

Курс 2. Устройство плавного пуска асинхронных и синхронных двигателей среднего и высокого напряжения

Лектор: к.т.н., доцент Тергемес К.Т.

Пуск асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели (АД) очень широко используются в различных отраслях промышленности. По различным данным, на долю асинхронного электропривода переменного тока приходится 70 до 90% от общего количества промышленных электроприводов. Большая часть АД относится к диапазону мощностей до 100 кВт с номинальным напряжением до 380 В. Распределение электроприводов по диапазону мощностей и доле потребляемой электроэнергии приведено в таблице 1.

Мощность, кВт	Доля от общего количества, %	Доля потребляемой элек- троэнергии, %
До 1	10	1
От 1 до 5	60	29
От 5 до 20	20	40
От 20 до 100	9	20
Свыше 100	1	10

ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При пуске асинхронных двигателей пусковые токи достигают до 7-8 кратные значения от номинального тока данного двигателя, и последний подвергается большим электродинамическим усилиям. Происходит превышение температуры статорных, роторных обмоток опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины а при прямом пуске асинхронных и синхронных двигателей большой мощности высокого напряжения происходит просадка сетей что не желательно при действующих технологических процессах

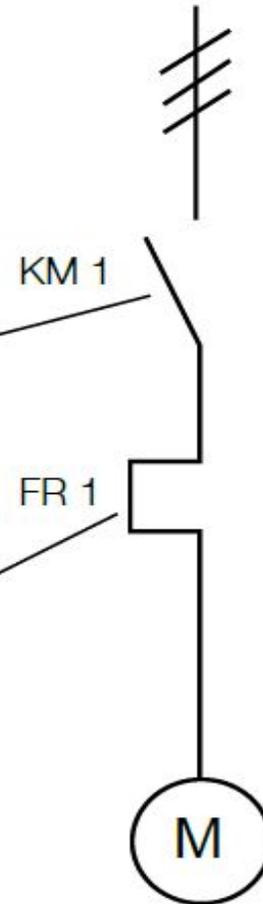
РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ПУСКА

1. Прямой пуск (DOL)
2. Пуск по схеме звезда-треугольник
3. Пуск тиристорным преобразователем напряжения
4. Пуск с помощью реостата в цепи ротора
5. Пуск преобразователем частоты
6. Пуск устройством с широтно-импульсной модуляцией

ПРЯМОЙ ПУСК



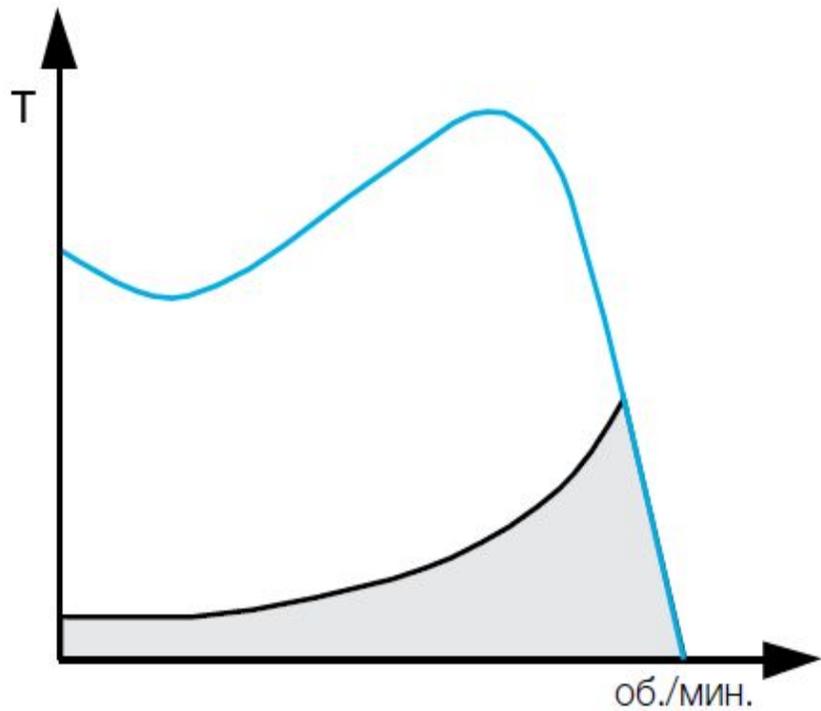
Пускатель для прямого пуска с контактором и реле перегрузки



Однолинейная схема для прямого пуска двигателя

KM 1 Линейный контактор
FR 1 Реле перегрузки

Данный вид пуска является наиболее распространенным, так как он является наиболее дешевым и компактным. Исходное оборудование включает в себя только линейный контактор, а также тепловое или электронное реле перегрузки. Недостатком этого метода является то, что при нём возникает максимально возможный пусковой ток. Нормальное значение в 6-8 раз выше номинального тока двигателя, но оно может превышать этот ток и в 14 раз. Также существует пиковый ток из-за намагниченности, который может быть в 20 раз выше номинального тока, т. к. напряжение на двигателе в момент пуска отсутствует.



Кривая крутящего момента при прямом пуске

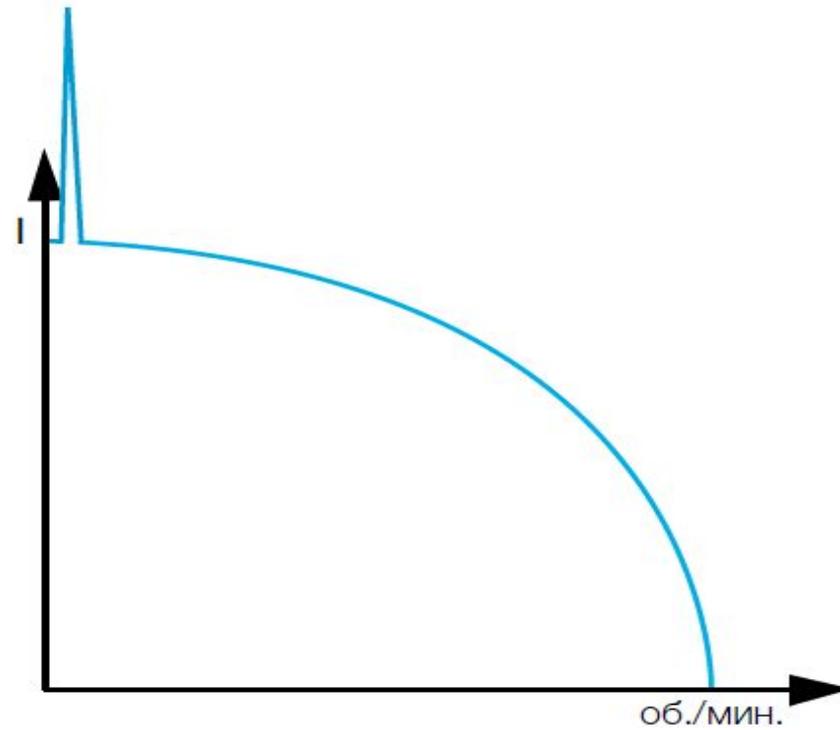


График тока при прямом пуске

При прямом пуске пусковой крутящий момент также очень высок, и в большинстве случаев он выше необходимого. Это может привести к ненужной высокой нагрузке на приводные ремни, муфты и приводное оборудование. Тем не менее есть ситуации, когда этот метод пуска прекрасно подходит и в иных методах нет никакой необходимости.

Прямой пуск. Этот способ применяют для пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Двигатели этого типа малой и средней мощности обычно проектируют так, чтобы при непосредственном подключении обмотки статора к сети возникающие пусковые токи не создавали чрезмерных электродинамических усилий и превышений температуры, опасных с точки зрения механической и термической прочности основных элементов машины.

В асинхронных двигателях отношение L/R сравнительно мало (особенно в малых двигателях), поэтому переходный процесс в момент включения характеризуется весьма быстрым затуханием свободного тока. Это позволяет пренебречь свободным током и учитывать только установившееся значение тока переходного процесса.

Двигатели обычно пускают с помощью электромагнитного выключателя K - магнитного пускателя (рис. 4.27, а) и разгоняют автоматически по естественной механической характеристике M (рис. 4.27,б) от точки P , соответствующей начальному моменту пуска, до точки R , соответствующей условию $M = M_{ст}$. Ускорение при разгоне определяется разностью абсцисс кривых M и $M_{ст}$ и моментом инерции ротора двигателя и механизма, который приводится во вращение. Если в начальный момент пуска $M_p < M_{ст}$, двигатель разогнаться не сможет.

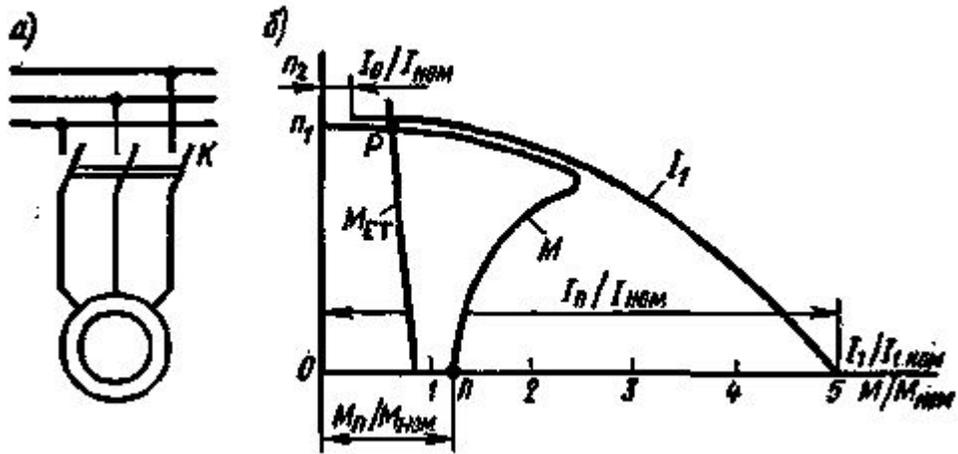


Схема прямого пуска асинхронного двигателя и графики изменения моментов и тока

Значение начального пускового момента можно получить из формулы, приняв $s = 1$:

$$M_{\pi} = m_1 U_1^2 R'_2 / \{w_1 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]\}.$$

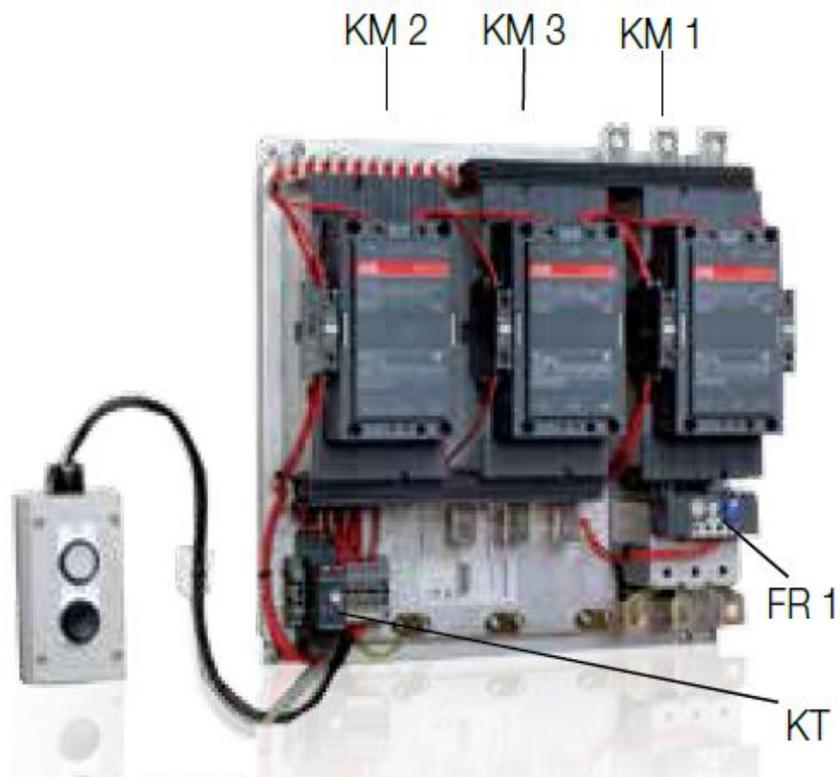
Отношение моментов $M_{\pi} / M_{ном} = \text{кп.м}$ называют кратностью начального пускового момента. Для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6–100 кВт ГОСТом установлено $\text{кп.м} = 1,0 \div 2,0$; мощностью 100–1000 кВт - $\text{кп.м} = 0,7 \div 1,0$.

Получение кратностей пускового момента, больших регламентированных ГОСТом, обычно нежелательно, так как это связано либо с увеличением активного сопротивления ротора (см. 4.58), либо с изменением конструкции ротора (см. § 4.11), что ухудшает энергетические показатели двигателя.

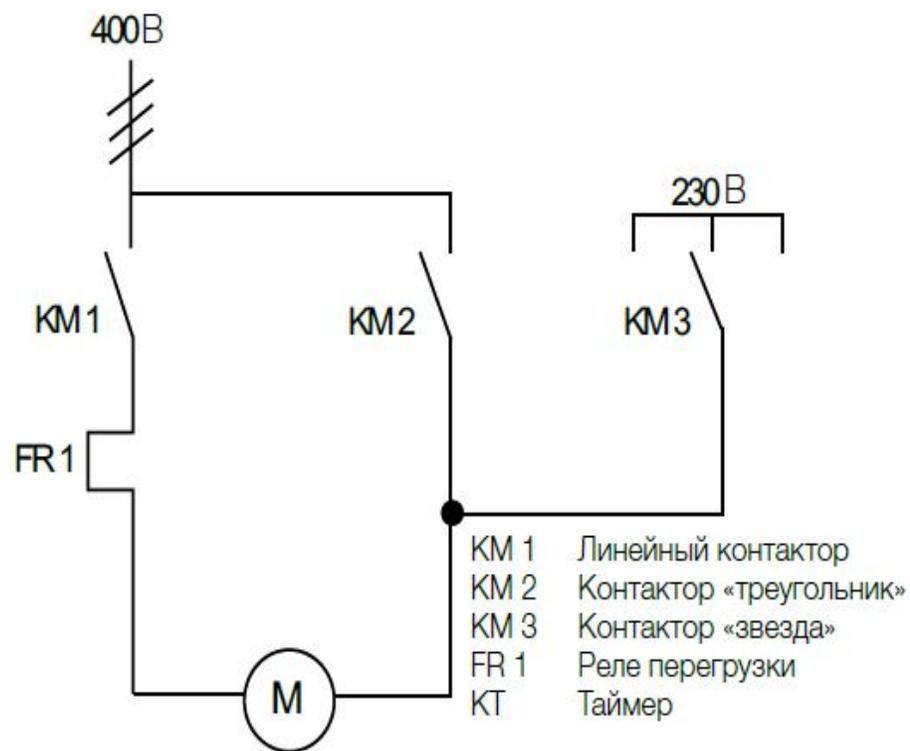
Недостатком данного способа пуска кроме сравнительно небольшого пускового момента является также большой бросок пускового тока, в пять — семь раз превышающий номинальное значение тока.

Несмотря на указанные недостатки, пуск двигателя путем непосредственного подключения обмотки статора к сети широко применяют благодаря простоте и хорошим технико-экономическим свойствам двигателя с короткозамкнутым ротором — низкой стоимости и высоким энергетическим показателям (η , $\cos \varphi_1$, k_m и др.).

ПУСК ПО СХЕМЕ ЗВЕЗДА-ТРЕУГОЛЬНИК



Пускатель со схемой соединения звезда/треугольник с контакторами и реле перегрузки



Пускатель со схемой соединения звезда/треугольник, состоит из трех контакторов, реле перегрузки и таймера. Этот метод пуска можно использовать только с двигателем, который в номинальном режиме работы соединен треугольником.

Основная идея использования такого способа пуска состоит в том, что в начальный момент разгона двигателя, его обмотки соединены звездой, что обеспечивает пониженный ток. По истечении определенного времени подключение меняется на «треугольник», что обеспечит полный ток и крутящий момент.

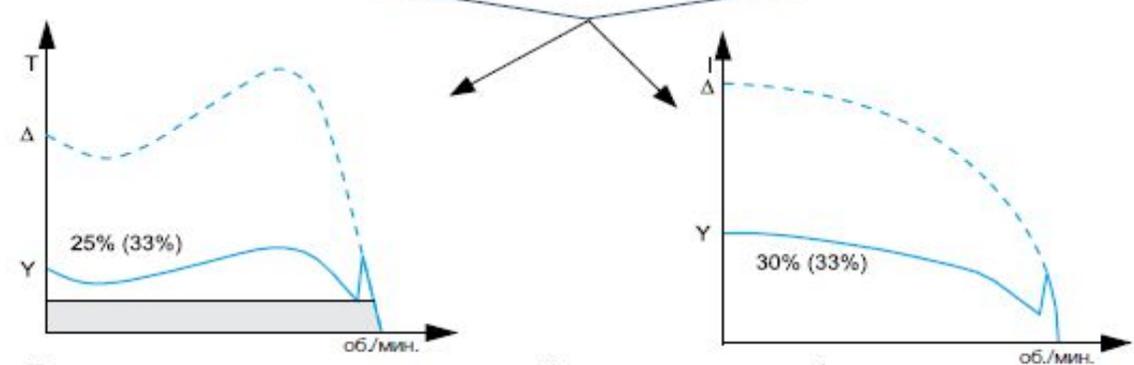
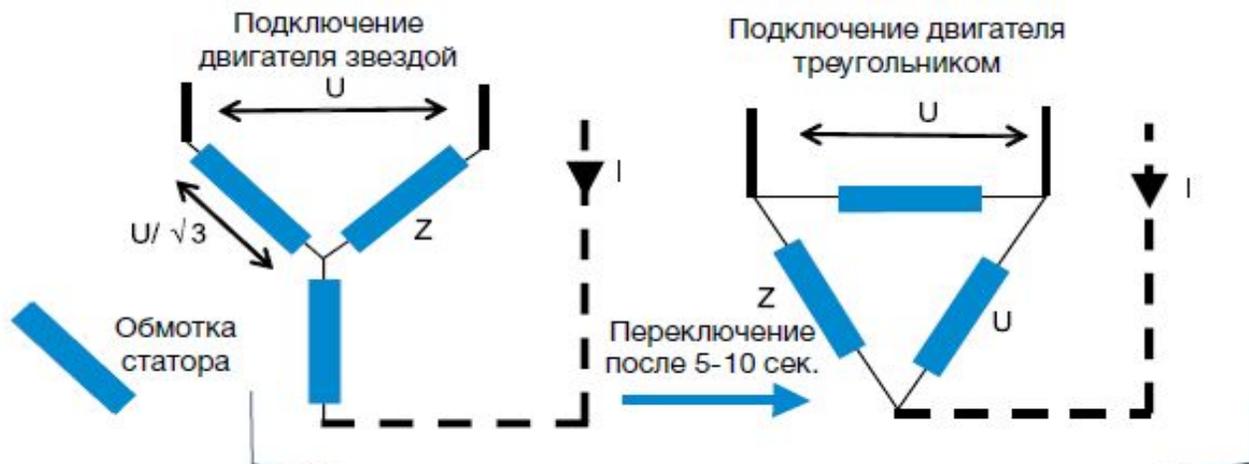
При подключении по схеме «треугольник» напряжение на каждой обмотке двигателя соответствует напряжению в сети. Ток двигателя разделяется между двумя параллельными обмотками с коэффициентом $1/\sqrt{3}$ от общего тока. Если сопротивление каждой обмотки двигателя равно Z , то сумма сопротивлений для параллельных обмоток – $Z/\sqrt{3}$.

Если двигатель подключен звездой (Y), его обмотки соединены последовательно. Полученное полное сопротивление равно $\sqrt{3} * Z$, в результате чего оно будет в $(\sqrt{3} * Z) / (Z/\sqrt{3}) = 3$, т. е. в 3 раза выше сопротивления при подключении по схеме «треугольник».

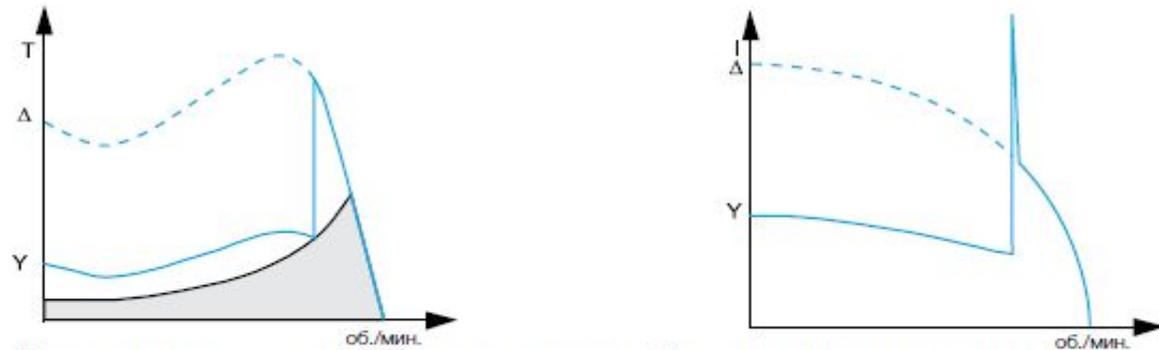
Поскольку уровень напряжения один и тот же, ток при подключении по схеме «звезда» будет составлять $1/3$ тока при подключении треугольником. Поэтому при пуске с помощью схемы звезда/треугольник ток при подключении звездой будет равен 33 % от тока двигателя, подключенного треугольником.

Так как напряжение сети неизменно, при соединении звездой напряжение снижается, т. к. напряжение на каждой обмотке двигателя будет составлять $1/\sqrt{3}$ линейного напряжения. Данное пониженное напряжение также приведет к снижению крутящего момента. Крутящий момент будет уменьшаться пропорционально квадрату напряжения, $[(1/\sqrt{3})^2 (1/\sqrt{3}) \approx 0,33]$ и в конечном итоге будет равен 33 % от крутящего момента, доступного при подключении по схеме «треугольник». Тем не менее, это сугубо теоретическое значение. На практике данное значение составляет 25 %, т. к. присутствуют дополнительные потери, а также другие особенности, связанные с эффективностью подключения по схеме «звезда».

Данный способ пуска наиболее эффективен при пуске без нагрузки или при очень слабо загруженном пуске, однако при пуске двигателя под большой нагрузкой его применение невозможно. Большая проблема при данном способе пуска появляется при пуске, например, насосов. Двигатель начнет разгоняться до 80-85 % от номинальной скорости до того, как момент нагрузки сравняется с крутящим моментом двигателя и ускорение прекратится. Для достижения номинальной скорости необходимо переключение на треугольник, которое часто приводит к высоким переходным значениям и большого по амплитуде пикового тока. В некоторых случаях пиковый ток может превышать значение тока при прямом пуске. Кроме того, как и при прямом пуске, единственным способом остановки двигателя при использовании схемы звезда-треугольник является прямой останов.



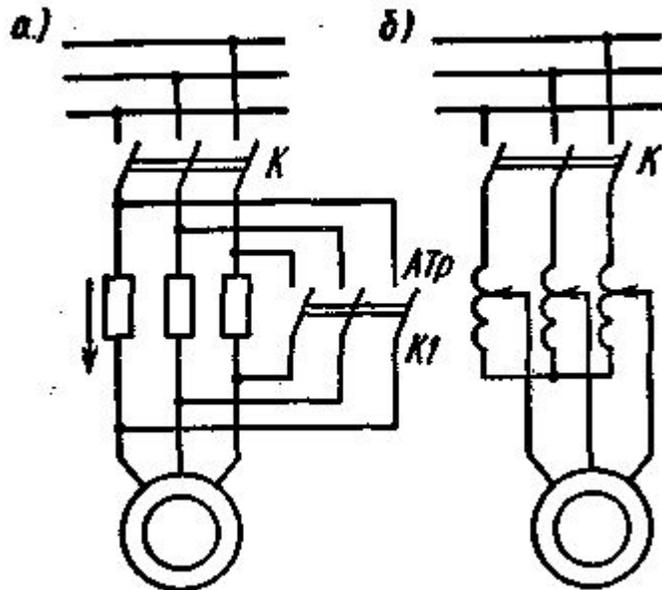
При использовании пускателя со схемой соединения звезда/треугольник сначала, когда нагрузка невелика, ток будет снижен



При запуске насоса могут возникнуть огромные броски тока при переключении

Пуск при пониженном напряжении. Такой пуск применяют для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором большой мощности, а также для двигателей средней мощности при недостаточно мощных электрических сетях. Понижение напряжения может осуществляться следующими путями:

а) включением в цепь обмотки статора на период пуска добавочных активных (резисторов) или реактивных (реакторов) сопротивлений (рис. а). При этом на указанных сопротивлениях создаются некоторые падения напряжения $\Delta U_{доб}$, пропорциональные пусковому току, вследствие чего к обмотке статора подается пониженное напряжение. По мере разгона двигателя снижается ЭДС E_2s , индуцированная в обмотке ротора, а следовательно, и пусковой ток.



Схемы включения асинхронного двигателя при пуске с понижением напряжения

В результате уменьшается падение напряжения $\Delta U_{\text{доб}}$ на указанных сопротивлениях и автоматически возрастает приложенное к двигателю напряжение. После окончания разгона добавочные резисторы или реакторы замыкаются накоротко контактором К1 ;

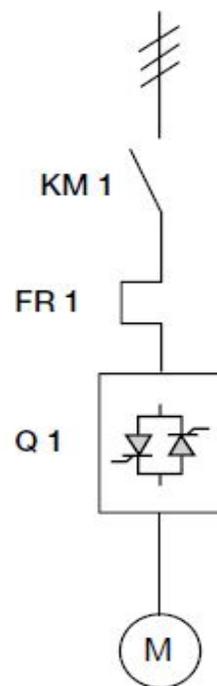
в) подключением двигателя к сети через понижающий автотрансформатор АТр (рис. б), который может иметь несколько ступеней, переключаемых в процессе пуска соответствующей аппаратурой.

Недостатком указанных методов пуска путем понижения напряжения является значительное уменьшение пускового и максимального моментов двигателя, которые пропорциональны квадрату приложенного напряжения, поэтому их можно использовать только при пуске двигателей без нагрузки.

ПУСК ТИРИСТОРНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ



Устройство плавного пуска



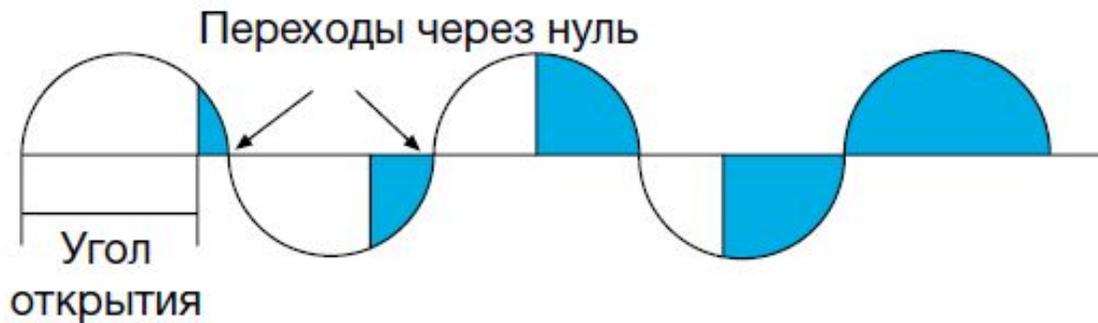
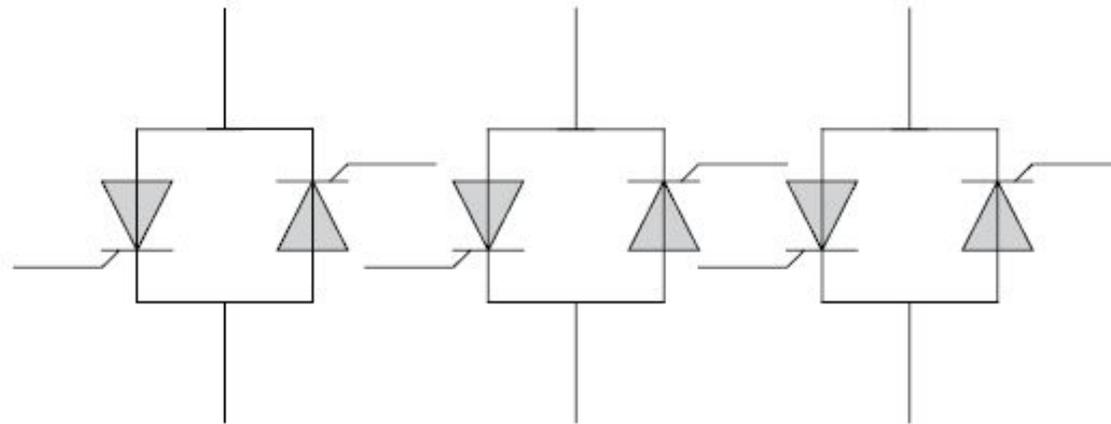
KM 1 Линейный контактор
FR 1 Реле перегрузки
Q 1 Устройство плавного пуска

Однолинейная схема для устройства плавного пуска. Устанавливать линейный контактор не обязательно, но желательно. Некоторые модели УПП имеют встроенное реле перегрузки. *

*) Устройства плавного пуска PSE, PSTX и PSTB обладают встроенной защитой от перегрузки.

- Устройство плавного пуска не изменяют частоту или скорость как это делает привод. Вместо этого оно плавно наращивает напряжение, которое подается на двигатель, от начального значения до полного. Первоначально напряжение на двигателе при пуске настолько мало, что можно регулировать только зазор между зубчатыми колесами или растяжимыми приводными ремнями и т. д., что позволяет избежать резких рывков при пуске. Постепенно напряжение и крутящий момент увеличиваются, а оборудование начинает ускоряться. Одним из преимуществ этого метода пуска является возможность точной регулировки крутящего момента в зависимости от потребностей, и наличия или отсутствия загрузки.

Использование устройства плавного пуска позволяет уменьшить пусковой ток и тем самым избежать падения напряжения в сети. Также при этом уменьшается пусковой крутящий момент и механические воздействия на оборудование, что снижает необходимость в обслуживании и ремонте. Как и привод, устройство плавного пуска может выполнять плавный останов, устраняя гидроудар и скачки давления в насосных системах и позволяя избежать повреждения хрупкого материала на ленточных конвейерах.

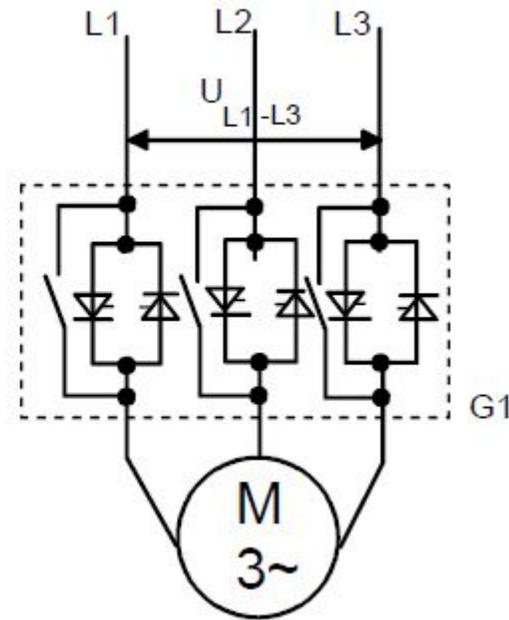
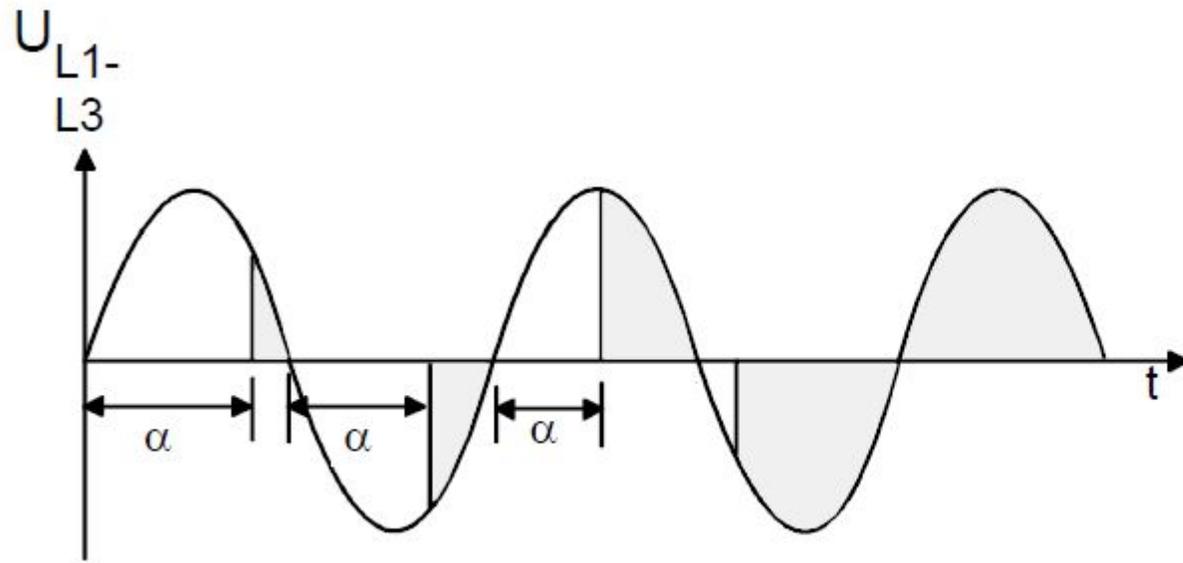


Пуск. В начале тиристоры пропускают часть напряжения, а затем увеличивают его в соответствии с установленным временем разгона.

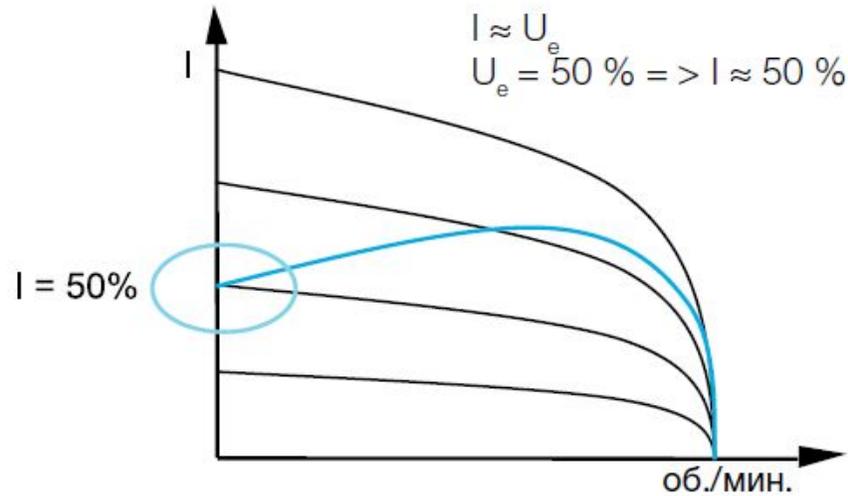
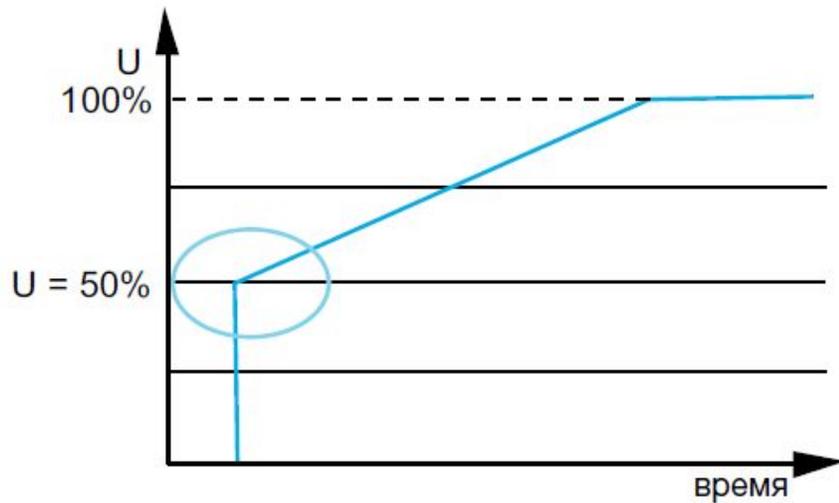
Останов. Тиристоры пропускают полное напряжение, а при начале плавного останова уменьшают его в соответствии с установленным временем останова.

- ▣ Выкл. Тиристор не проводит напряжение
- ▣ Вкл. Тиристор проводит напряжение

Принцип действия трехфазного устройства плавного пуска

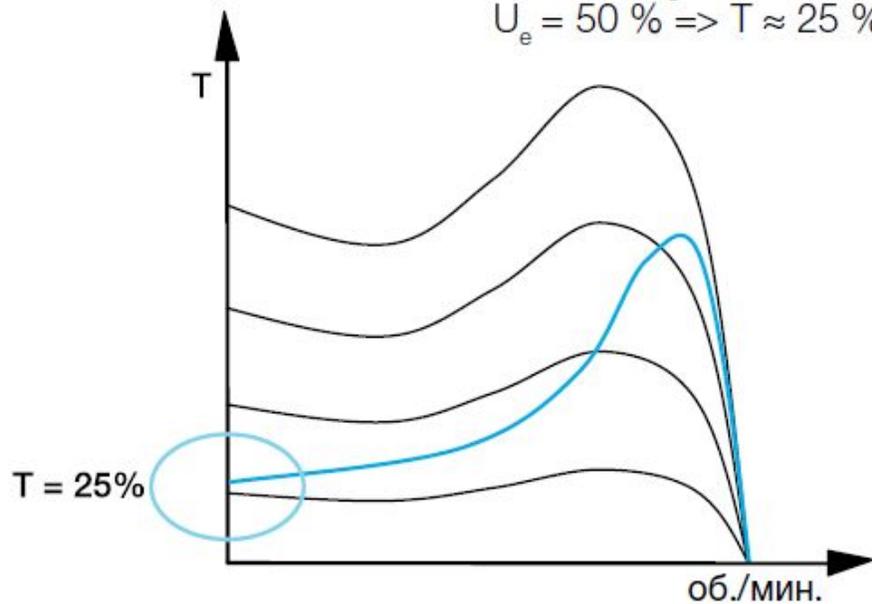


α - угол управления частотным преобразователем.



$$T \approx U \cdot I \approx U_e^2$$

$$U_e = 50\% \Rightarrow T \approx 25\%$$

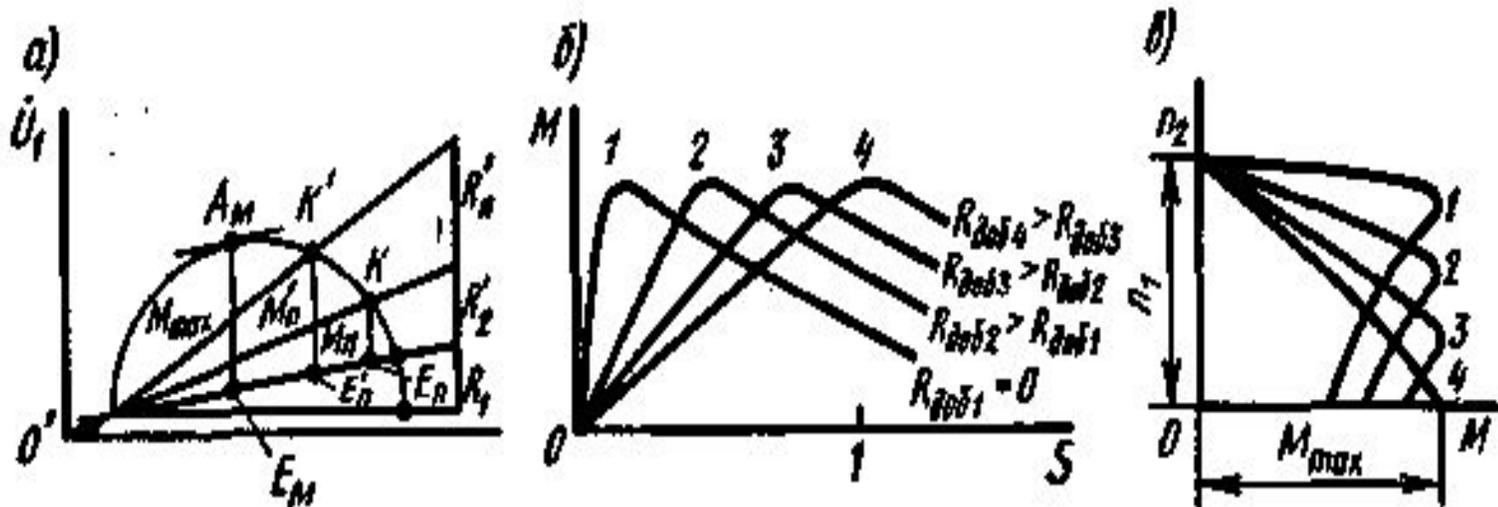


Пусковой ток снижается настолько, что это позволяет избежать просадки напряжения в сети. Уменьшается крутящий момент, за счет чего снижается механическое напряжение на оборудование, а также необходимость в обслуживании и ремонте, и увеличивается срок службы оборудования. Наконец с помощью плавного останова устраняется гидроудар в насосных системах и снижается нагрузка на оборудование.

Основные преимущества использования устройства плавного пуска

- ▶ Пуск с помощью реостата в цепи ротора. Этот способ применяют для пуска двигателей с фазным ротором. Если в цепь ротора включить пусковой реостат $R_{\text{п}}$, то активное сопротивление цепи ротора увеличится, вследствие чего точка K на круговой диаграмме (рис. а) сместится ближе к точке O (точка K'). При этом максимальный момент (отрезок $A_M E_M$) не изменяется, а пусковой момент возрастает от значения $M_{\text{п}}$ до $M'_{\text{п}}$, так как увеличивается отрезок $KE_{\text{п}}$, пропорциональный этому моменту. Одновременно повышается критическое скольжение, а поэтому зависимость $M = f(s)$ сдвигается в область больших скольжений, а зависимость $n_2 = f(M)$ — в область меньших частот вращения (рис. б и в, кривые 1–4).
- ▶ Для того чтобы пусковой момент был равен максимальному, необходимо так подобрать сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$, чтобы точка K' находилась вблизи точки A_M . Это условие выполняется при $R'_{\text{п}} + R'_2 + R_1 \approx X_1 + X'_2$. Включение сопротивления R уменьшает также и пусковой ток двигателя, так как в этом случае
- ▶
$$I_n = U_1 / \sqrt{(R'_n + R'_2 + R_1)^2 + (X_1 + X'_2)^2}.$$

- ▶ Пусковой реостат имеет обычно три – шесть ступеней (рис. а), что позволяет в процессе пуска постепенно уменьшать пусковое сопротивление, поддерживая высокое значение пуско-вого момента двигателя. Сначала двигатель пускается по характеристике (рис.б), соответствующей сопротивлению



- ▶ Круговая диаграмма при включении реостата в цепь ротора асинхронного двигателя и получаемые при этом механические характеристики

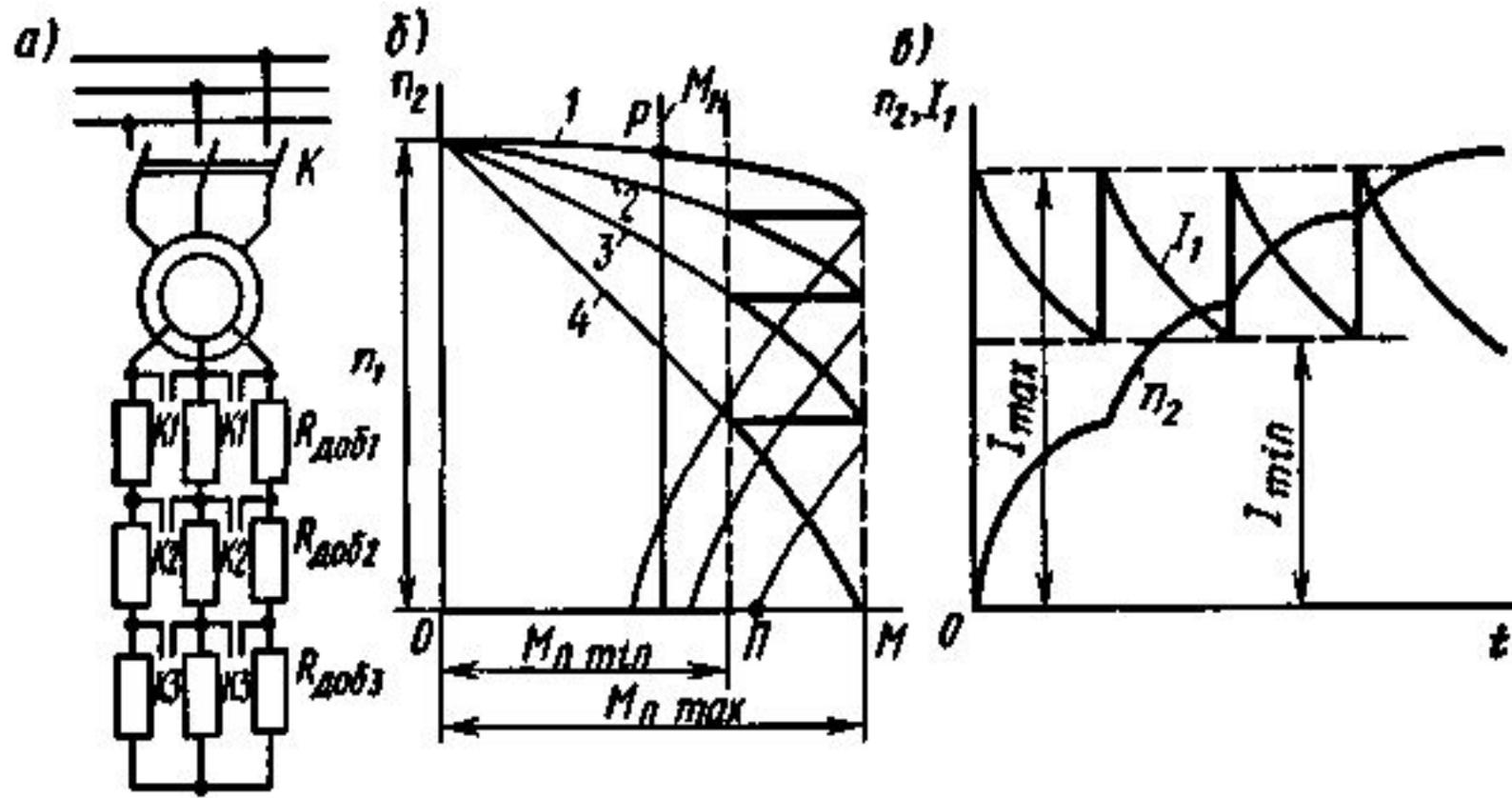


Рис. Схема реостатного пуска асинхронного двигателя

- ▶ пускового реостата $R_{п3} = R_{доб1} + R_{доб2} + R_{доб3}$, и развивает вращающий момент $M_{п.маx}$. По мере увеличения частоты вращения вращающий момент M уменьшается и может стать меньше некоторого момента $M_{п.мин}$. Поэтому при $M = M_{п.мин}$ часть пускового реостата $R_{доб3}$ выводят, замыкая контактор $K3$. Вращающий момент при этом мгновенно возрастает до $M_{п.маx}$, а затем с увеличением частоты вращения изменяется по характеристике 3, соответствующей сопротивлению реостата $R_{п2} = R_{доб1} + R_{доб2}$. При дальнейшем уменьшении момента M до $M_{п.мин}$ часть реостата $R_{доб2}$ снова выключается контактором $K2$ и двигатель переходит на работу по характеристике 2, соответствующей сопротивлению $R_{п1} = R_{доб1}$. Таким образом, при постепенном (ступенчатом) уменьшении сопротивления пускового реостата вращающий момент двигателя изменяется от $M_{п.маx}$ до $M_{п.мин}$, а частота вращения возрастает по ломаной кривой, показанной на рис. б, жирной линией.

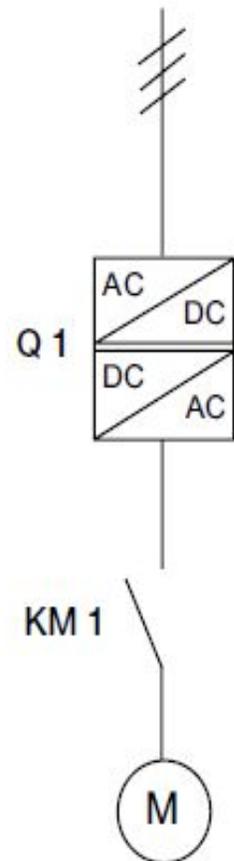
- ▶ В конце пуска пусковой реостат полностью выводят контактором $K1$, обмотка ротора замыкается накоротко, и двигатель переходит на работу по естественной характеристике 1. Выключение отдельных ступеней пускового реостата в процессе разгона двигателя может осуществляться вручную или автоматически. Таким образом, посредством реостата, включенного в цепь ротора, можно осуществить пуск двигателя при $M_{\text{п}} \approx M_{\text{max}}$ и резко уменьшить пусковой ток.
- ▶ На рис. (в), в показан характер изменения тока I_1 и частоты вращения n_2 при пуске двигателя рассматриваемым способом. Ток также изменяется по ломаной кривой между двумя крайними значениями I_{max} и I_{min} .
- ▶ Недостатком данного способа является его относительная сложность и необходимость применения более дорогих двигателей с фазным ротором. Кроме того, указанные двигатели имеют несколько худшие рабочие характеристики, чем двигатели с короткозамкнутым ротором такой же мощности (кривые η и $\cos \varphi_1$ проходят ниже). В связи с этим двигатели с фазным ротором применяют только при тяжелых условиях пуска, когда необходимо развивать максимально возможный пусковой момент.

▶

ПУСК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ



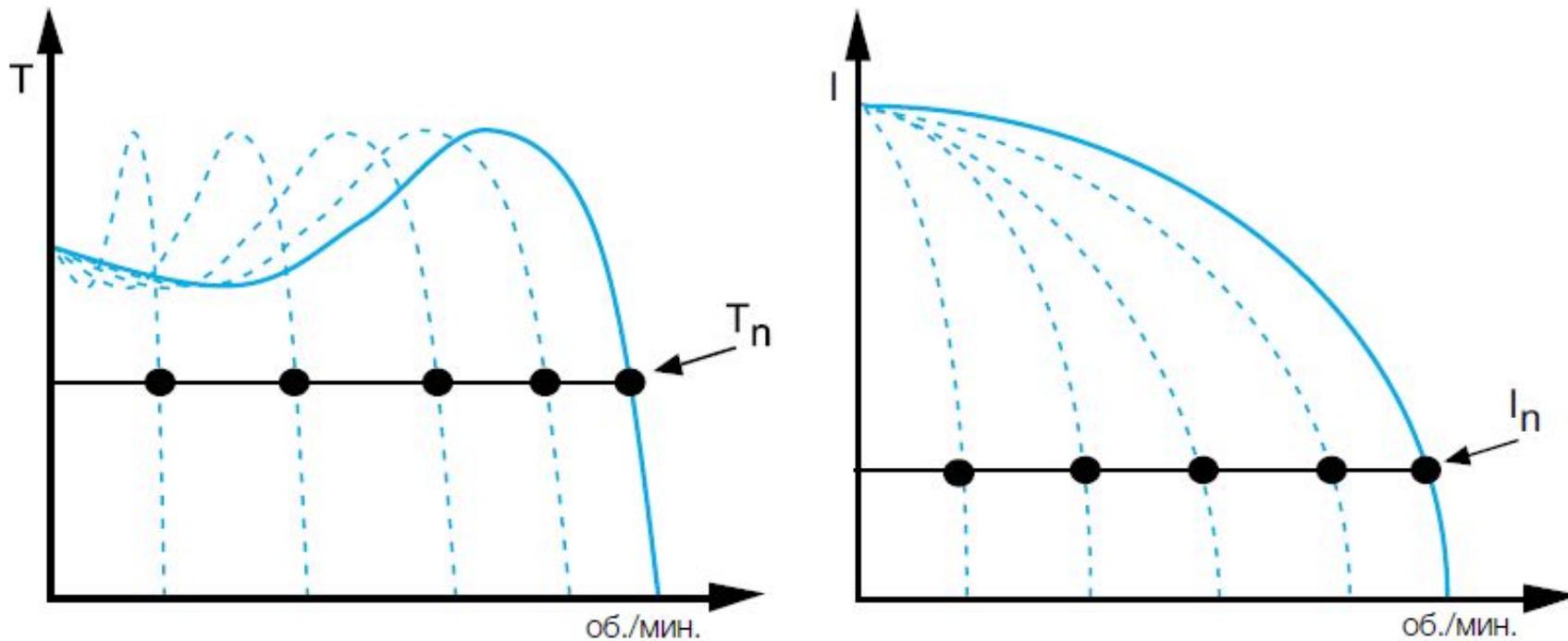
Преобразователь частоты



KM 1 Линейный контактор
Q 1 Преобразователь частоты

Однолинейная схема для преобразователя частоты

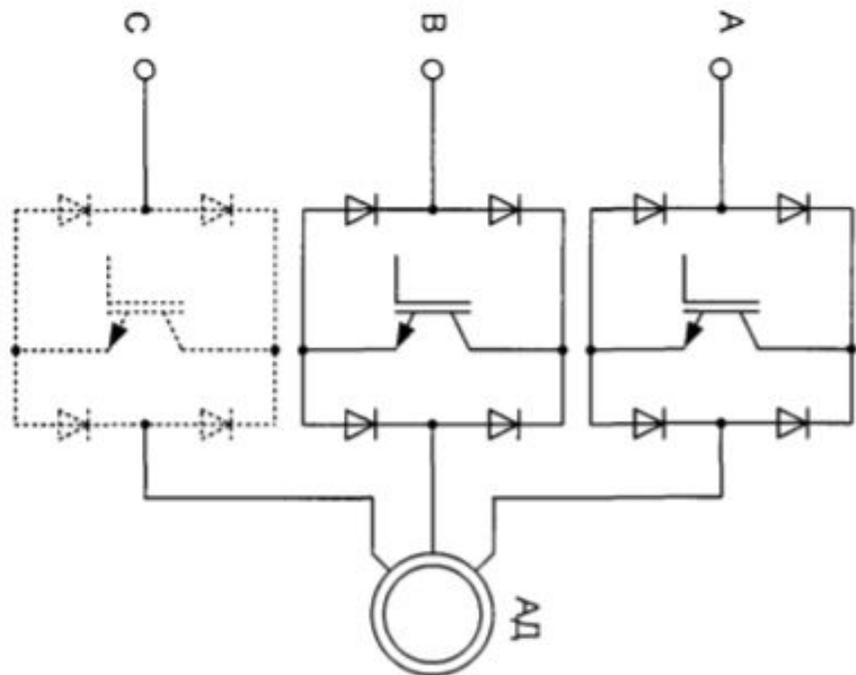
Преобразователь частоты также иногда называют VSD (приводом с регулируемой скоростью вращения), VFD (приводом с регулируемой частотой вращения) или просто приводом. Он состоит из двух основных блоков, один из которых преобразует переменный ток (50 или 60 Гц) в постоянный, а второй — преобразует постоянный обратно в переменный, но с частотой 0-250 Гц. Управляя частотой тока, привод может регулировать скорость двигателя. Во время пуска привод увеличивает частоту от 0 Гц до частоты сети (50 или 60 Гц). Благодаря постепенному увеличению частоты можно считать, что двигатель работает на своей номинальной скорости для данной частоты. Кроме того, поскольку можно считать, что двигатель работает на своей номинальной скорости, номинальный крутящий момент доступен сразу, а ток будет приблизительно равен номинальному. Как правило, привод отключается, если ток превышает номинальный в 1,5 раза. При использовании привода для управления двигателем также можно выполнить плавный останов. Это особенно полезно при останове насосов, т. к. позволяет избежать гидравлического удара, а также повреждения конвейерных лент.



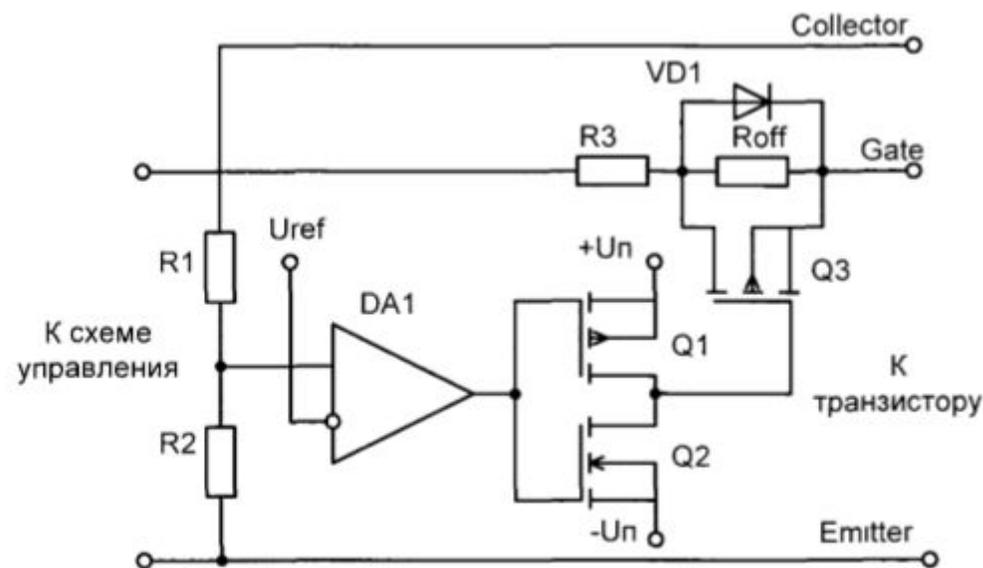
Частотный преобразователь даже во время пуска работает на номинальном токе и крутящем моменте.

Недостатком частотного пуска двигателей является дороговизна преобразователей частоты особенно, больших мощностей а так же сложность эксплуатацией самого оборудования. Поэтому только для пуска двигателей применять преобразователей частоты не рекомендуется если не требуется регулирования скорости двигателей

Пуск устройством с широтно-импульсной модуляцией



Силовая схема устройства



Драйвер IGBT транзистора

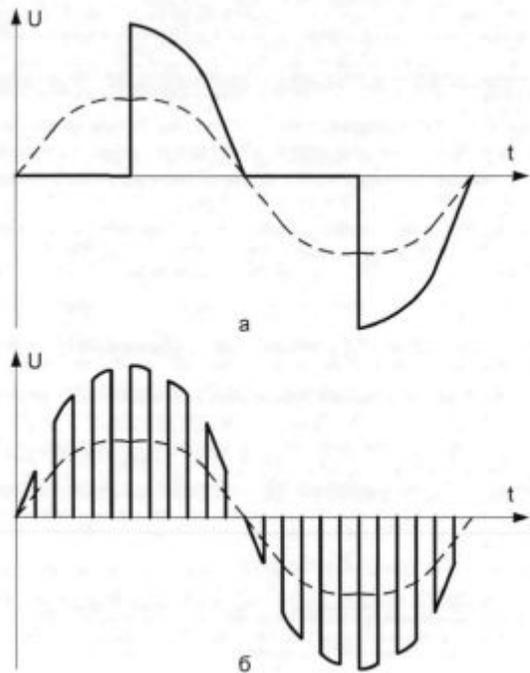


Рис. 1.5 – Регулирование напряжения фазовым способом (а) и широтно-импульсным (б)

Подобный способ управления ключами улучшает гармонический состав токов и уменьшает потери в двигателе. Кроме того, применение высокочастотной импульсной модуляции обеспечивает высокую точность ограничения тока статора, так как отключение статора от сети происходит строго в момент превышения током заданного значения. В отличие от фазового управления, где отключение происходит только при естественной коммутации тиристоров.

- ▶ Это устройство пуска современный, надежный, прост в управлении. Включает в себя современный силовой электроники, например IGBT - транзисторы, GTO-тиристоры и т.д. На данный момент автором подготовлена заявка на полезную модель или на изобретение устройство плавного пуска с широтно-импульсной модуляцией

- ▶ Устройства плавного пуска зарубежных фирм широко распространенных в Казахстане: ABB, Shneider electric и.т.д
- ▶ Устройства плавного пуска ABB: **PSS-PST (B) до 1810 А, SSM**
- ▶ Устройства плавного пуска Shneider electric : Altistart 01, Altistart 22, Altistart 48

Устройства плавного пуска PSS-PST (B) до 1810 А

