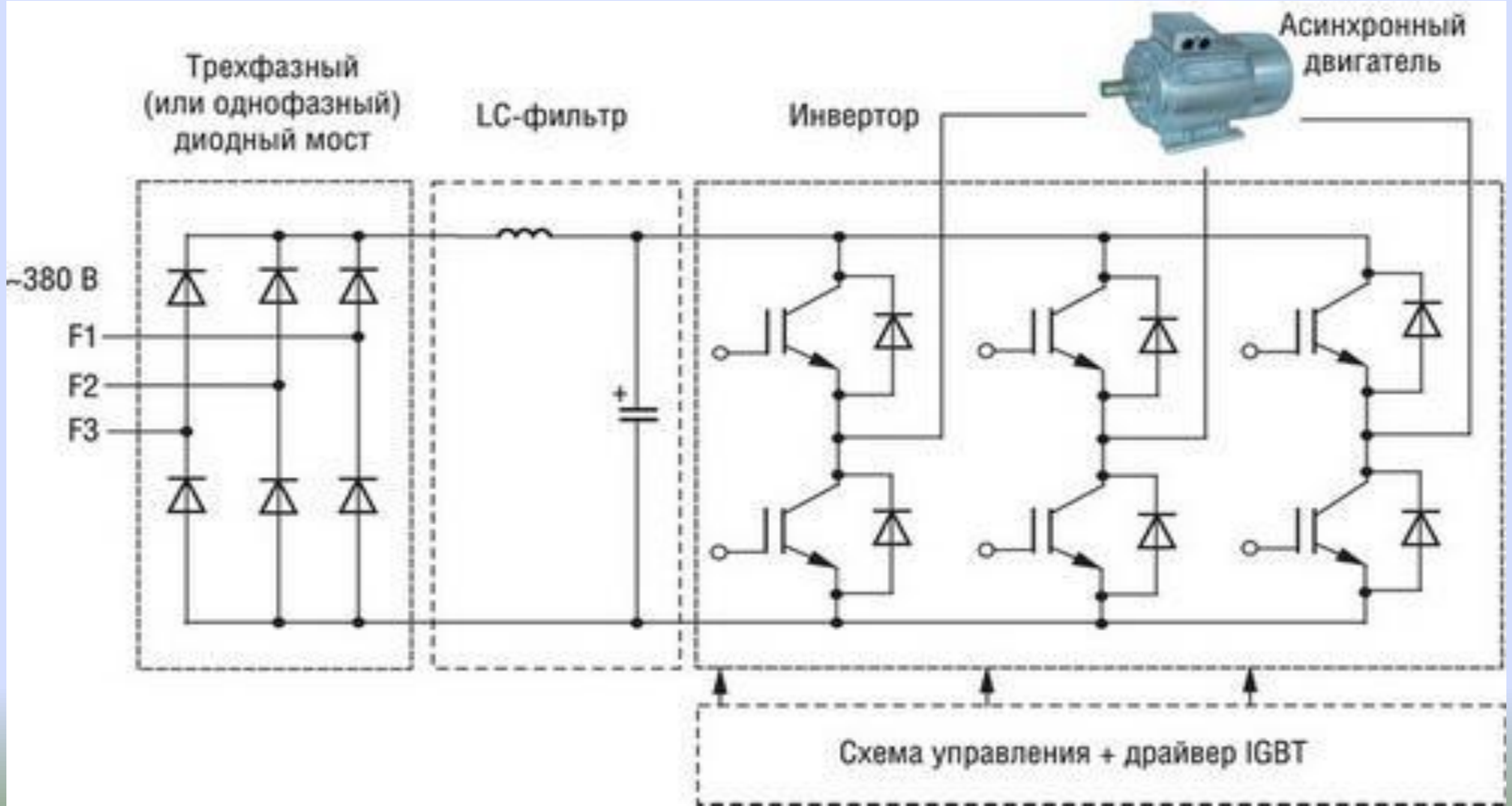
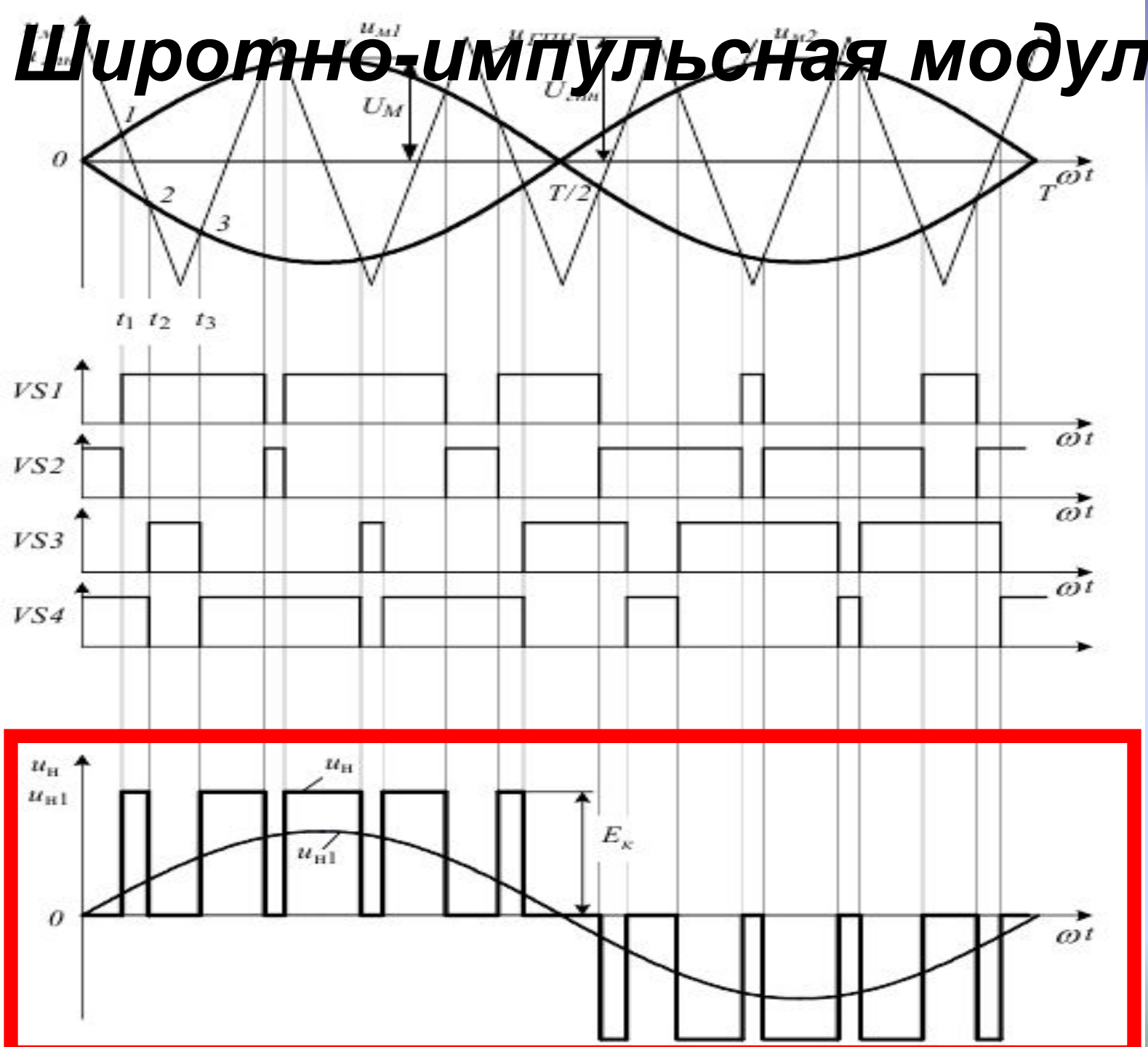


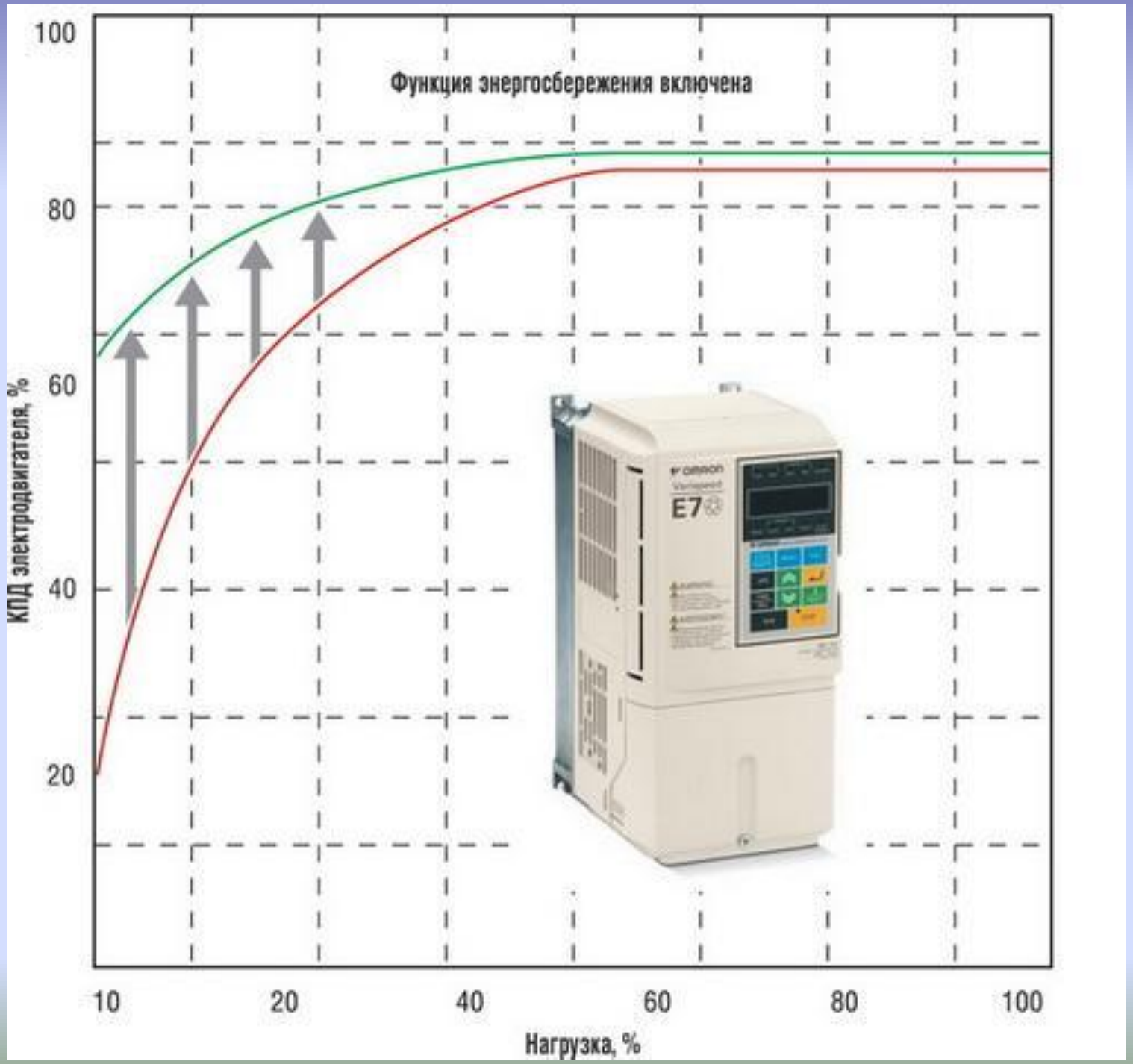
Рис. 2. Возможности IGBT, MOSFET и биполярных транзисторов

Структурная схема частотных преобразователей со звеном постоянного тока *компаний* ***Omron*** *и* ***Yaskawa***



Широтно-импульсная модуляция




Функция энергосбережения включена
КПД электродвигателя, %
100
80
60
40
20
10
20
40
60
80
100
Нагрузка, %
OMRON
E7

Надежность частотных преобразователей Omron

При частотном регулировании одновременно с изменением частоты f_1 приходится изменять и подводимое напряжение U_1

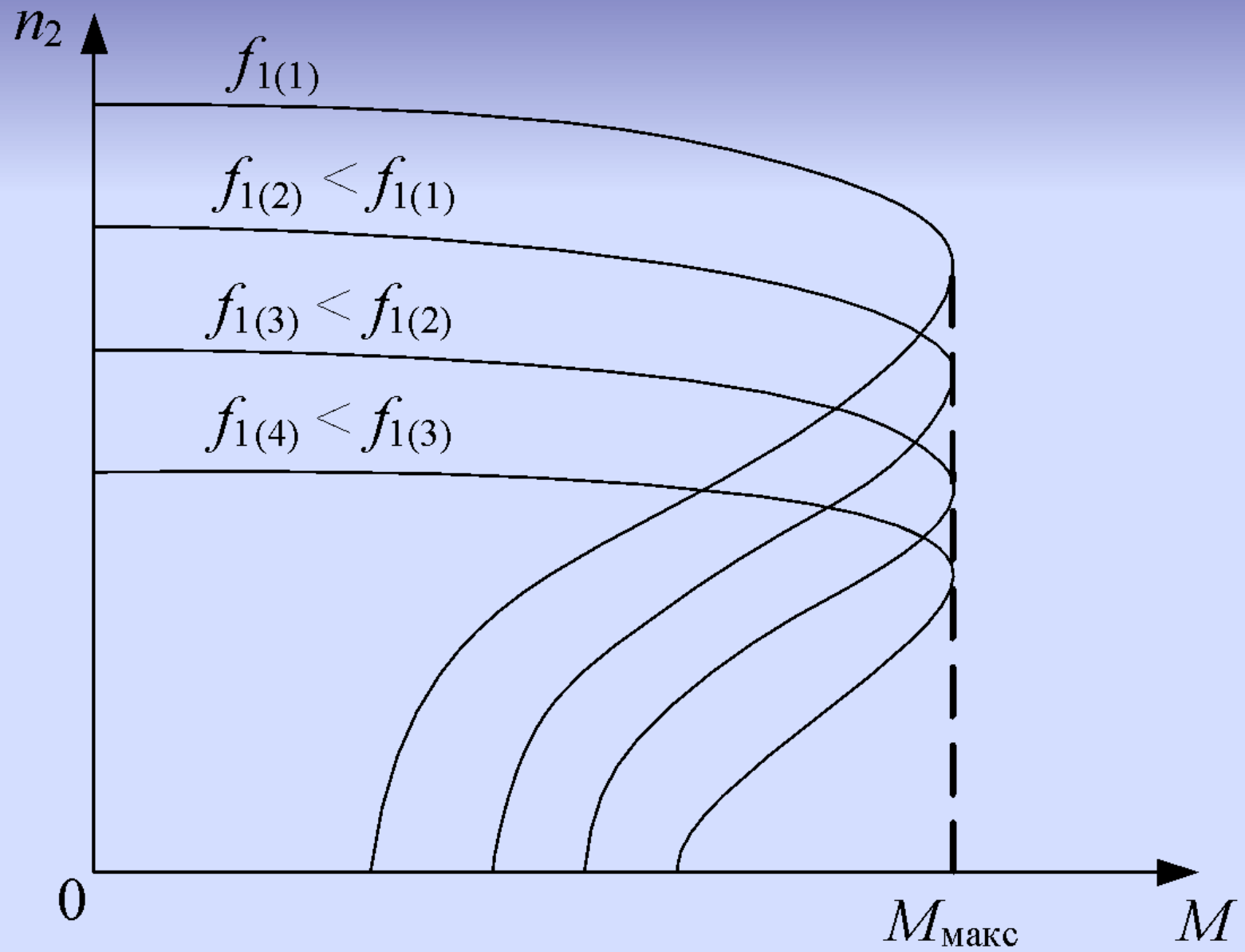
$$M_{\text{макс}} = k_1 \frac{U_1^2}{f_1^2}$$

Для неизменного максимального момента

$$U_{1(1)} / f_{1(1)} = U_{1(2)} / f_{1(2)} = \text{const}$$

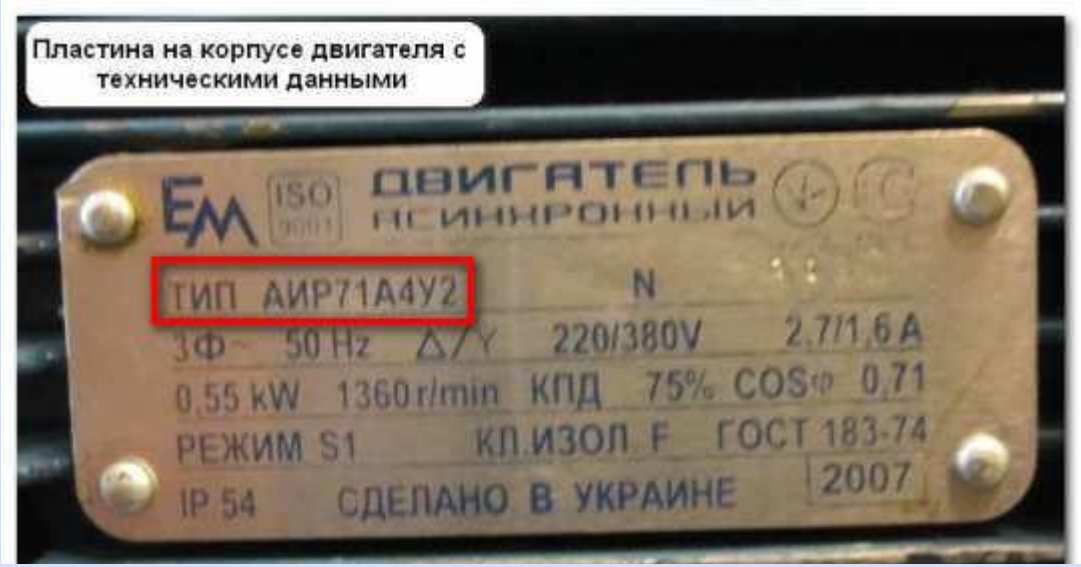
При этом **основной магнитный поток** машины при различных значениях частоты f_1 остается **неизменным**

$$\Phi_m = \frac{1}{4,44\ w_1\ k_{01}}\ \frac{U_1}{f_1} = \text{const}.$$

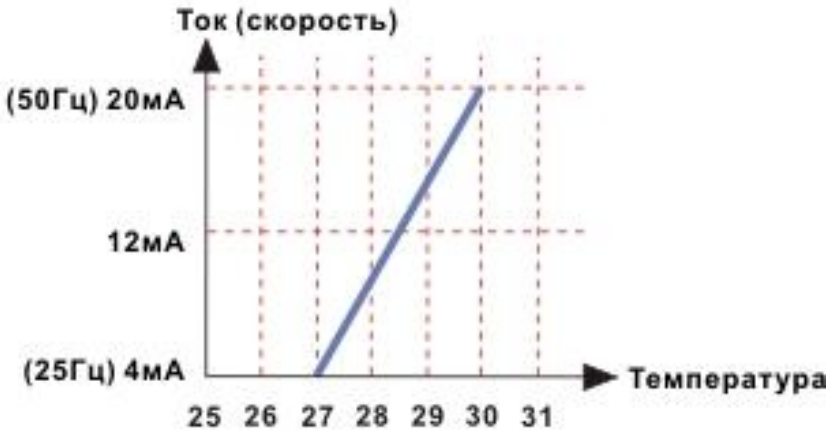


Механические характеристики АД при частотном регулировании $M_{макс}$ = const

2) переключением числа пар полюсов *p*



Многоскоростные АД применяют для электропривода станков и лифтовых асинхронных двигателей.



Асинхронные двигатели с переключением числа пар полюсов называют многоскоростными.

Они выпускаются на две, три и четыре частоты вращения.

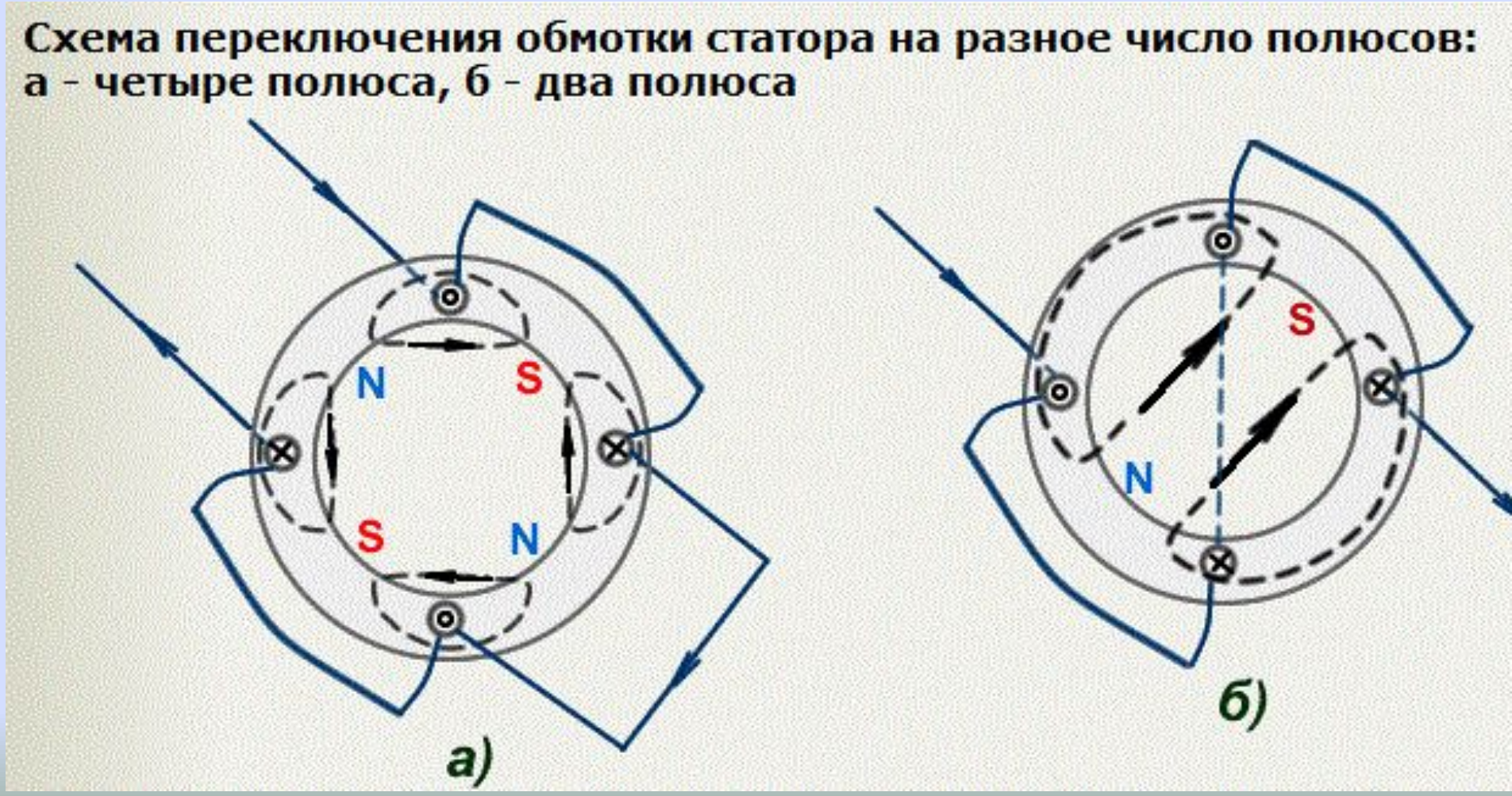
Известно большое число схем, позволяющее осуществлять переключение числа пар полюсов.

Из всех способов регулирования способ переключения числа пар полюсов наиболее экономичный, хотя и он имеет недостатки:

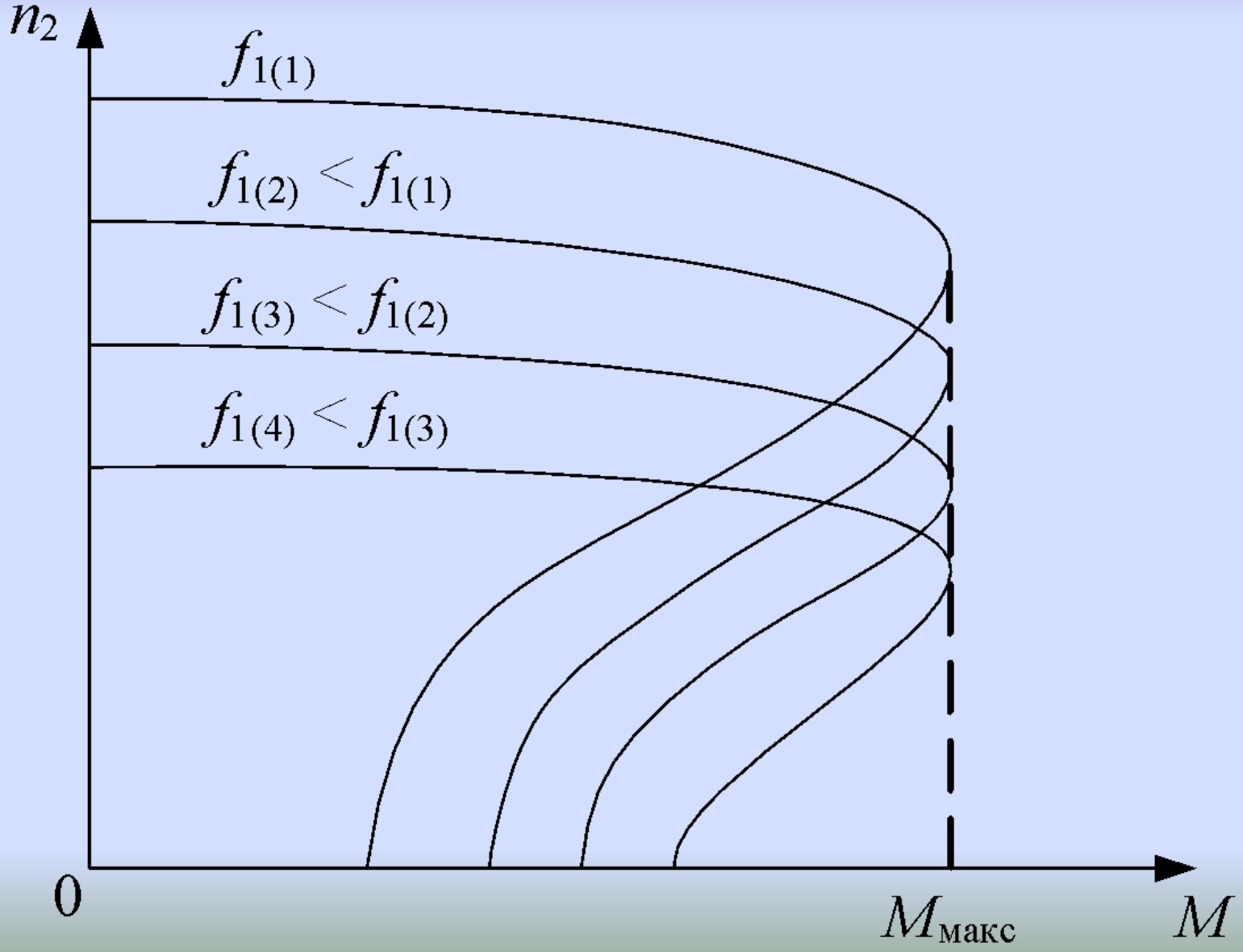
–большие габариты и массу по сравнению с норм. АД;

– регулирование НЕ ПЛАВНОЕ, а ступенчатое.

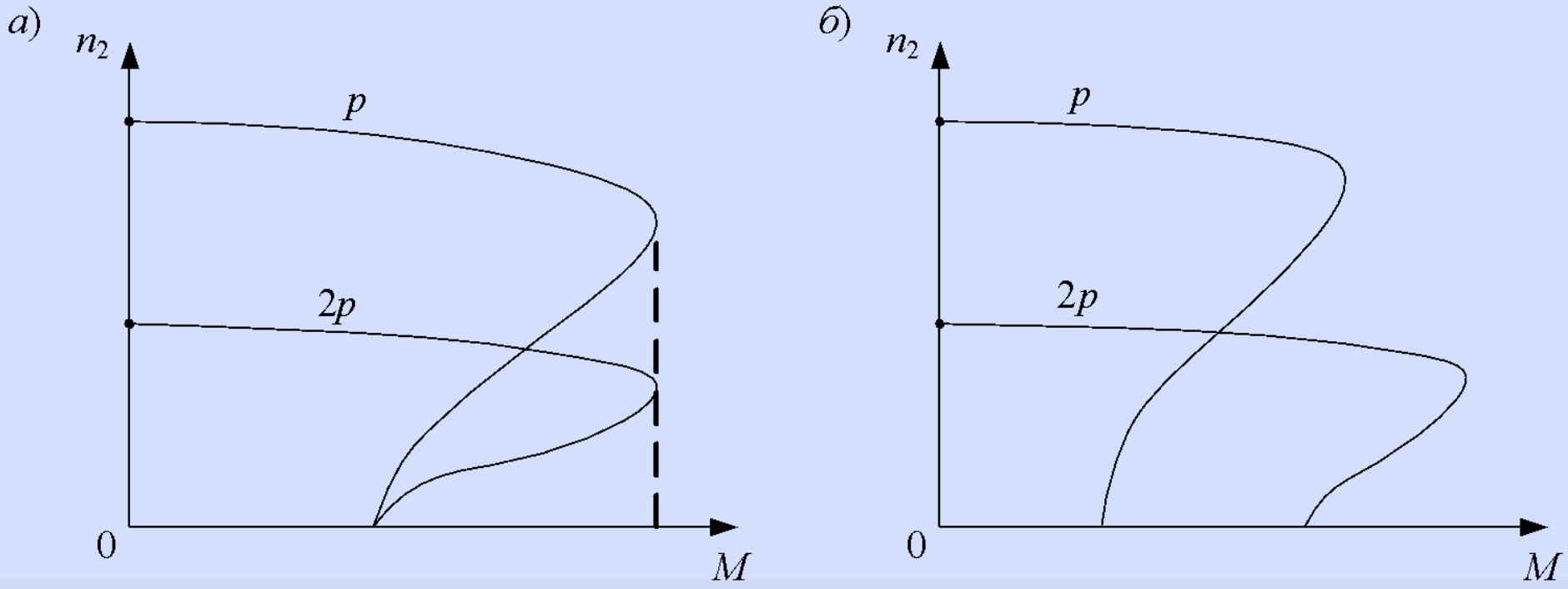
Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов



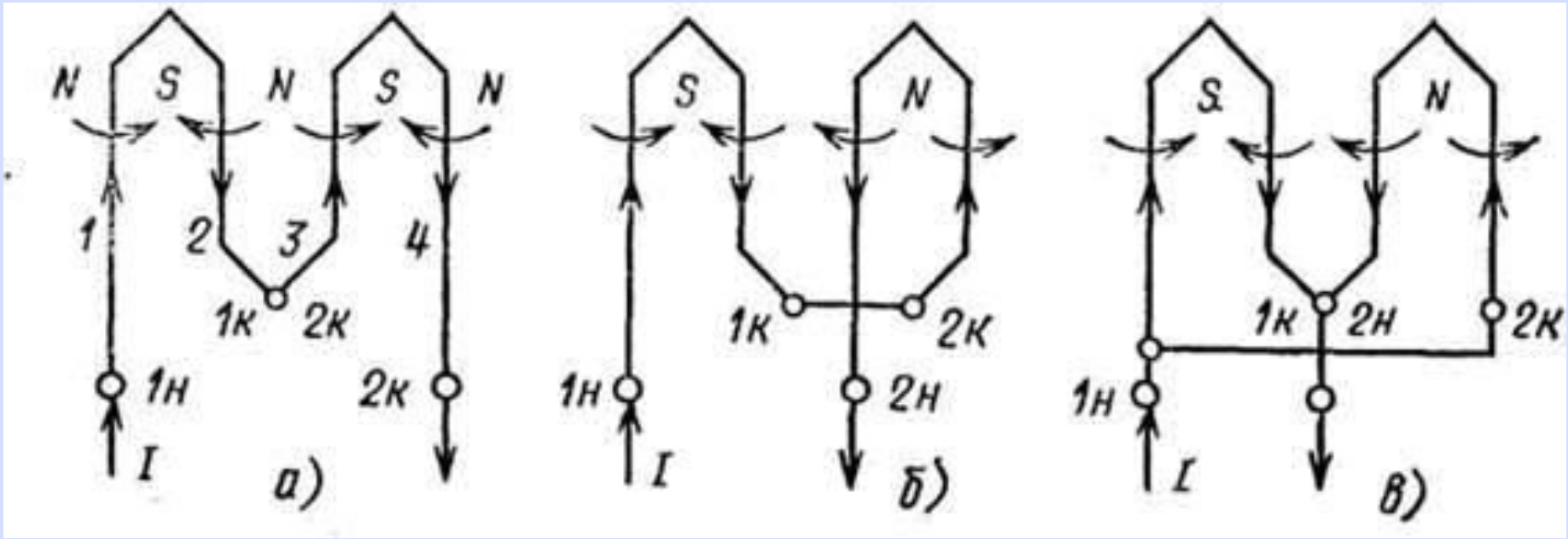
Механические характеристики АД при частотном регулировании



Мех. характеристики двухскоростного двигателя с переключением числа пар полюсов в отношении 2:1

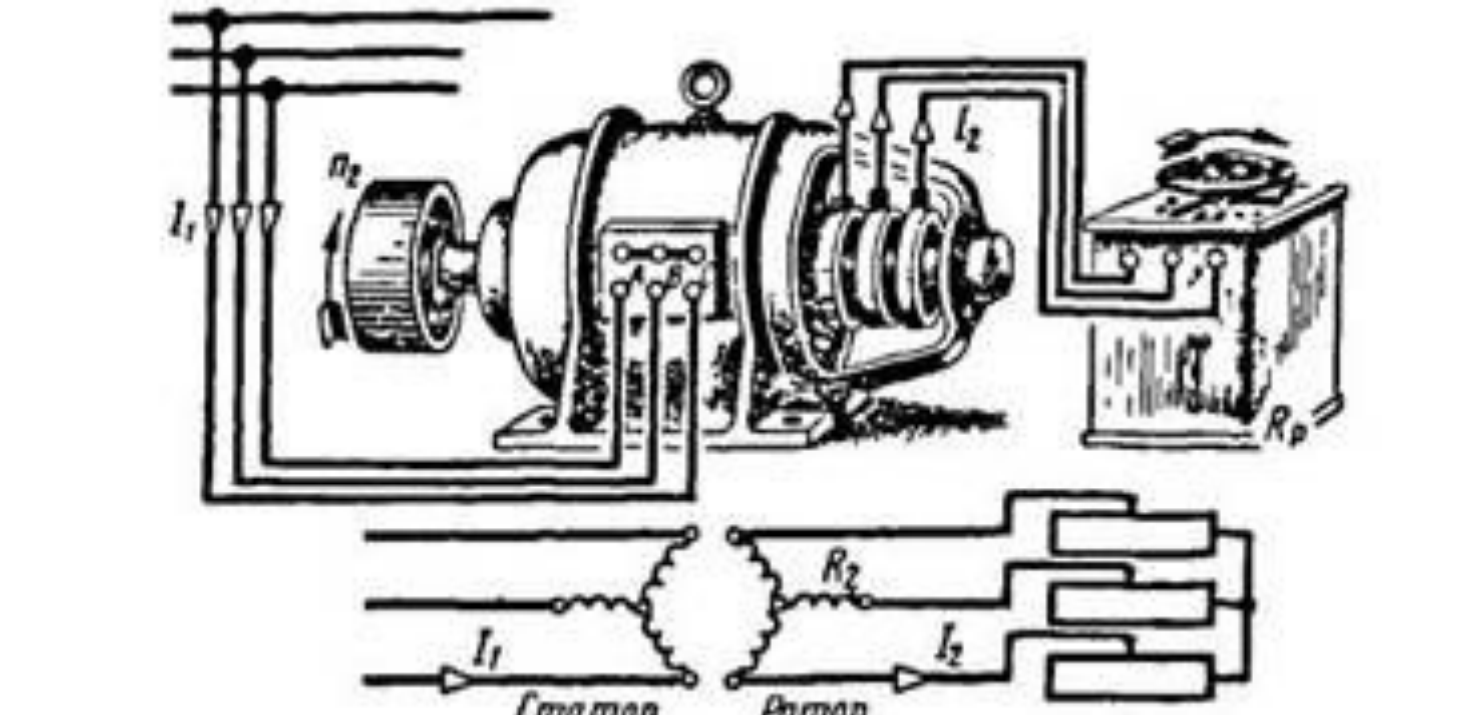


Данный способ регулирования частоты вращения применяется **только для АД с короткозамкнутым ротором**.

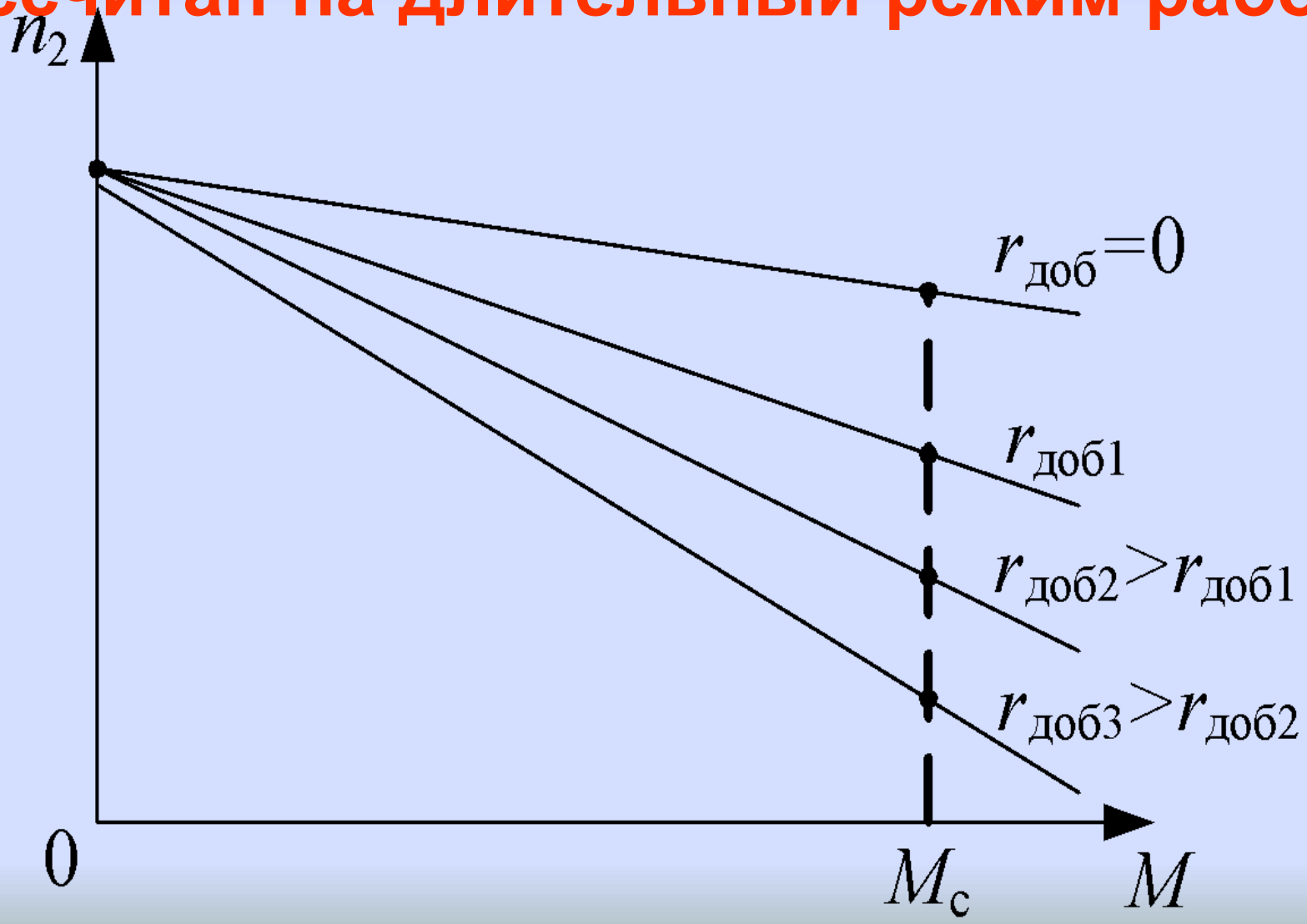


Регулирование частоты вращения АД путем включения в цепь ротора добавочного активного сопротивления.

Применяется только в АД с ФР



Регулировочный реостат должен быть рассчитан на длительный режим работы.



Недостатком этого способа являются большие потери энергии в добавочных сопротивлениях.

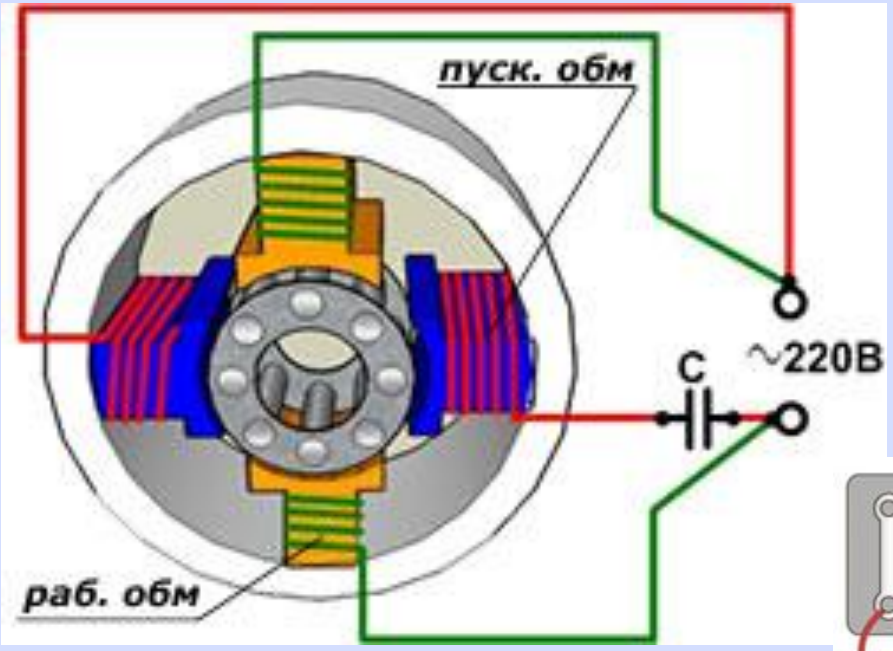
На практике данный способ применяется для регулирования частоты вращения небольших двигателей, например, в подъемных устройствах.

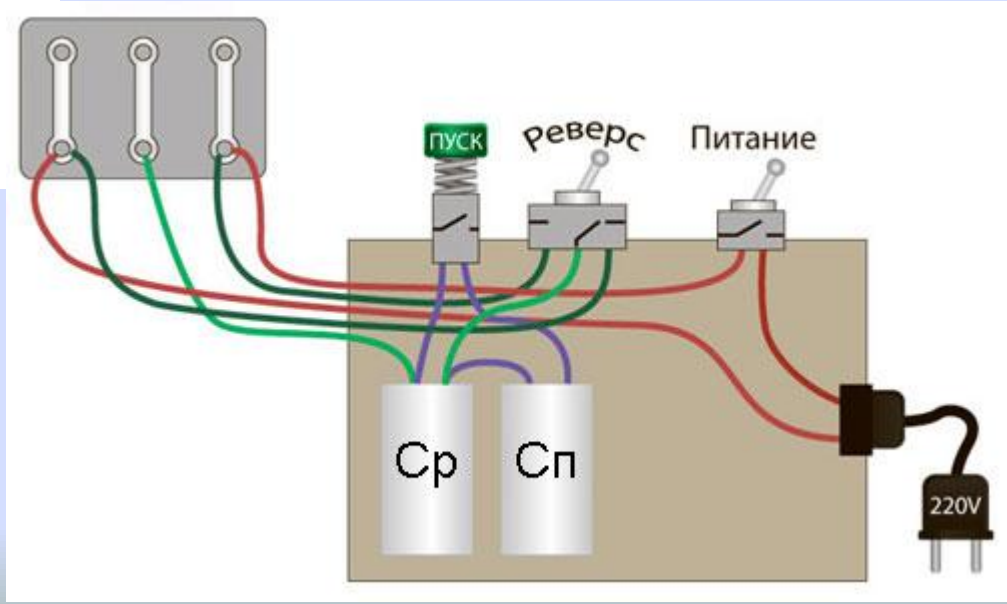
Однофазные АД

Используются в вентиляторах, компрессоров холодильников, приводов барабанов стиральных машин, и другой бытовой техники **, насосов.**

Их преимущество — возможность использования там, где нет трехфазной сети, но есть однофазная.

Однофазные АД

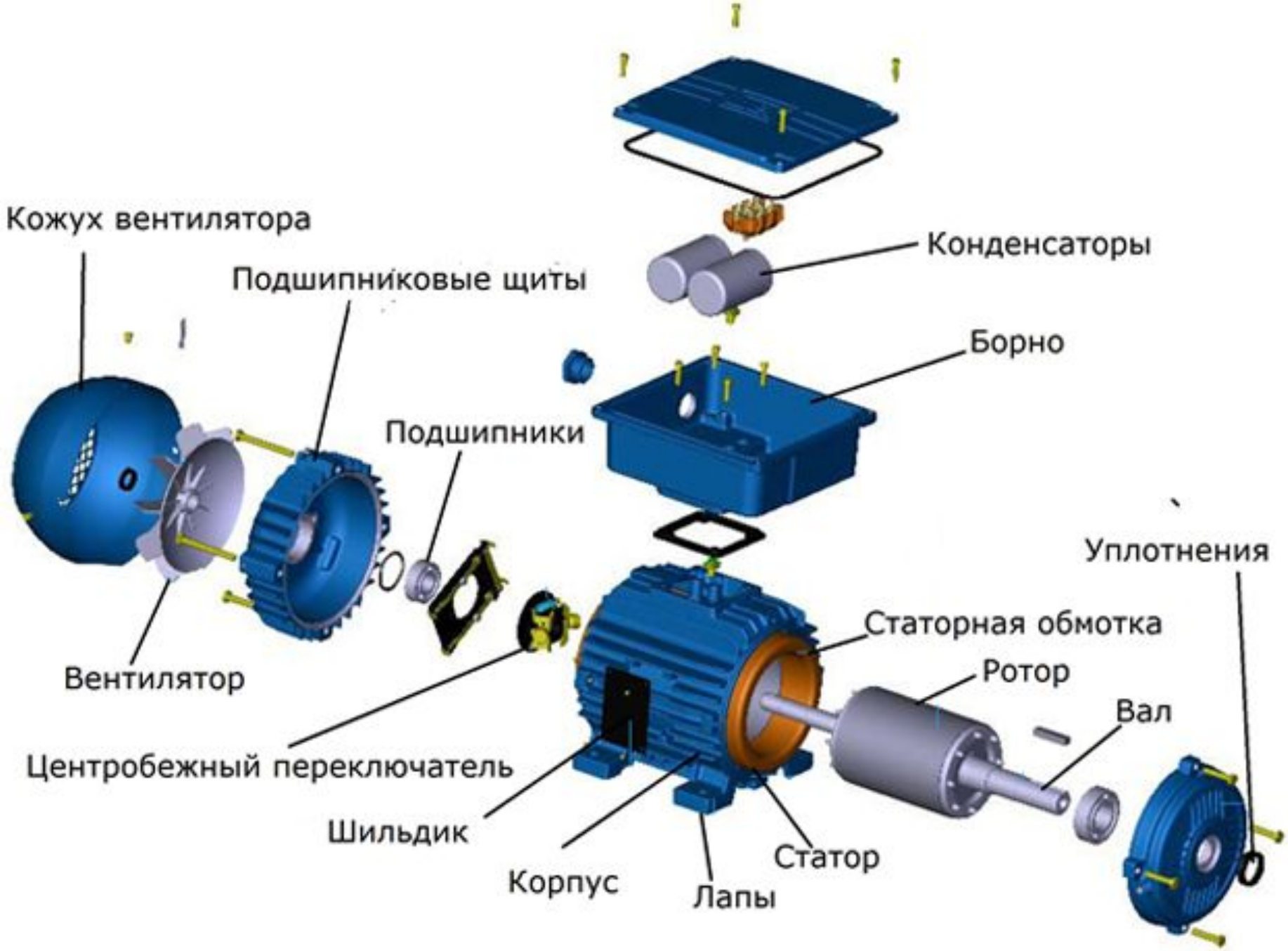




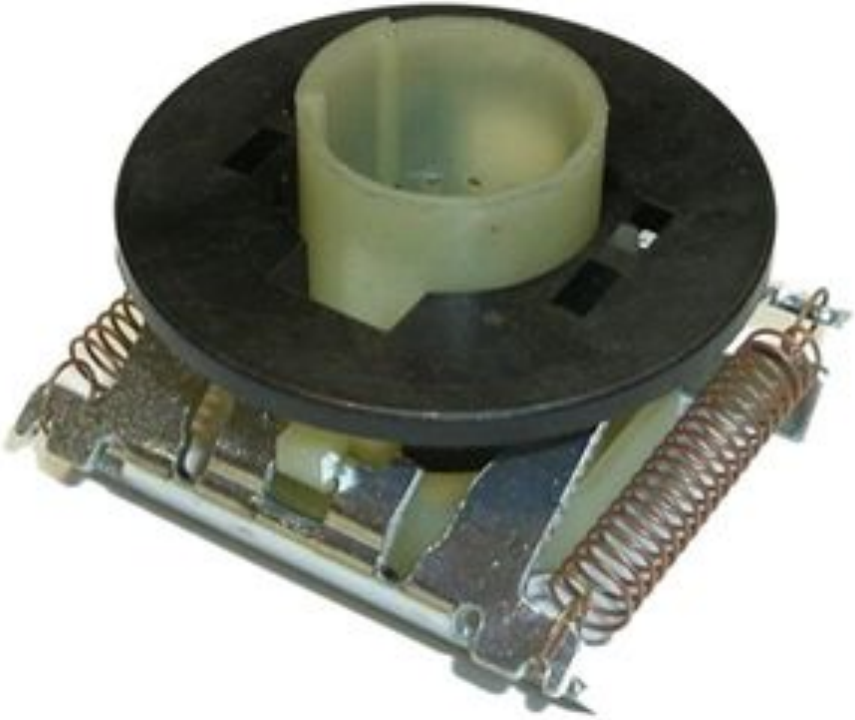
Однофазные АД

Используются в вентиляторах, компрессоров холодильников, приводов барабанов стиральных машин, и другой бытовой техники **, насосов.**

Их преимущество — возможность использования там, где нет трехфазной сети, но есть однофазная.


Кожух вентилятора
Подшипниковые щиты
Конденсаторы
Борно
Подшипники
Уплотнения
Статорная обмотка
Ротор
Вал
Вентилятор
Центробежный переключатель
Шильдик
Корпус
Лапы
Статор

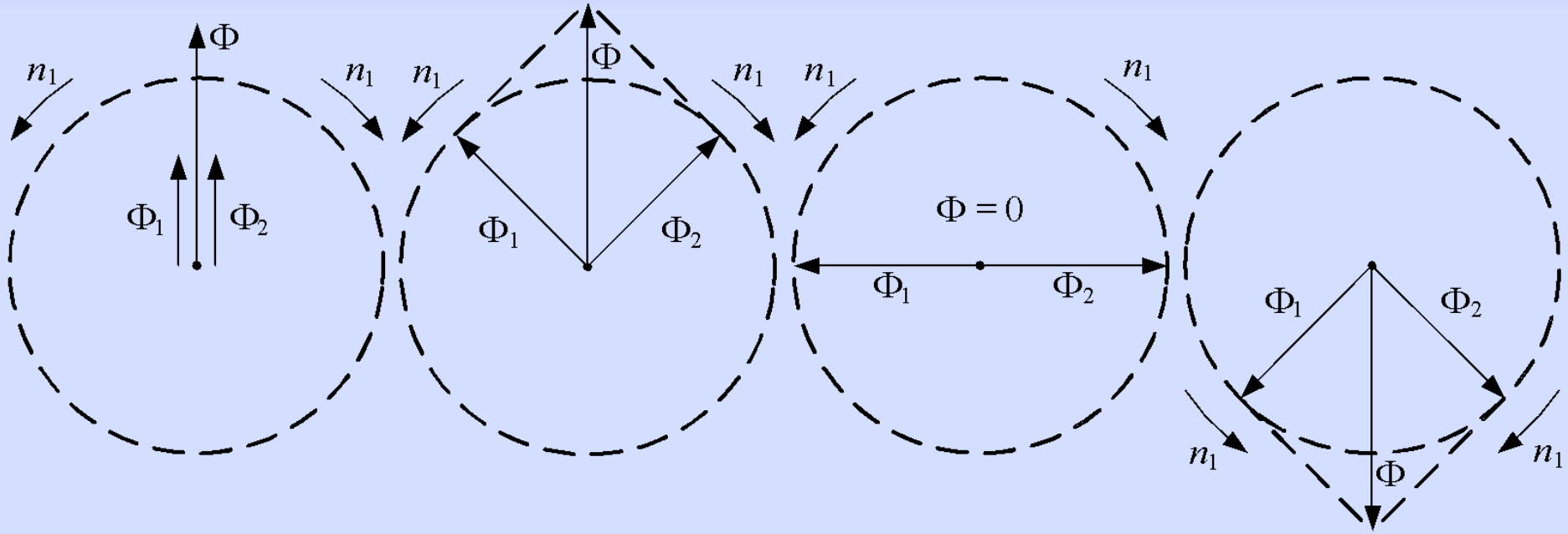
Центробежный переключатель **подключает пусковую обмотку двигателя перед пуском и отключает после окончания пуска**



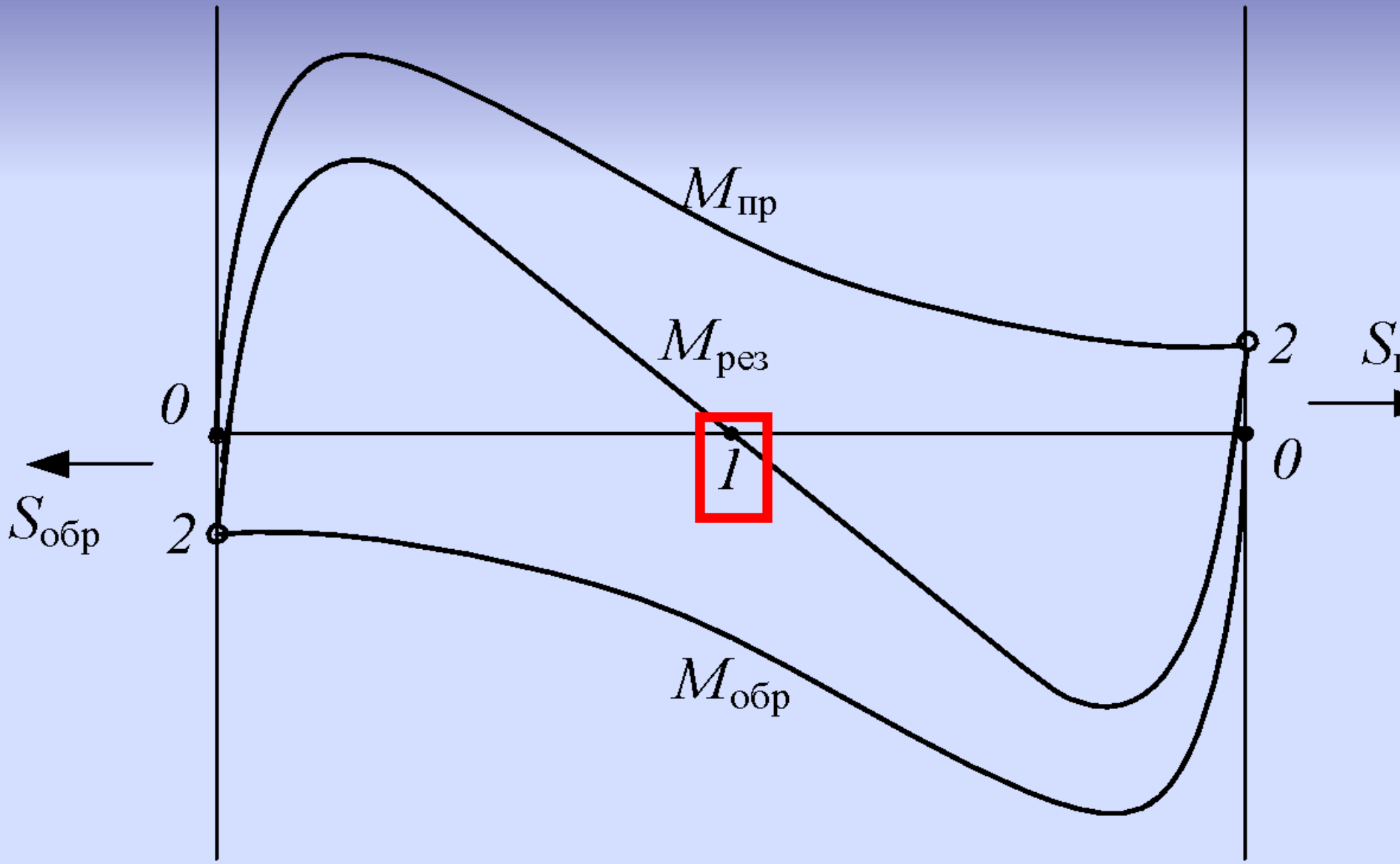
В однофазном АД обмотка статора создает неподвижный поток, изменяющийся во времени, а не круговой вращающийся, как в трехфазных АД

Неподвижный пульсирующий магнитный поток представляется суммой двух круговых вращающихся полей, имеющих одинаковые частоты вращения $n_{1пр} = n_{1обр}$, но противоположных по направлению

$$B_x = 0{,}5\, B_m \sin(\omega t - \tau x) + 0{,}5\, B_m \sin(\omega t + \tau x)$$

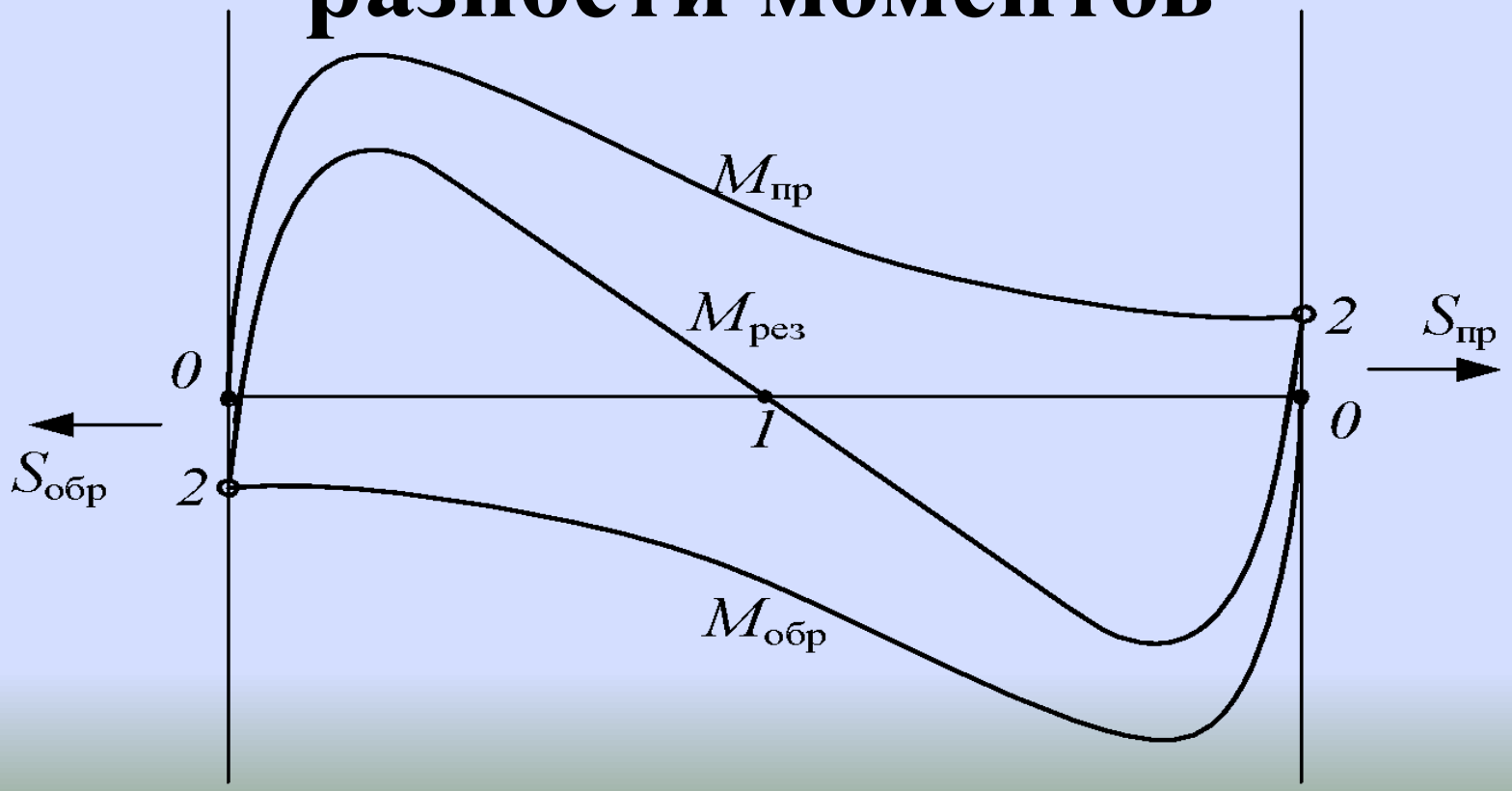


Разложение пульсирующего поля на два вращающихся



Зависимости $M = f(s)$ от прямого и обратного вращающихся полей

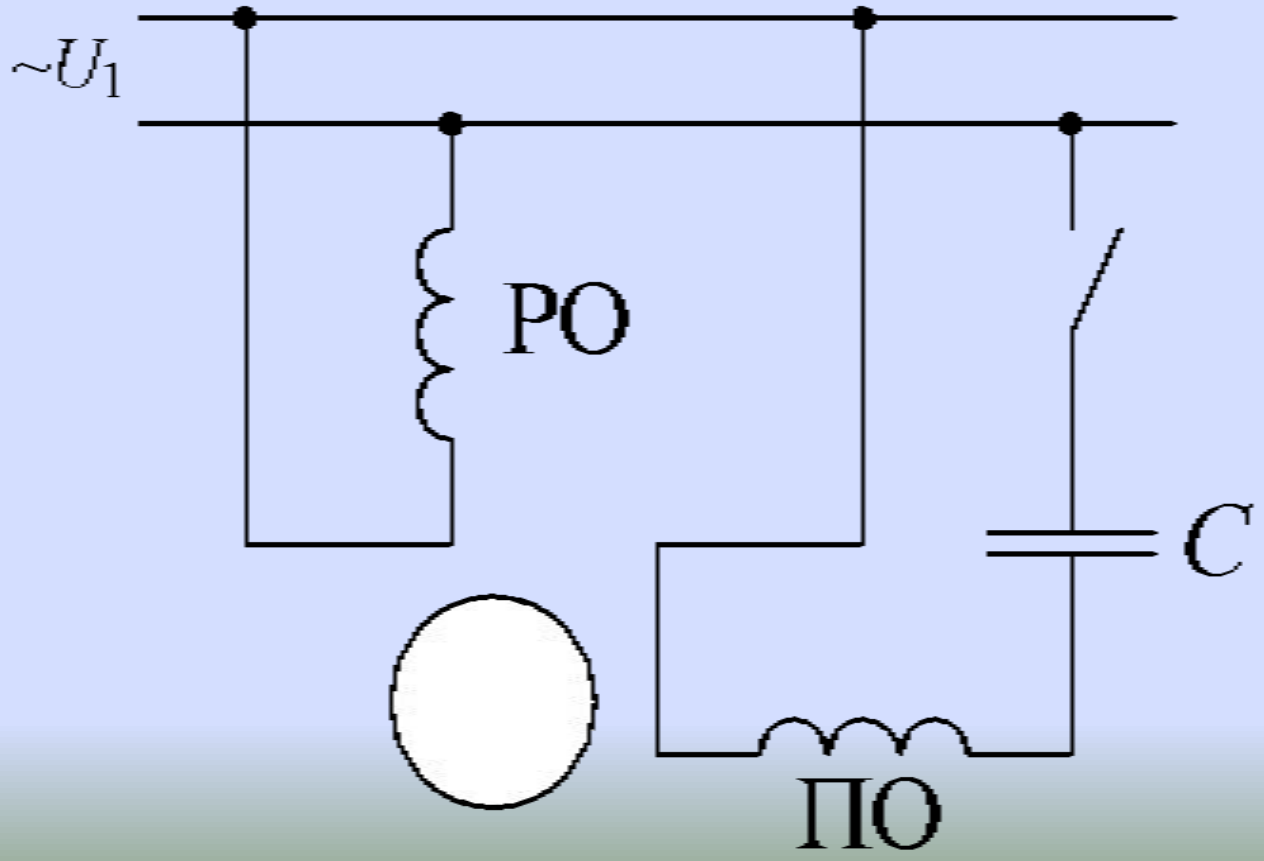
Моменты $M_{пр}$ и $M_{обр}$ направлены в противоположные стороны, а результирующий момент однофазного двигателя $M_{рез}$ равен разности моментов



Однофазный АД не имеет пускового момента; **он будет вращаться в ту сторону, в которую будет приведен внешней силой;**

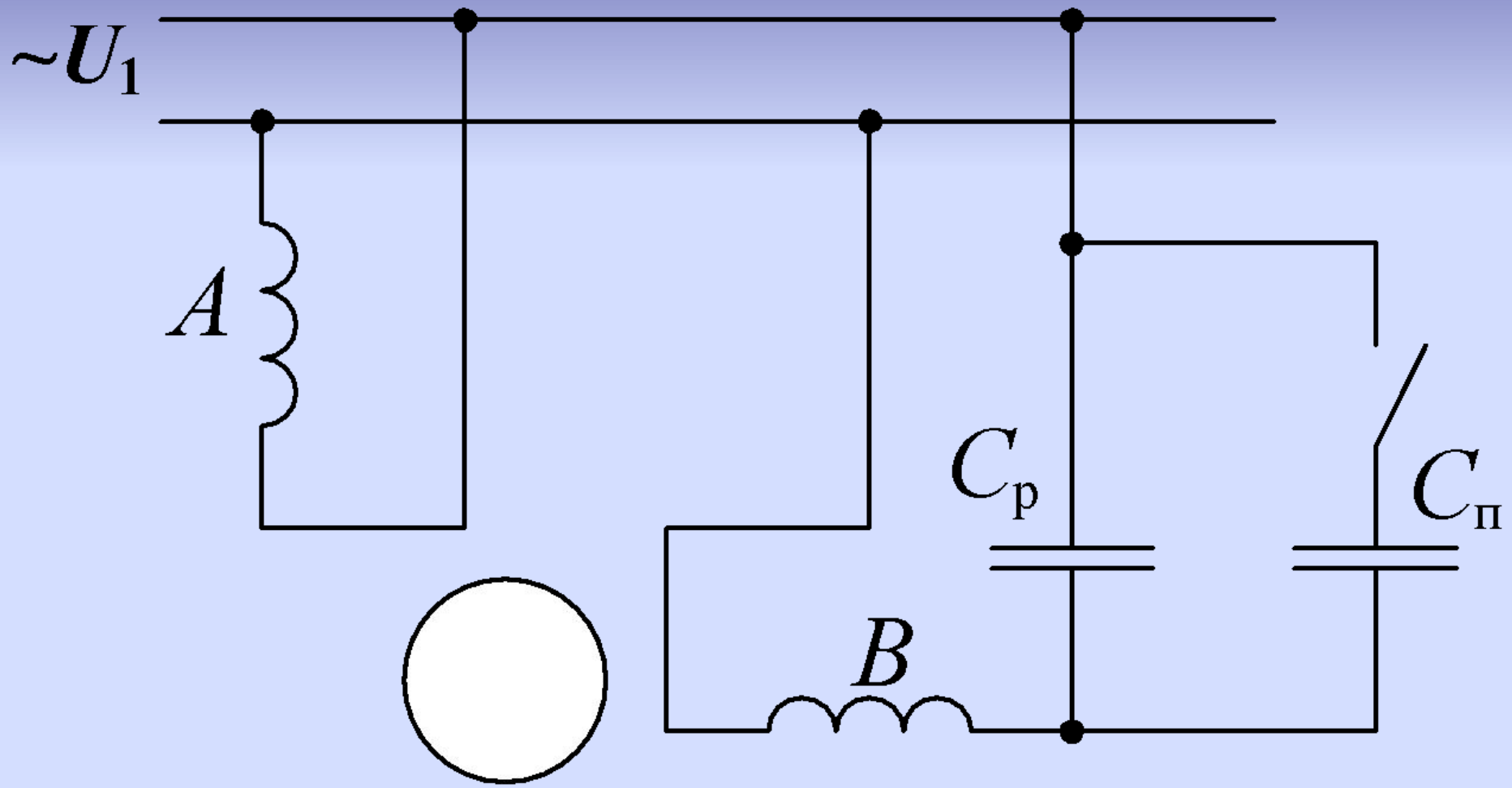
рабочие характеристики однофазного двигателя хуже, чем трехфазного: меньший КПД, меньшая перегрузочная способность.

Чтобы получить пусковой момент, однофазные АД снабжают пусковой обмоткой (ПО), расположенной со сдвигом на 90 эл. градусов относительно рабочей обмотки (РО).



Пусковой конденсатор

Поскольку включение второй обмотки существенно улучшает механическую характеристику двигателя, в некоторых случаях применяют однофазные двигатели, в которых обе обмотки включены всё время



Недостатком его является сравнительно большая масса и габариты конденсатора.

Ограничения при их применении:

- однофазные АД нельзя использовать в режиме холостого хода - при малых нагрузках АД сильно перегреваются;

- не рекомендуется эксплуатировать двигатель при нагрузке меньшей 25% от полной нагрузки.

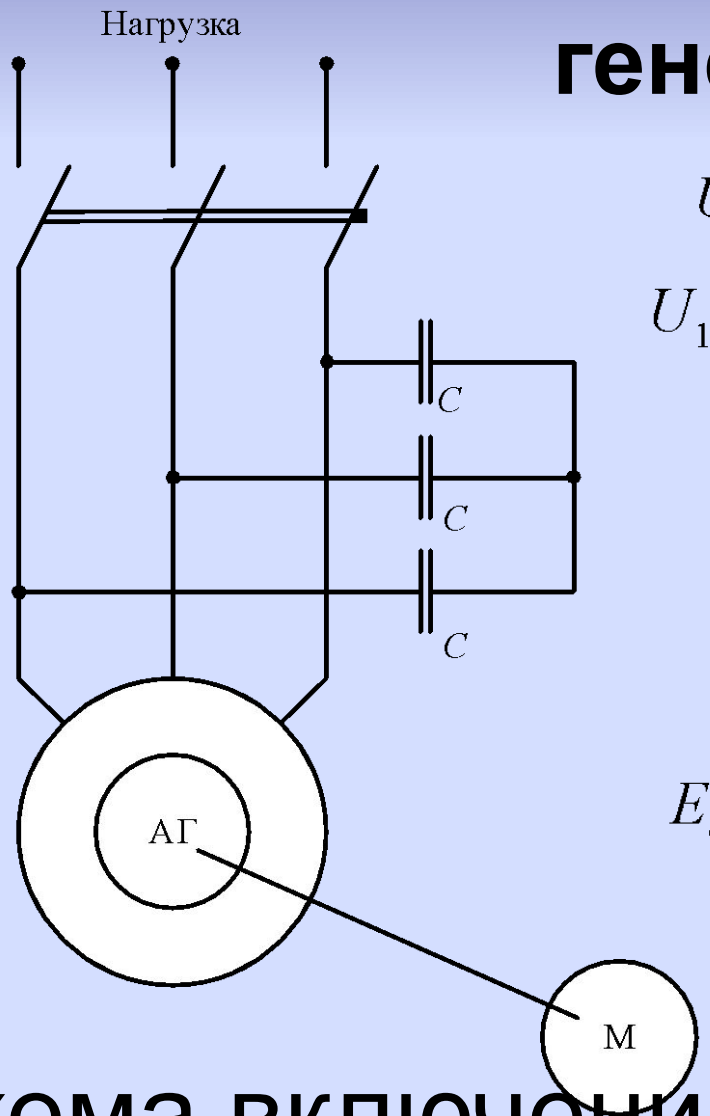
Асинхронная машина в режиме генератора

Для самовозбуждения генератора должны выполняться следующие условия:

1 наличие остаточного магнитного потока $Ф_{ост}$;

2 наличие конденсаторных батарей.

Самовозбуждение асинхронного генератора



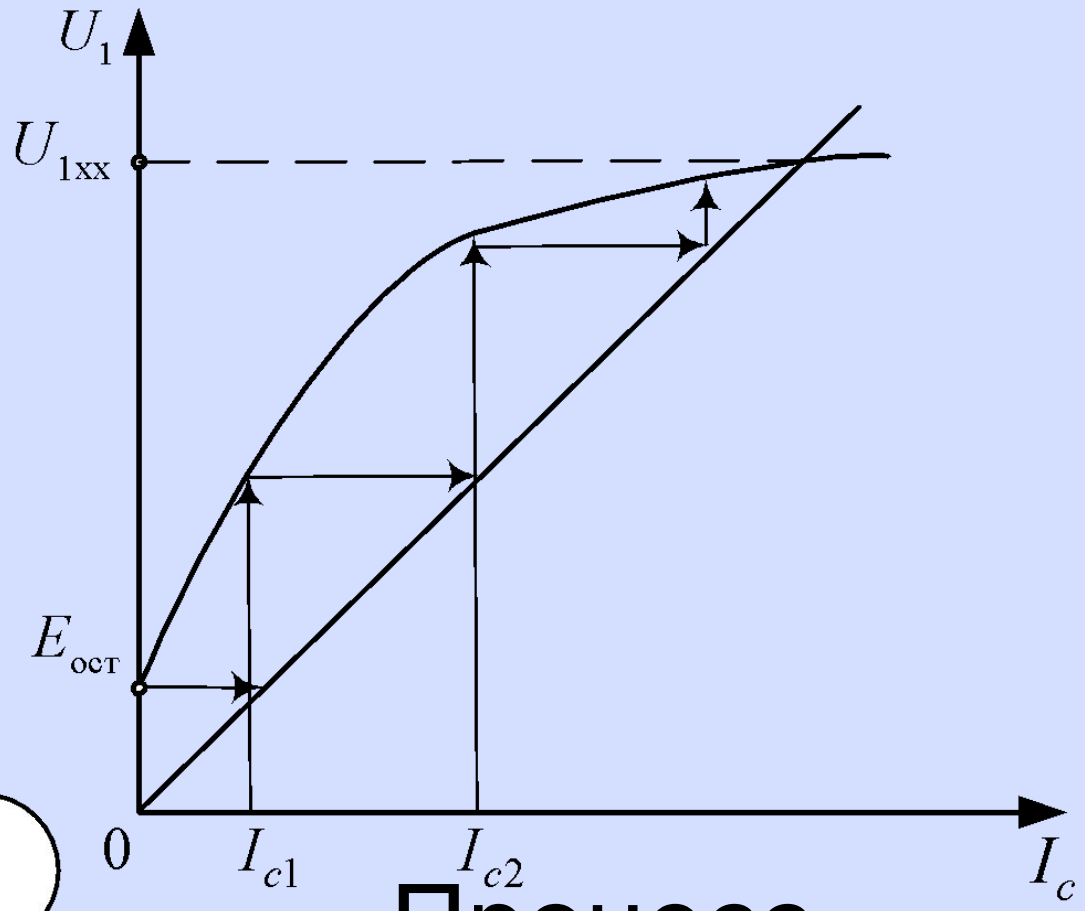


Схема включения в генерат. режим

Процесс самовозбуждения

Недостатки асинхр. генератора:

– необх. конденсаторные батареи;

– проблемы при работе на индуктивную нагрузку;

– сложная связь напряжения и частоты тока от нагрузки.

Достоинства:

– дешевле, чем синхронный генератор;

– надежность его выше из-за отсутствия скользящих контактов.

Электромагнитное торможение:

***1 Торможение противовключением*. Если у АД поменять местами любую пару подходящих к статору из сети присоединительных проводов, то направление вращающегося поля статора изменится на обратное.**

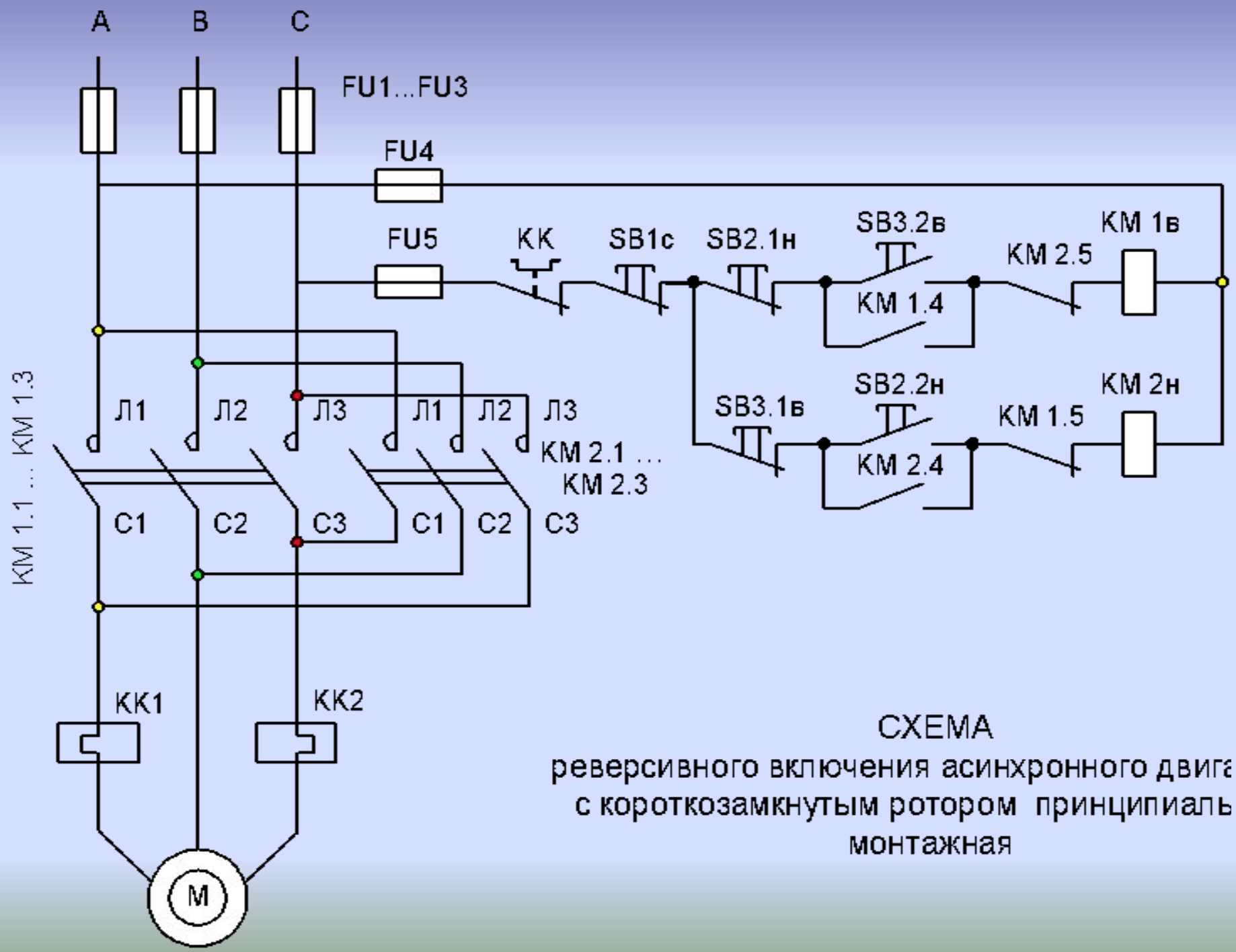
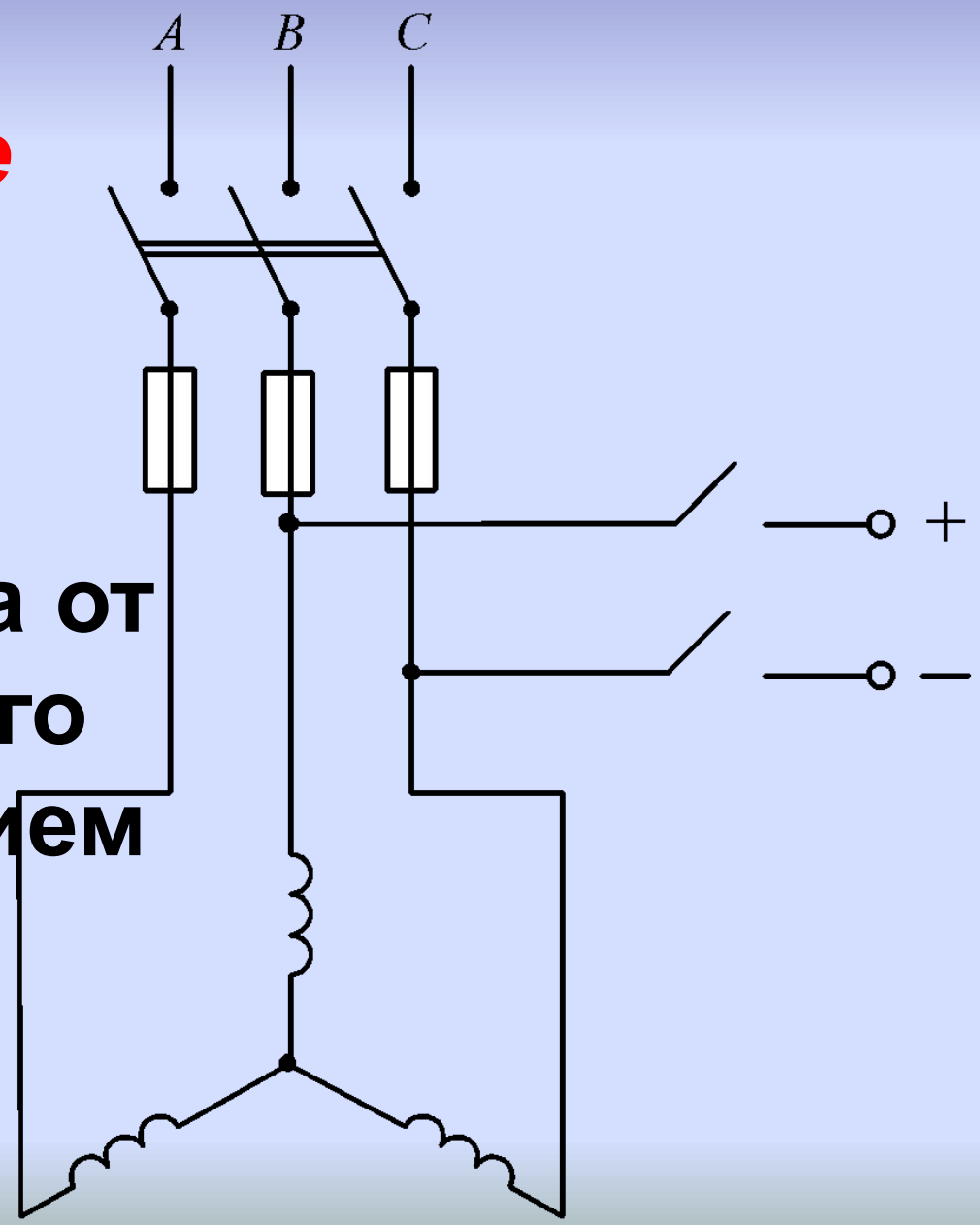


СХЕМА
реверсивного включения асинхронного двига
с короткозамкнутым ротором принципиаль
монтажная

Динамическое торможение **реализуется отключением обмотки статора от сети переменного тока и включением на постоянное напряжение**

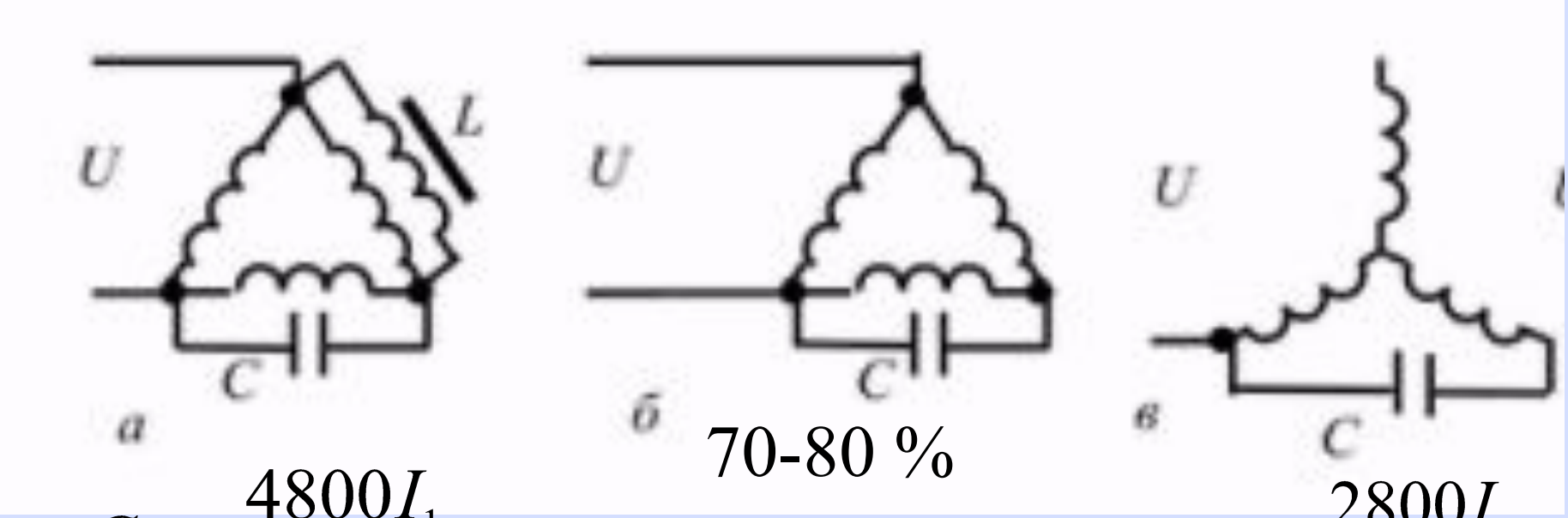


Достоинство
- возможность регулировать момент торможения и точно остановить.

Применяетсяв подъёмно-транспортных машинах, в циркулярных пилах, в двухсистемных электровозах, в конвейерах для безопасной остановки механизмов при отключении электродвигателей и т. д.

Подключение трехфазного АД в режиме однофазного

Схемы включения



$$C_р = \frac{4800 I_1}{U_1},$$

70-80 % мощности трехфазного АД из-за эллипти-ческого поля

$$C_р = \frac{2800 I_1}{U_1}.$$

40 % мощности трехфазного АД