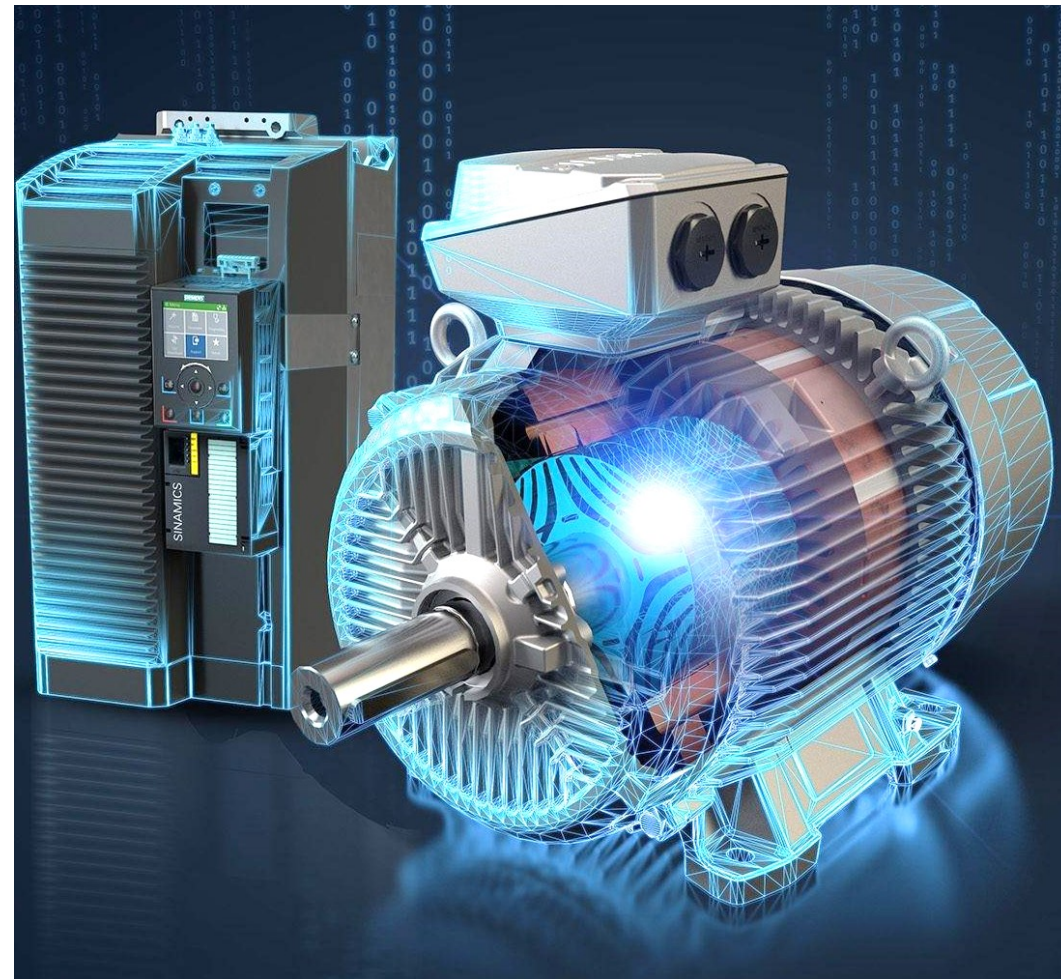


Электронные системы наземных транспортно- технологических средств

Лекция 1 Механика электропривода

Автор:

Пузаков Андрей Владимирович, канд. техн. наук,
доцент кафедры технической эксплуатации и
ремонта автомобилей



План лекции:

1. Структура электропривода
2. Классификация электроприводов
3. Механические характеристики производственных механизмов
4. Механические характеристики электрических двигателей
5. Регулирование частоты вращения ДПТ параллельного возбуждения
6. Тормозные режимы двигателей постоянного тока
7. Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения
8. Режимы торможения ДПТ последовательного возбуждения
9. Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей
10. Тормозные режимы асинхронных электродвигателей
11. Пуск в ход синхронного двигателя
12. Заключение
13. Вопросы для самоконтроля
14. Литература

Цель лекции: изучение классификационных признаков электроприводов; механических характеристик производственных механизмов и электрических двигателей; способов пуска, регулирования частоты вращения и электрического торможения электроприводов постоянного и переменного тока.

В результате изучения лекции обучающийся должен:

знать:

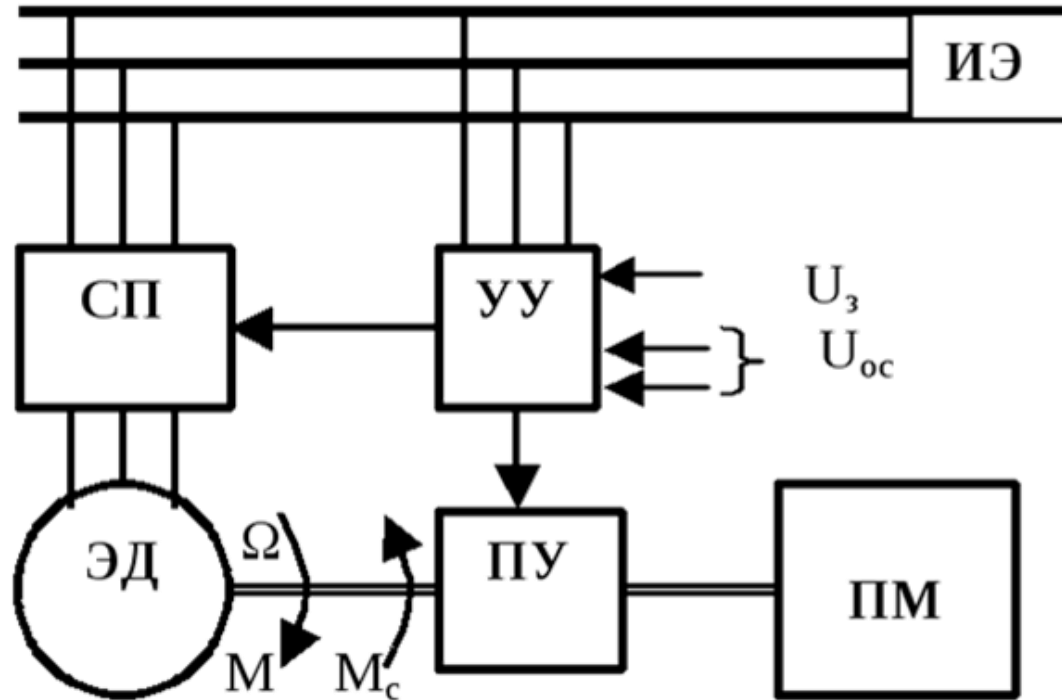
- принципы классификации электроприводов;
- механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей;
- способы организации пуска, регулирования частоты вращения и электрического торможения электроприводов постоянного и переменного тока;

уметь:

- выбирать способы пуска, регулирования частоты вращения и электрического торможения по критериям экономичности и технологичности с учетом ограничений, накладываемых производственными механизмами.

Структура электропривода

Электропривод – электромеханическая система, состоящая из *управляющего, преобразовательного, электродвигательного и передаточного* устройств, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и управления ею.



При работе производственной машины (ПМ) электродвигатель (ЭД) получает электроэнергию от источника энергии (ИЭ) через силовой преобразователь (СП) и преобразует её в механическую энергию.

Управляет работой электропривода устройство управления (УУ). Для этого на него поступают сигналы задания режима работы электропривода (U_3) и сигналы обратных связей (U_{oc}) от датчиков, контролирующих работу электропривода. Силовой преобразователь, электродвигатель и устройство управления образует **электрическую часть** электропривода.

Механическая энергия от электродвигателя передается к исполнительным органам производственной машины через **передаточное устройство (ПУ)**, которое преобразует параметры механического движения (скорость, момент, вид движения).

Вращающийся ротор, передаточное устройство и движущиеся части производственной машины составляют **механическую часть** электропривода.

Классификация электроприводов

С учетом исторического развития и с точки зрения *способов распределения механической энергии* электроприводы можно разделить на три основных типа:

- 1) **групповой** (передача энергии от одного двигателя к нескольким рабочим машинам осуществляется с помощью нескольких трансмиссий);
- 2) **индивидуальный** (на каждом рабочем механизме свой двигатель);

Преимущества:

- производственные помещения не загромождаются тяжелыми трансмиссиями;
- улучшаются условия труда;
- повышается производительность из-за облегчения управления отдельными механизмами;
- улучшаются энергетические показатели.

- 3) **взаимосвязанный** (содержит два или несколько электрически или механически связанных между собой электродвигателя, при работе которых поддерживается заданное соотношение или равенство скоростей, нагрузок или положение исполнительных органов рабочей машины).

Пример:

- привод цепного конвейера;
- привод прокатных станов в металлургическом производстве, в производстве синтетических пленок, бумаги.

Классификация электроприводов

По степени управления:

- нерегулируемый электропривод;
- регулируемый электропривод (параметры привода могут изменяться под воздействием управляющего воздействия);
- программно-управляемый электропривод (управляемый в соответствии с заданной программой);
- следящий электропривод (автоматически отработывающий перемещение исполнительного механизма с определенной точностью);
- адаптивный электропривод (автоматически избирающий структуру или параметры системы управления при изменении условий работы).

По уровню автоматизации:

- неавтоматизированный (ручное управление);
- автоматизированный (автоматическое регулирование параметров);
- автоматический (управляющее воздействие вырабатывается автоматическим устройством без участия оператора).

По роду передаточного устройства:

- редукторный;
- безредукторный.

По роду тока:

- электроприводы постоянного тока;
- электроприводы переменного тока.

По виду движения: электроприводы могут обеспечивать

- вращательное однонаправленное движение;
- вращательное реверсивное движение;
- поступательное реверсивное движение.

Механические характеристики производственных механизмов

Зависимость между приведенными к валу двигателя скоростью и моментом сопротивления $\omega = f(M_c)$ называют **механической характеристикой производственного механизма**.

Для анализа и классификации различных механических характеристик воспользуемся следующей *эмпирической формулой*

$$M_c = M_0 + (M_{c_{\text{НОМ}}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{НОМ}}} \right)^x,$$

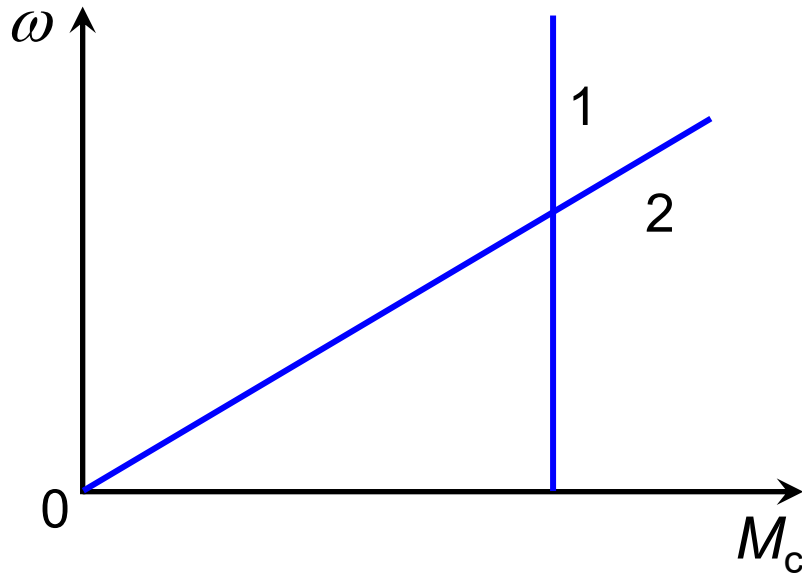
где M_c - момент сопротивления механизма при скорости ω ;

M_0 - момент сопротивления трения в движущихся частях механизма;

$M_{c_{\text{НОМ}}}$ - момент сопротивления механизма при скорости $\omega_{\text{НОМ}}$.

Приведенная формула позволяет классифицировать механические характеристики производственных механизмов *на следующие основные категории:*

1. Механическая характеристика, независящая от скорости ($\alpha = 0$).



При этом $M_c = M_{cНОМ}$

Такой характеристикой обладают:

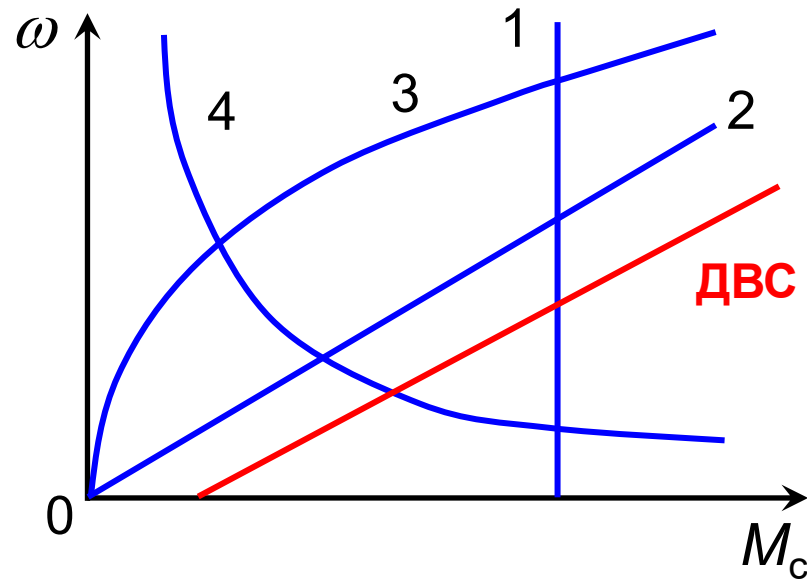
- подъемные краны;
- лебедки;
- механизмы подачи металлорежущих станков;
- конвейеры и т. д.

2. Линейно-возрастающая механическая характеристика ($\alpha = 1$).

В этом случае *момент сопротивления линейно зависит от скорости* (на рисунке $M_0 = 0$)

Такая характеристика получится в приводе генератора постоянного тока независимого возбуждения, при его работе на постоянный внешний резистор.

3. Нелинейно-возрастающая (параболическая) механическая характеристика ($\alpha = 2$).



В этом случае *момент сопротивления зависит от квадрата скорости.*

Такие механизмы называют иногда механизмами с **вентиляторным моментом.**

К ним относятся:

- вентиляторы;
- центробежные насосы;
- гребные винты и т.д.

4. Нелинейно-спадающая (гиперболическая) механическая характеристика ($\alpha = -1$).

Момент сопротивления изменяется обратно пропорционально скорости, а мощность, потребляемая механизмом, остается постоянной.

Такой характеристикой обладают некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлорежущие станки.

Механические характеристики электрических двигателей

Механической характеристикой электродвигателя называется *зависимость его угловой скорости от вращающего момента*, то есть $\omega = f(M)$.

Почти все электродвигатели обладают падающей механической характеристикой.

Степень изменения угловой скорости с изменением момента характеризуется **жесткостью механических характеристик**:

$$\beta = \frac{M_2 - M_1}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}$$

Жесткость механических характеристик – это отношение разности электромагнитных моментов двигателя к соответствующей разности угловых скоростей.

Обычно на рабочих участках механической характеристики электрические двигатели имеют *отрицательную жесткость* т. е. $\beta < 0$.

В случае нелинейных механических характеристик жесткость определяется в каждой точке, как производная момента по угловой скорости

$$\beta = \frac{\partial M}{\partial \omega}$$

Существует **четыре** основных категории механических характеристик электрических двигателей:

1. Абсолютно жесткая характеристика ($\beta = \infty$, т.е. $\omega = const$)

Такой характеристикой обладают *синхронные двигатели*.

2. Жесткая механическая характеристика

(незначительные изменения ω при изменении M)

Такой характеристикой обладают:

- ДПТ независимого и параллельного возбуждения;
- асинхронные двигатели в пределах рабочей части характеристики.

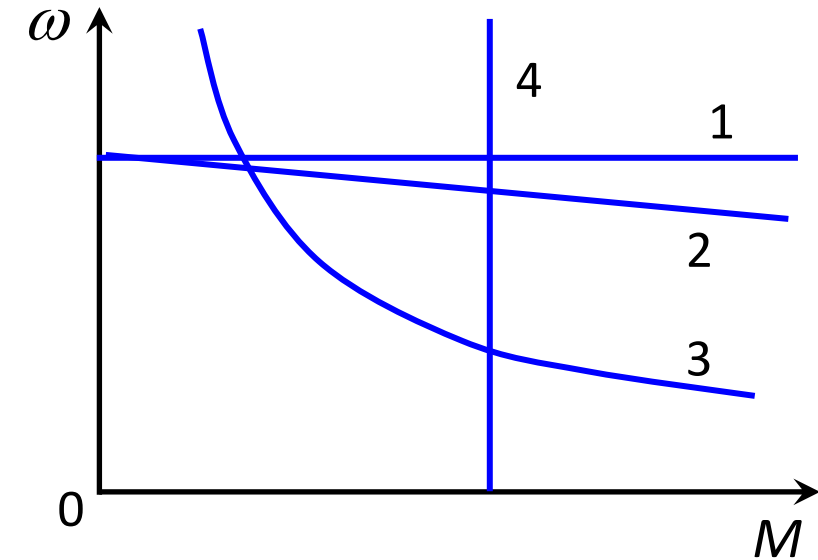
3. Мягкая механическая характеристика

(при изменении момента M скорость ω значительно изменяется)

Такой характеристикой обладают ДПТ последовательного возбуждения.

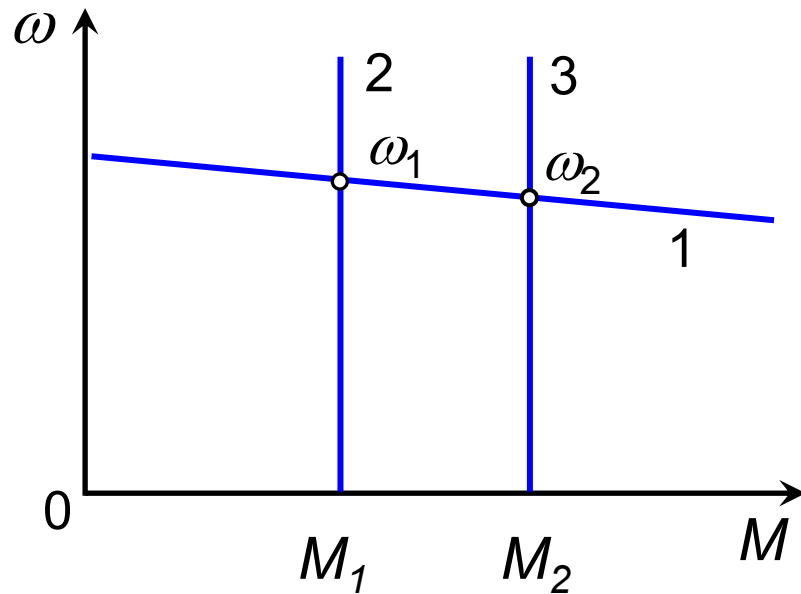
4. Абсолютно мягкая механическая характеристика ($\beta = 0$, т.е. при изменении скорости ω момент двигателя остается неизменным: $M = const$)

Такой характеристикой обладают ДПТ независимого возбуждения при питании их от источника тока, т. е. при $I_a = const$.



Работа электропривода в установившемся режиме

Работе электродвигателя и производственного механизма в **установившемся режиме** соответствует равновесие момента сопротивления механизма и вращающего момента двигателя, т. е. $M_c = M$.



Изменение момента сопротивления на валу ЭД приводит к тому, что скорость двигателя ω_d и момент M , который он развивает, автоматически изменяются и привод будет продолжать работать при другой скорости ω_2 и с новым значением момента M_2 .

В неэлектрических двигателях для восстановления равновесия используются специальные регуляторы, которые воздействуют на источник энергии: увеличивая подачу пара, топлива и т. д.

В электрическом двигателе роль **автоматического регулятора** выполняет **ЭДС** двигателя.

Рассмотренные условия работы электропривода в установившемся режиме характеризуют **статическую устойчивость**, когда изменения ω и M происходят относительно медленно.

Под **статической устойчивостью** понимают такое состояние установившегося режима, когда при случайно возникшем отклонении скорости привод **возвращается** в точку установившегося режима.

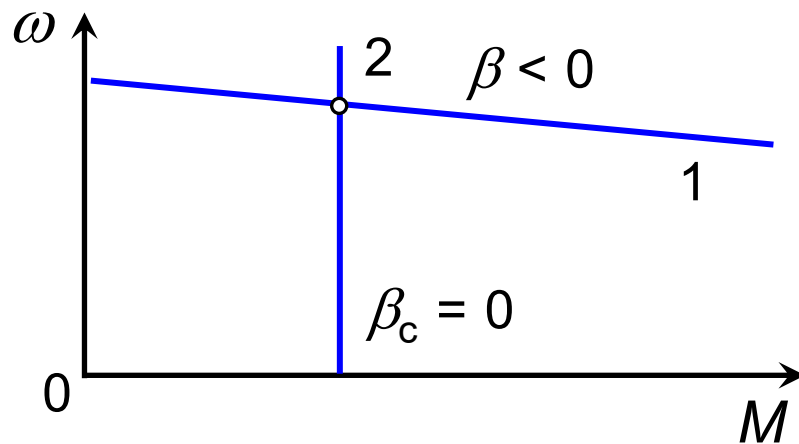
Работа электропривода в установившемся режиме

При **неустойчивом движении** любое, даже самое малое отклонение скорости от установившегося режима приводит к изменению состояния привода – он *не возвращается* в точку устойчивого режима.

Привод статически устойчив, если в точке установившегося режима выполняется условие:

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} - \frac{\partial M_c}{\partial \omega} < 0 \quad \text{или} \quad \beta - \beta_c < 0.$$

При постоянном моменте нагрузки ($\beta_c = 0$) статическая устойчивость определяется *только жесткостью механической характеристики двигателя*



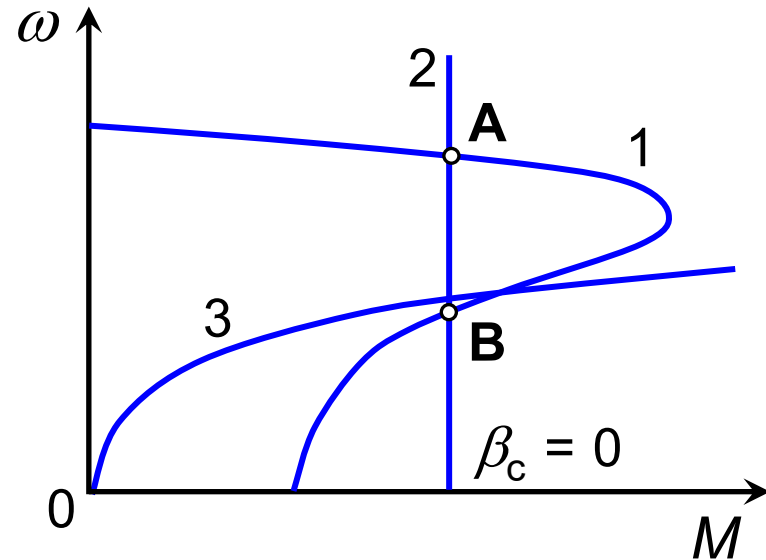
Двигатель постоянного тока независимого возбуждения ($\beta < 0$) обеспечивает *устойчивую работу* при постоянном моменте нагрузки.

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

В точке **A** ($\beta < 0$) двигатель будет работать устойчиво, а в точке **B** ($\beta > 0$) – неустойчиво.

Однако, при работе асинхронного двигателя на нагрузку с **вентиляторной характеристикой** (кривая **3**) работа электропривода во всех точках механической характеристики двигателя будет устойчивой т. к. будет выполняться условие $\beta - \beta_c < 0$.

Обычно при проектировании электропривода механическая характеристика производственного механизма уже задана.



Поэтому для получения **устойчивой работы** электропривода в установившемся режиме при определенных значениях скорости ω и момента нагрузки M_c , **необходимо подбирать механическую характеристику электродвигателя** соответствующей формы

Пуск двигателя постоянного тока

Из уравнения напряжений

$$I_a = \frac{U - E_a}{\sum r_a}$$

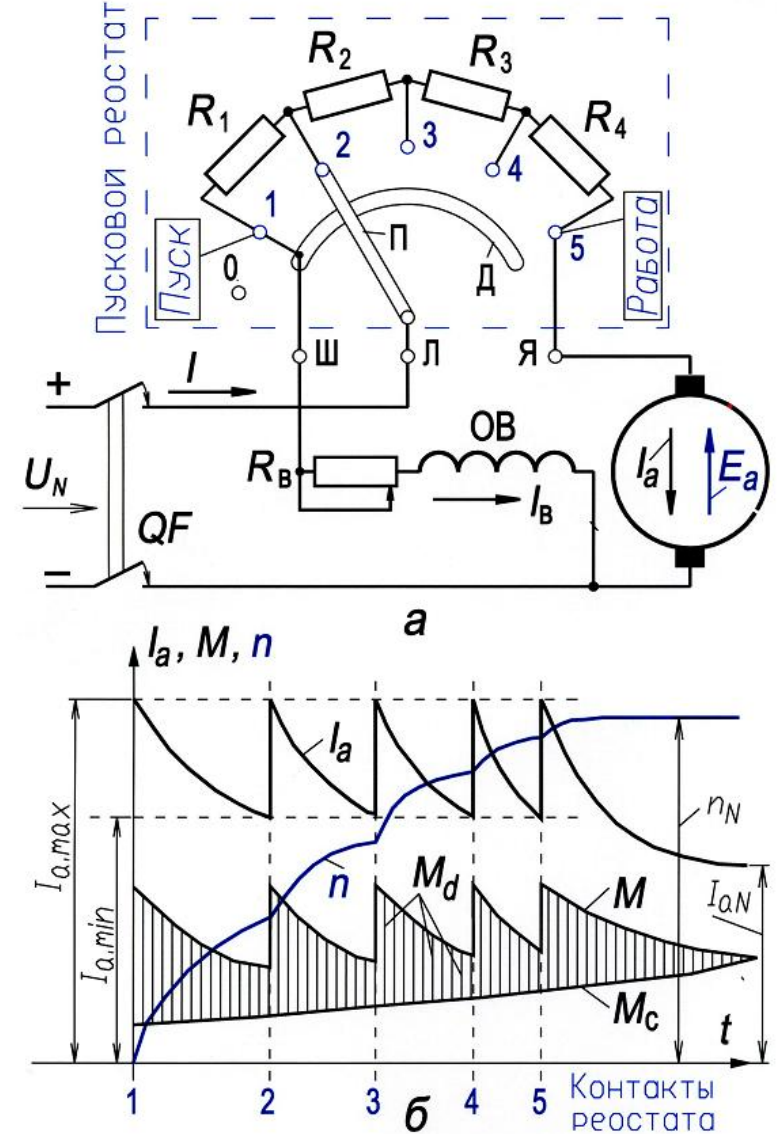
В начальный момент пуска
 $n = 0 \Rightarrow E_a = 0$ и

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{\sum r_a}$$

$$I_{\text{пуск}} = (10 \dots 20) I_{a_{\text{НОМ}}}$$

В цепь якоря включают **пусковой реостат** $r_{\text{пр}}$

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{\sum r_a + r_{\text{пр}}} \approx (2 \div 3) I_{a_{\text{НОМ}}}$$



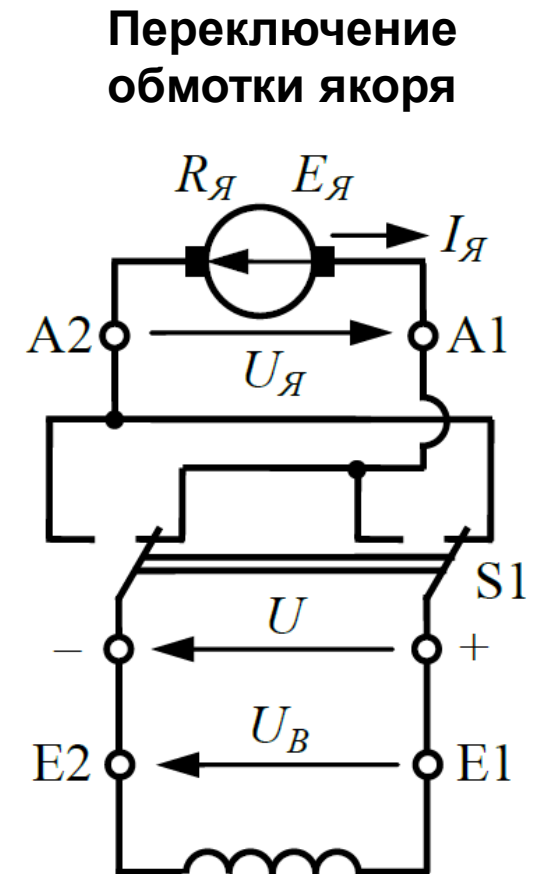
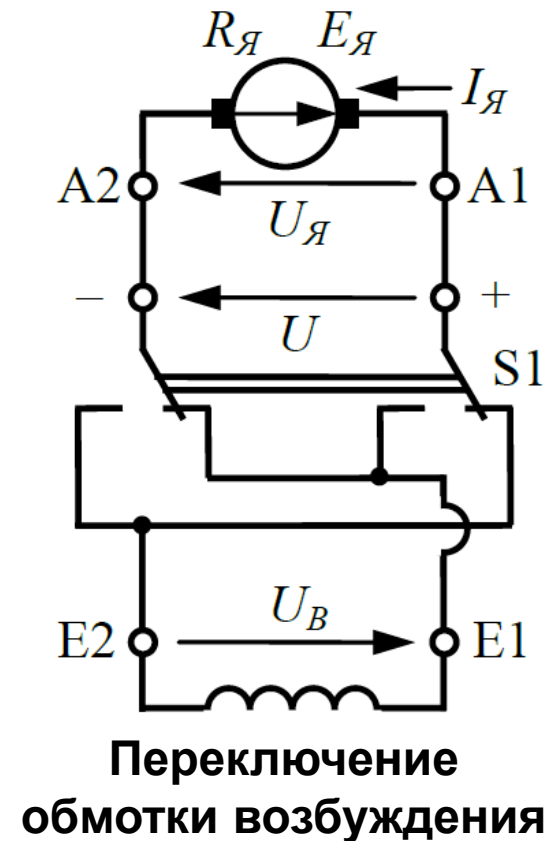
Реверс двигателя постоянного тока

Изменение направления вращения двигателя называется **реверсом**.

В двигательном режиме вращение якоря возникает в результате действия электромагнитного момента и совпадает с ним по направлению. Следовательно, изменить направление действия (знак) электромагнитного момента и направление вращения можно, либо изменив **направление магнитного потока**, либо **направление тока в обмотке якоря**.

Для этого необходимо поменять между собой выводы подключения **обмотки возбуждения**, либо **обмотки якоря**.

Очевидно, что изменение подключения выводов обеих обмоток **не приведёт** к изменению направления вращения.



Регулирование частоты вращения ДПТ параллельного возбуждения

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения.

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

Следовательно, регулировать частоту вращения двигателя можно тремя способами:

- изменением сопротивления в цепи якоря r_d ;
- изменением основного магнитного потока Φ ;
- изменением напряжения в цепи якоря U .

Механические характеристики двигателя, полученные при номинальных значениях напряжения на обмотках якоря и возбуждения и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря, называют *естественными*.

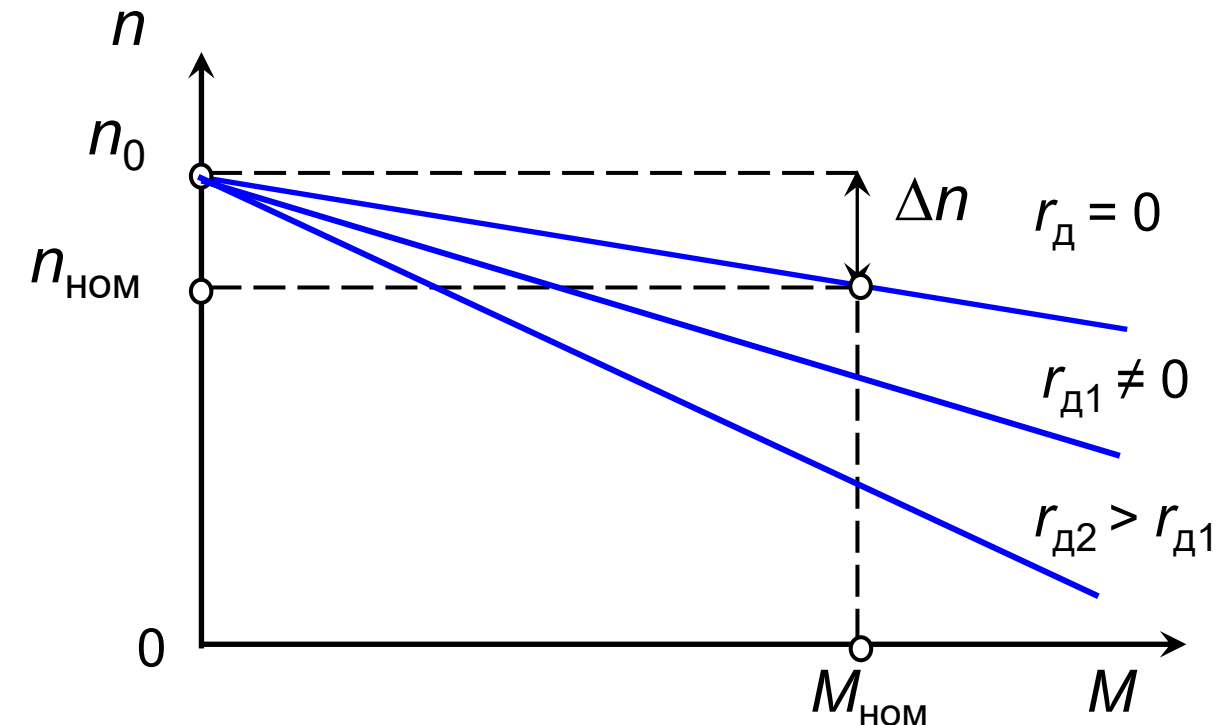
Если же хотя бы один из перечисленных параметров двигателя изменен (напряжение на обмотках якоря или возбуждения отличаются от номинальных значений, или же изменено сопротивление в цепи якоря), то механические характеристики называются *искусственными*.

Искусственные механические характеристики, полученные введением в цепь якоря добавочного сопротивления r_d , называют также *реостатными*.

Уравнение **механической характеристики** двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения.

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

$$n_0 = \text{const}, \quad \Delta n \uparrow$$



При введении резисторов в цепь якоря частота вращения уменьшается.

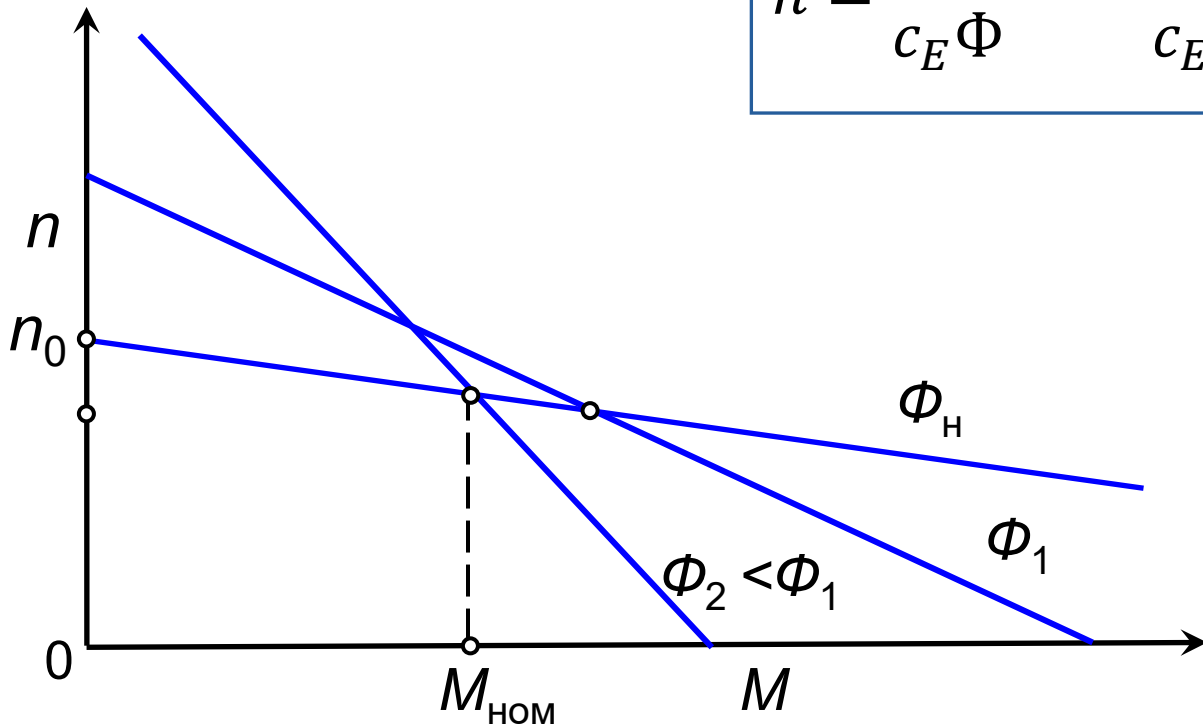
Данный способ неэкономичен и применяется при кратковременной работе на пониженных скоростях.

Изменение основного магнитного потока

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения.

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

При ослаблении Φ
 $n_0 \uparrow, \quad \Delta n \uparrow$



Регулирование скорости двигателя изменением магнитного потока экономично, так как осуществляется в маломощной цепи обмотки возбуждения.

Магнитный поток уменьшается по сравнению с номинальным за счет снижения тока возбуждения.

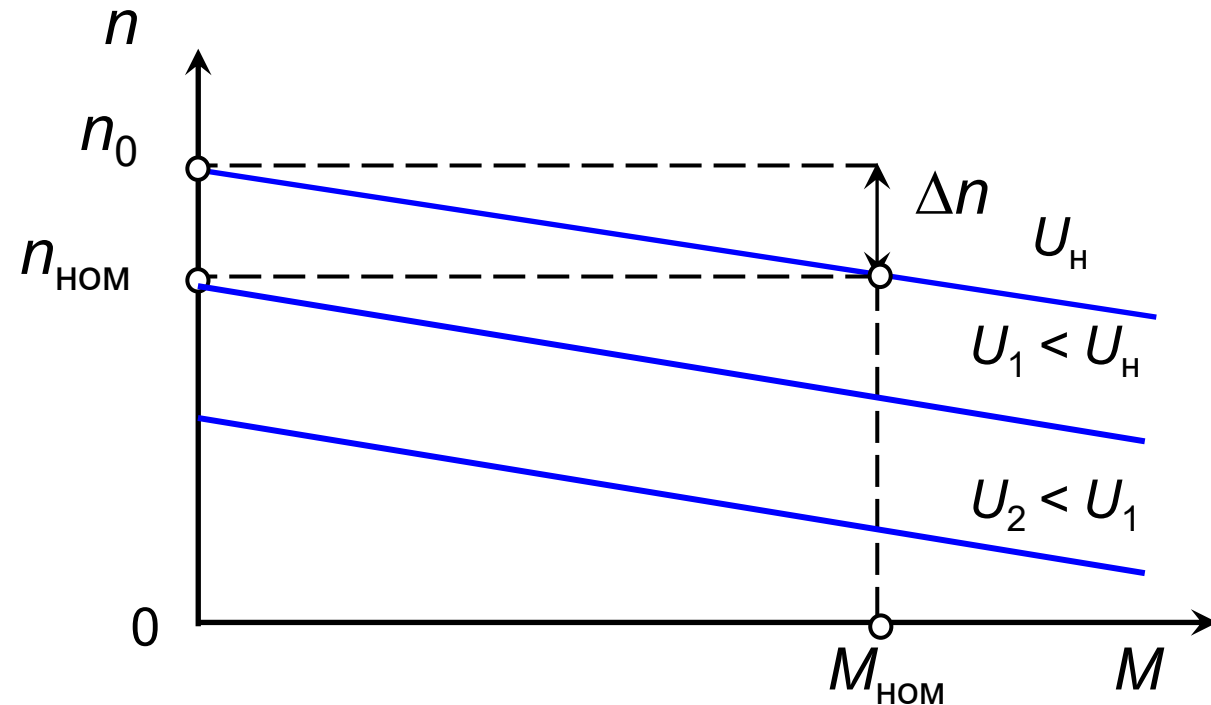
Для регулирования тока в цепь обмотки возбуждения включают дополнительный резистор.

Изменение напряжения в цепи якоря

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного тока параллельного (независимого) возбуждения.

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n$$

При снижении U
 $n_0 \downarrow$, $\Delta n = const$



При изменении напряжения обмотки якоря пропорционально изменяется скорость идеального холостого хода, а искусственные характеристики остаются линейными и параллельными друг другу.

Тормозные режимы двигателей постоянного тока

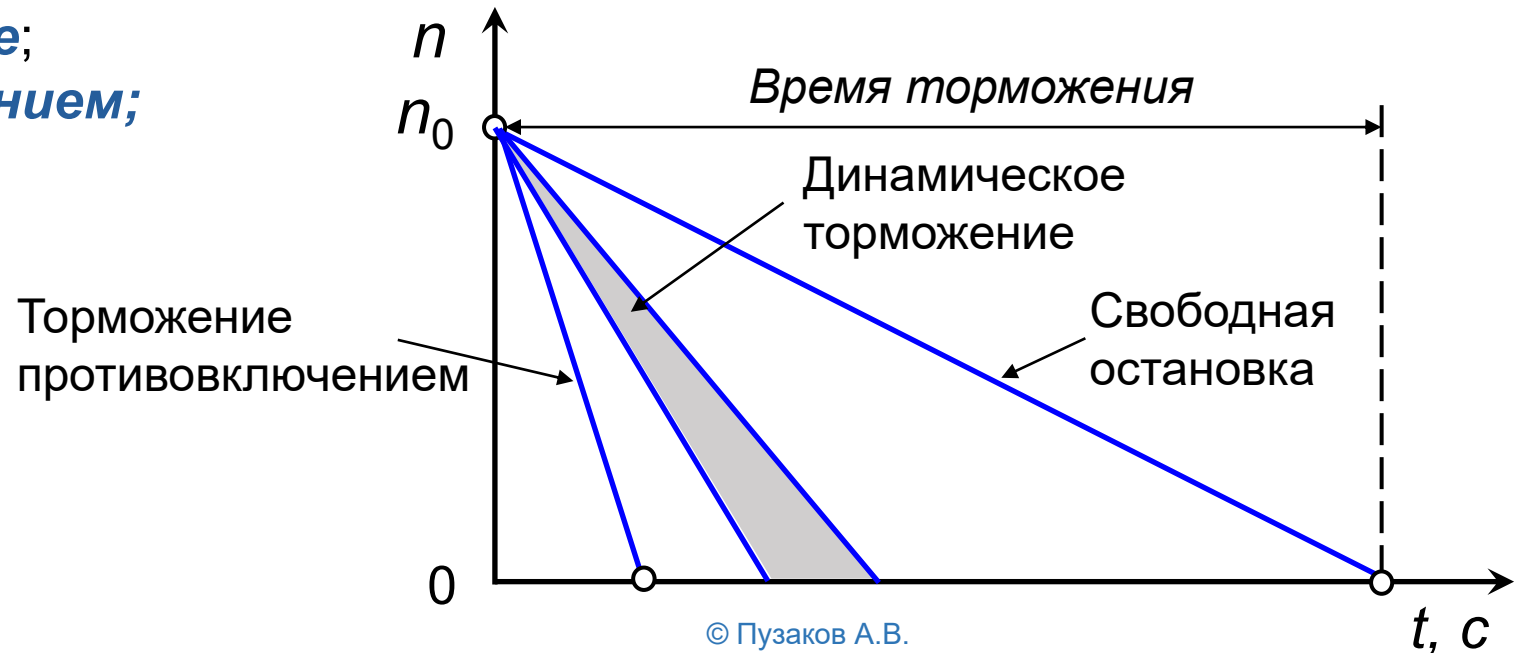
Во многих технологических процессах режимы электрического торможения двигателей имеют большое значение. При отключении двигателя от сети вращающий момент $M = 0$, но якорь двигателя за счет кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т. е. произойдет **выбег** двигателя.

Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют тормозные режимы.

Тормозные режимы – это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую и передается через электрические зажимы машины.

В зависимости от того, куда поступает электрическая энергия, различают три тормозных режима:

1. **Рекуперативное торможение;**
2. **Торможение противовключением;**
3. **Динамическое торможение.**



Генераторное (рекуперативное) торможение

Этот режим возможен в двигателях параллельного (независимого) и смешанного возбуждения, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения идеального холостого хода n_0 .

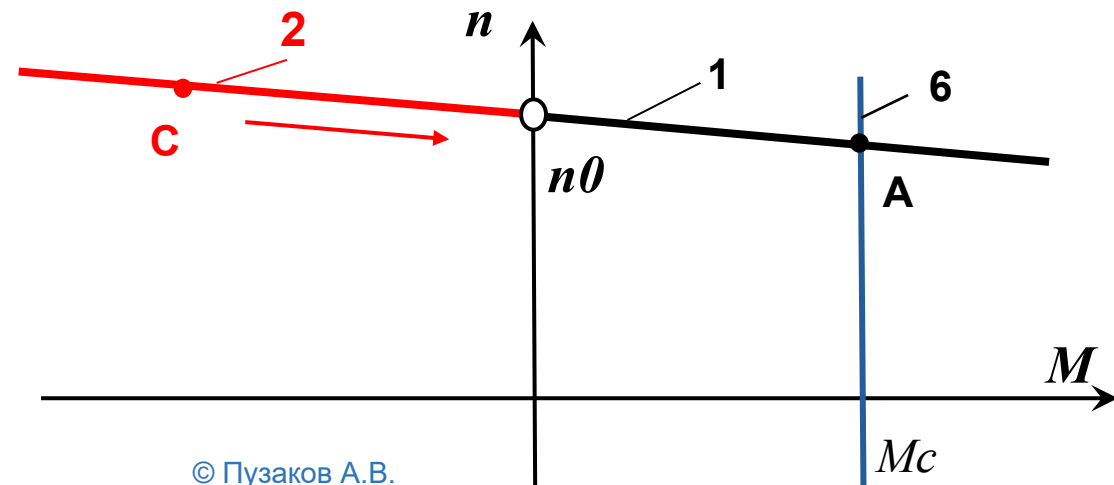
В этих условиях ЭДС машины увеличивается до значения, превышающего напряжение питающей сети, при этом ток якоря, а следовательно, и момент меняют свое направление. В итоге машина постоянного тока переходит в **генераторный режим** и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает в сеть.

Процесс торможения продолжается до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения n_0 .

Генераторное рекуперативное торможение – наиболее экономичный вид торможения, так как он сопровождается возвратом энергии в сеть. Применение этого способа торможения является эффективным энергосберегающим средством в современном электроприводе.

Он целесообразен в электротранспортных средствах, работа которых связана с частыми остановками и движением под уклон. В этом случае кинетическая энергия движения транспортного средства (трамвай, троллейбус, электропоезд) преобразуется в электрическую энергию и возвращается в сеть.

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} + \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2}$$



Динамическое торможение

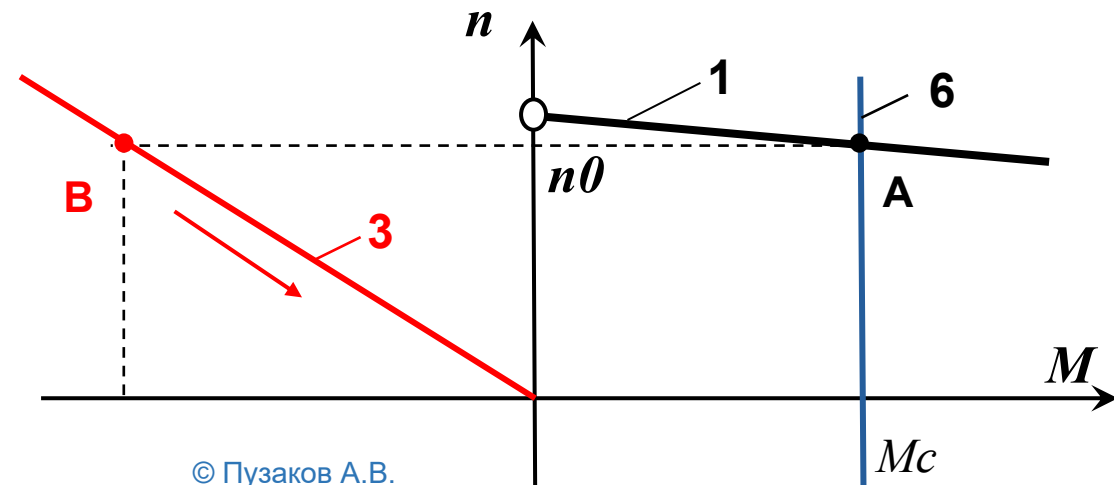
Необходимость в **динамическом торможении** возникает, когда после отключения двигателя от сети его якорь под действием кинетической энергии движущихся масс электропривода продолжает вращаться.

Если при этом обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор R_m , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не поступает обратно в сеть, как это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении.

В режиме динамического торможения ЭДС якоря не изменяет своего направления, но так как якорь отключен от сети ($U = 0$), то источником тока якоря становится ЭДС, которая в двигательном режиме направлена противоположно напряжению сети. В итоге ток в обмотке якоря при переходе в режим динамического торможения меняет свое направление, электромагнитный момент также изменит направление и станет **тормозящим**.

Процесс торможения продолжается до полной остановки якоря ($n = 0$).

$$n = - \frac{M \sum (r_a + r_T)}{c_E c_M \Phi^2}$$



Торможение противовключением

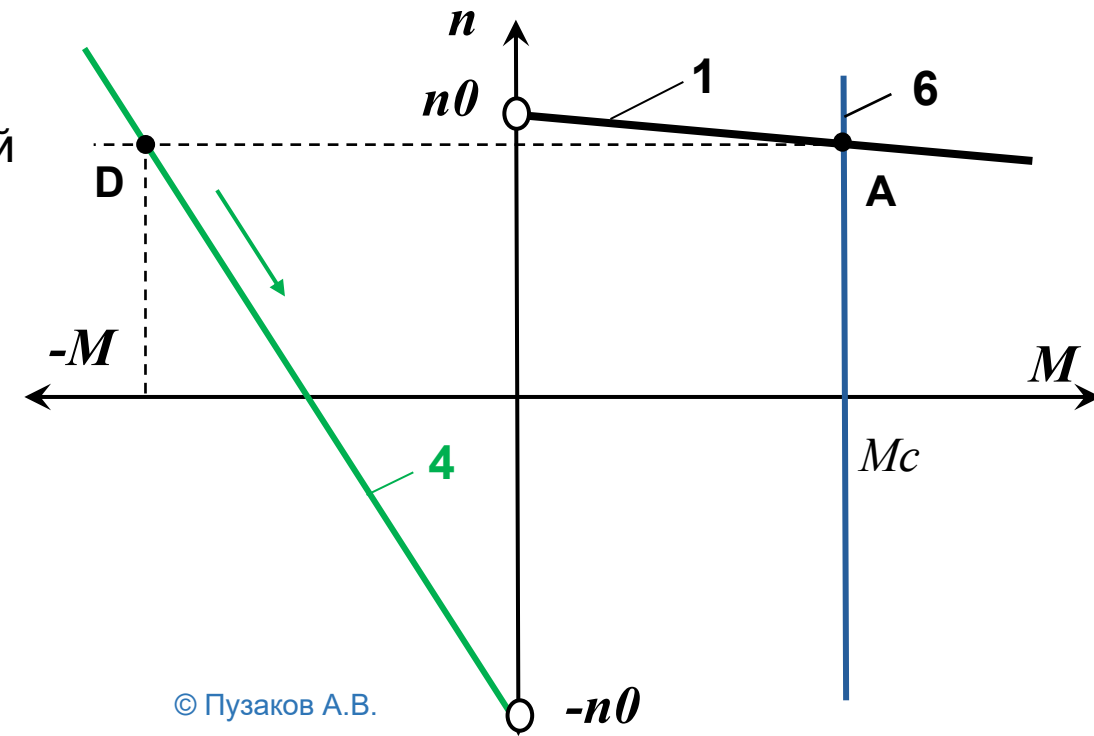
С этой целью изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным.

Но якорь двигателя под действием кинетической энергии вращающихся масс электропривода сохраняет прежнее (положительное) направление вращения, и так как направление магнитного потока не изменилось, то ЭДС якоря также не меняет своего направления и действует согласно с напряжением на обмотке якоря.

В этих условиях ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент становятся отрицательными и работа двигателя определяется режимом точки **D** на характеристике **4**. Под действием тормозящего момента частота вращения якоря уменьшается, достигая **нулевого значения**.

Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет **реверсирование** двигателя и его якорь начнет вращение в противоположную сторону, перейдя в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента.

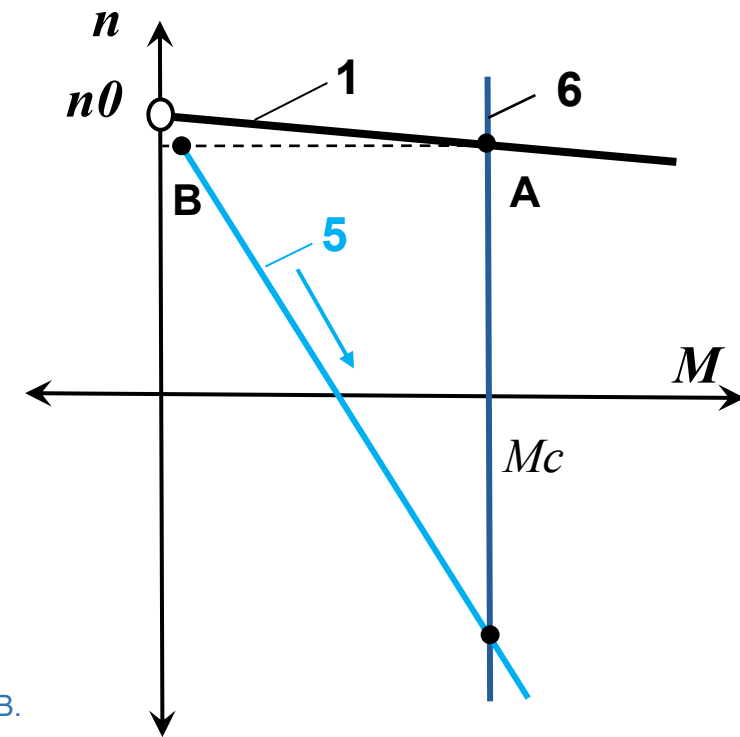
$$n = - \left[\frac{U}{c_E \Phi} - \frac{M \sum (r_a + r_d)}{c_E c_M \Phi^2} \right]$$



Торможение противовключением

Торможение противовключением используется в подъемных устройствах, создающих активный момент сопротивления M_c приводному двигателю.

Допустим двигатель такого устройства работает на **подъем** груза в установившемся номинальном режиме точки A на естественной характеристике **1**. При этом момент двигателя равен статическому моменту сопротивления. Для опускания груза в цепь якоря двигателя вводят добавочный резистор. При этом двигатель перейдет в режим **искусственной** механической характеристики **5** и статический момент сопротивления, создаваемый грузом, превысит наибольшее значение момента двигателя. Под действием этого избыточного момента груз будет **опускаться**, направление вращения якоря двигателя станет отрицательным.



Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

$$n = \frac{U}{\sqrt{c_E \cdot \Phi \cdot M}} - \frac{\sum(r_a + r_d)}{c_E c_M \cdot \Phi}$$

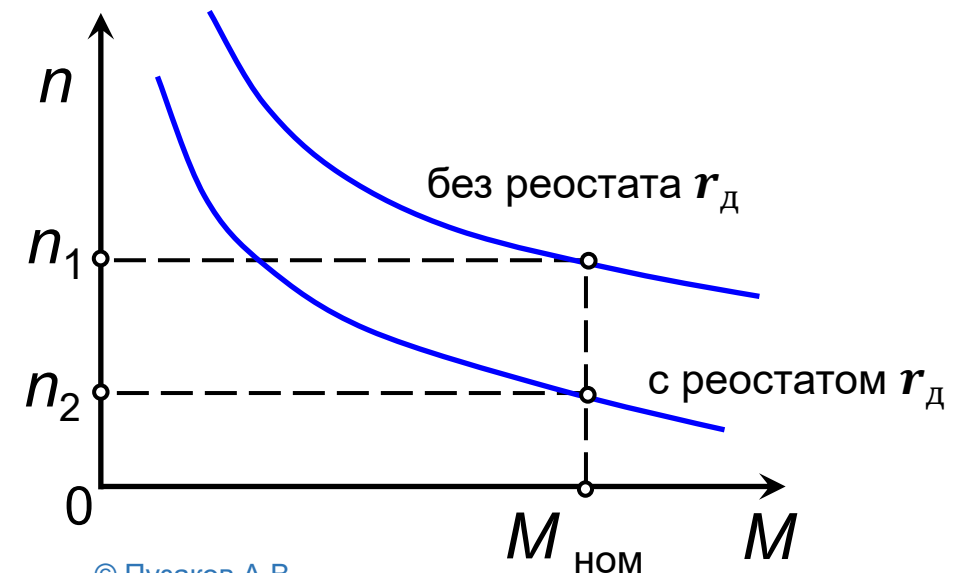
Следовательно, регулировать частоту вращения двигателя можно двумя способами:

- изменением основного магнитного потока Φ ;
- изменением напряжения U .

Включение в цепь якоря регулировочного реостата r_d

С увеличением сопротивления реостата r_d частота вращения двигателя снижается.

Этот способ применяется только в двигателях *небольшой мощности* из-за больших потерь энергии в реостате.



Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного последовательного возбуждения

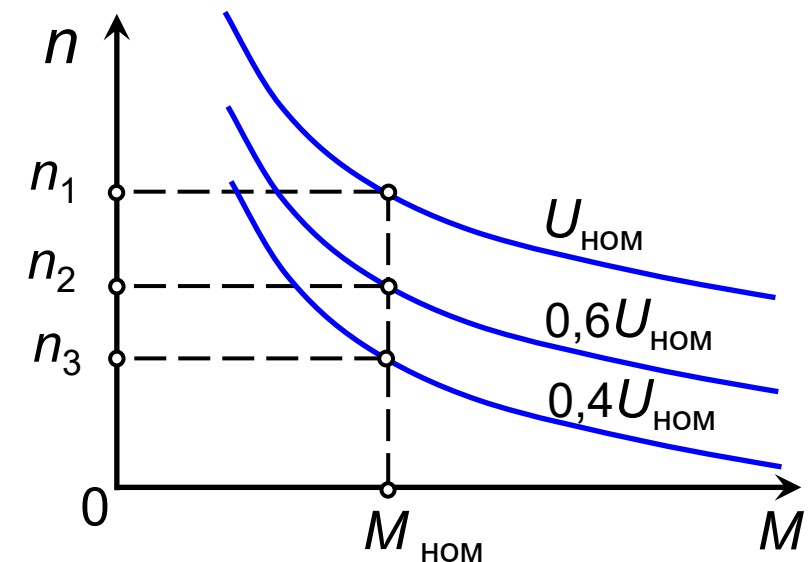
$$n = \frac{U}{\sqrt{c_E \cdot \Phi \cdot M}} - \frac{\sum(r_a + r_d)}{c_E c_M \cdot \Phi}$$

Частоту вращения можно регулировать *изменением напряжения U* , подводимого к двигателю, посредством источника питания с регулируемым напряжением.

При уменьшении напряжения U на двигателе, его механические характеристики *смещаются вниз не меняя своей кривизны*.

При совместной работе *нескольких одностипных двигателей* частоту вращения можно регулировать *изменением схемы их включения*:

- при **параллельном включении** двигателей каждый из них работает под полным напряжением сети;
- при **последовательном включении** двух двигателей на каждый двигатель приходится половина напряжения сети.



Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

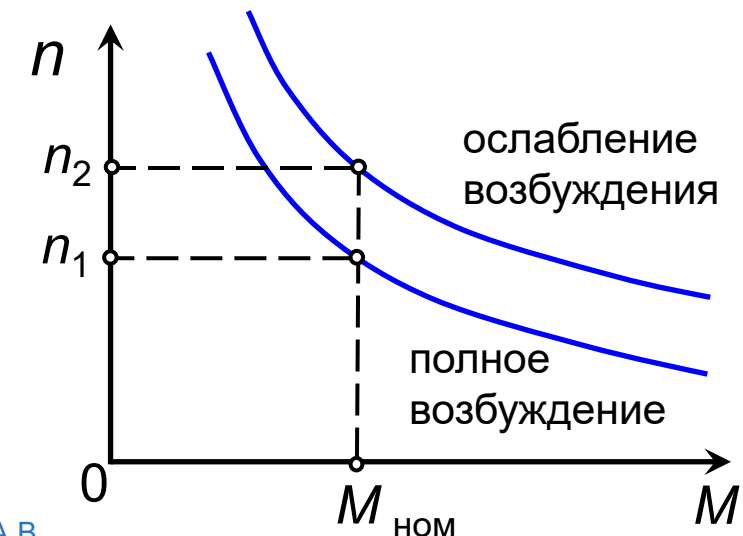
$$n = \frac{U}{\sqrt{c_E \cdot \Phi \cdot M}} - \frac{\sum(r_a + r_d)}{c_E c_M \cdot \Phi}$$

Регулировать частоту вращения *изменением магнитного потока* можно двумя способами:

- шунтированием обмотки возбуждения реостатом;
- шунтированием обмотки якоря.

Резистор $R_{ш}$ выбирается таким, чтобы $\beta < 50\%$.

Шунтирование обмотки возбуждения реостатом $R_{ш}$ и уменьшение сопротивления этого реостата ведет к снижению тока возбуждения I и, следовательно, к *росту частоты вращения*



Этот способ *экономичнее* предыдущего и применяется чаще и оценивается *коэффициентом ослабления поля*

$$\beta = \frac{I_B}{I_a} \times 100\%$$

Регулирование частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения

Уравнение *механической характеристики* двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

$$n = \frac{U}{\sqrt{c_E \cdot \Phi \cdot M}} - \frac{\sum(r_a + r_d)}{c_E c_M \cdot \Phi}$$

Шунтирование обмотки якоря реостатом $R_{ш}$ увеличивает ток возбуждения, что приводит к *снижению частоты вращения*.

Этот способ регулирования, хотя и обеспечивает *глубокую регулировку* частоты вращения (вплоть до остановки), но он *неэкономичен* (из-за значительных потерь в реостате $R_{ш}$) и применяется редко.

Режимы торможения ДПТ последовательного возбуждения

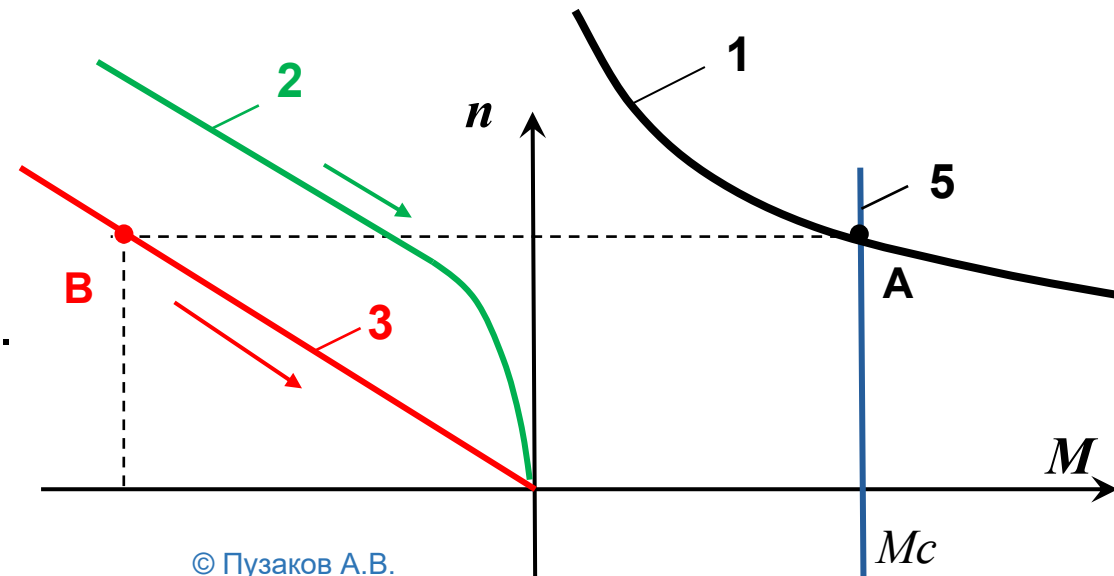
Режим **генераторного рекуперативного** торможения при последовательном возбуждении двигателя невозможен, так как двигатель в этом случае не может работать в режиме холостого хода: при $M = 0$ поток $\Phi = 0$, частота вращения неограниченно растет и двигатель идет «в разнос».

Динамическое торможение может быть осуществлено двумя способами: с независимым возбуждением и с самовозбуждением. Тормозная характеристика в первом случае совпадает с ДПТ параллельного возбуждения (график 3).

Динамическое торможение самовозбуждением осуществляется при последовательном соединении обмоток якоря, возбуждения и добавочного резистора. Механическая характеристика динамического торможения по схеме с самовозбуждением криволинейна (график 2).

Торможение получается малоэффективным, так как по мере замедления вращения уменьшается ток якоря одновременно с магнитным потоком Φ .

Этот вид динамического торможения обычно применяют для аварийного торможения, так как в процессе торможения напряжение сети не используется.



Режимы торможения ДПТ последовательного возбуждения

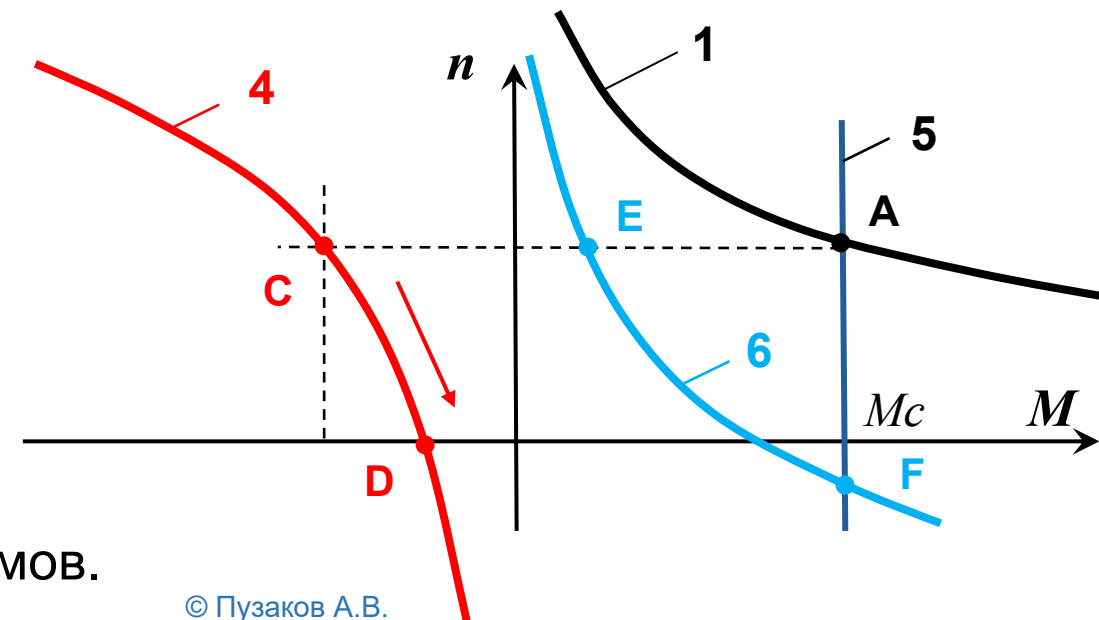
Торможение противовключением осуществляется изменением направления тока в обмотке возбуждения или в якоре. При этом меняется знак момента двигателя. Для ограничения тока в этом режиме в цепь двигателя вводится резистор. До торможения двигатель работал в точке **A** на характеристике **1**, преодолевая момент сопротивления M_c .

После изменения направления тока в якоре и ввода дополнительного резистора двигатель переходит на характеристику **4** в точку **C**. Процессу торможения противовключением соответствует участок **CD** характеристики **4**. В точке **D** торможение заканчивается, и схема управления отключает двигатель от сети.

Если, не изменяя направления тока в якоре во время работы привода, в цепь двигателя ввести резистор R_d , то двигатель будет иметь характеристику **6** и перейдет в точку **E**, после чего начнет тормозить.

После перехода через 0 под действием активного момента двигатель будет разгоняться в обратном направлении, пока в точке **F** моменты нагрузки M_c и двигателя не сравняются.

Такой способ торможения противовключением применяют в электроприводах грузоподъемных механизмов.

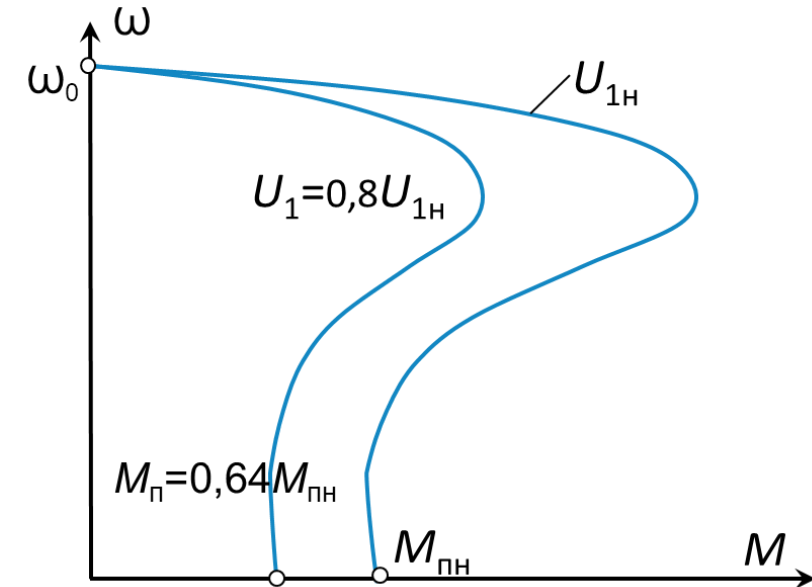
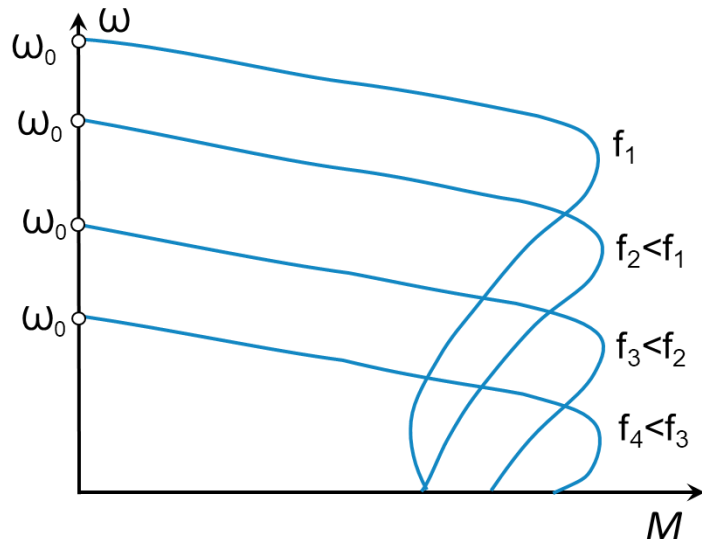


Пуск асинхронных электродвигателей

Пусковые свойства асинхронных электродвигателей определяются значениями пускового тока I_n и пускового момента M_n .

Пуск трехфазных асинхронных электродвигателей, как правило, осуществляется прямым включением в сеть. Однако при таком способе пуска возникает большой бросок пускового тока, в 5–8 раз превышающий номинальное значение. Поэтому такой способ пуска АД используют в основном для двигателей незначительной мощности.

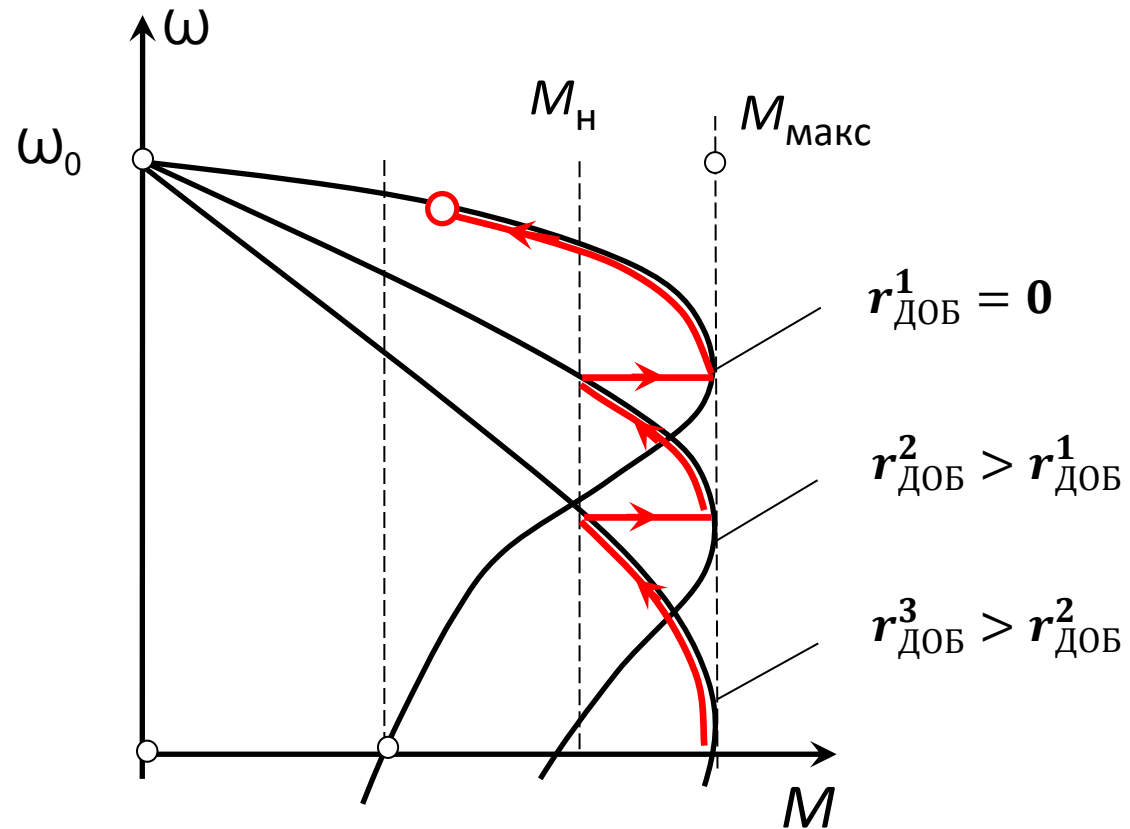
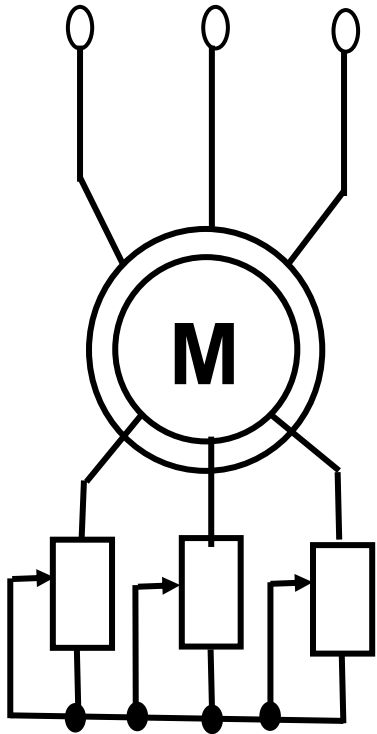
Можно запускать двигатель, плавно изменяя напряжение, подаваемое на статорные обмотки АД. Для этого используют **устройства плавного пуска** (УПП), представляющие собой тиристорные регуляторы переменного напряжения с задатчиком интенсивности пуска.



Наилучший способ пуска АД – плавное поднятие частоты тока с помощью преобразователя частоты. Это позволяет плавно разгонять рабочую машину даже при номинальном моменте сопротивления на валу двигателя.

Пуск асинхронных электродвигателей

Особенность конструкции *асинхронных двигателей с фазным ротором* позволяет включить в цепь ротора пусковой реостат, представляющий добавочный резистор с переменным активным сопротивлением $r_{\text{ДОБ}}$. Благодаря этому, появляется возможность воздействовать на пусковые параметры двигателя.



Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя следует, что частоту вращения ротора можно регулировать изменением:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S)$$

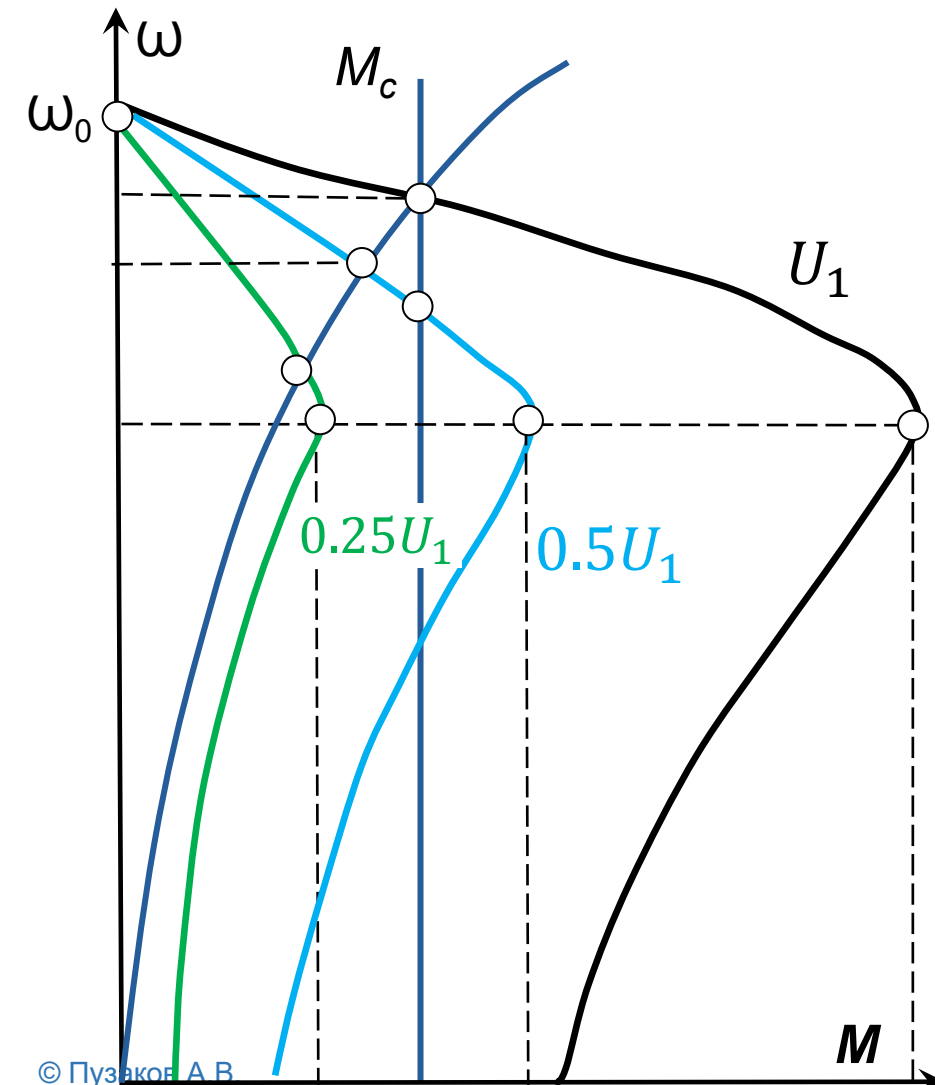
- скольжения S ;
- частоты тока в обмотке статора f_1 ;
- числа пар полюсов в обмотке статора p .

Изменение скольжения возможно:

- изменением подводимого напряжения;
- изменением активного сопротивления обмотки ротора (АД с фазным ротором).

При изменении подводимого к обмотке статора напряжения U максимальный момент M_{max} меняется пропорционально квадрату этого напряжения. Изменять подводимое к двигателю напряжение можно только вниз от номинального, напряжение выше номинального недопустимо.

Таким образом, при уменьшении напряжения U частота вращения ротора n при неизменном нагрузочном моменте уменьшается (скольжение увеличивается).



Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей

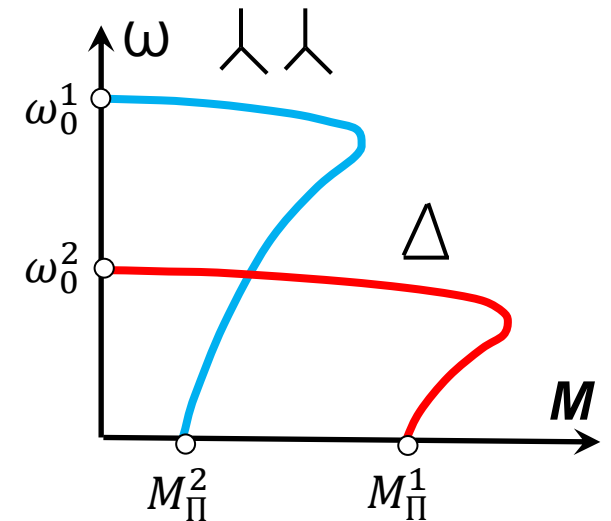
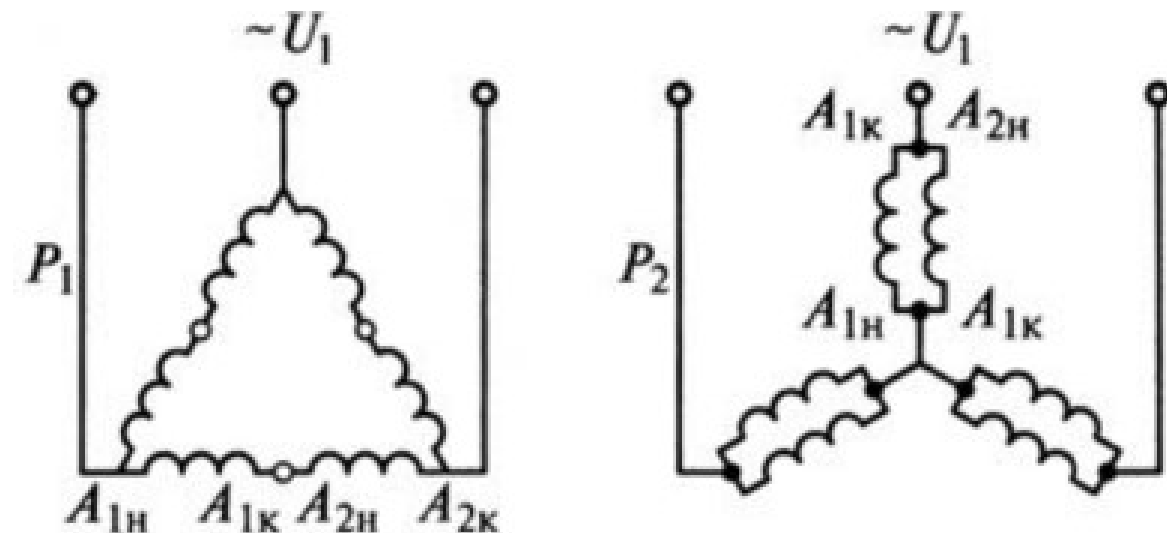
Изменение числа пар полюсов возможно выполнить только в специальных **многоскоростных** АД. При этом происходит ступенчатое изменение скорости вращения магнитного поля.

p	1	2	3	4	5
$n_1, 1/\text{мин}$	3000	1500	1000	750	600

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}$$

Такие многоскоростные АД называют **многообмоточными**. Кроме того, изменение числа пар полюсов можно получить переключением ветвей каждой фазы одной обмотки. Соединения ветвей каждой фазы в трехфазной системе реализуются в виде переключений обмоток с **треугольника** на **двойную звезду**.

Применяется только в асинхронных двигателях с **короткозамкнутым ротором**. В двигателях с фазным ротором пришлось бы переключать и обмотку ротора.



Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей

Регулирование скорости изменением частоты f_1 подводимого напряжения обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне. Способ экономичен и обеспечивает широкий диапазон регулирования. Однако для эффективного использования электродвигателя (высокие КПД, $\cos\phi$, перегрузочная способность λ) необходимо одновременно с изменением f_1 изменять и U_1 .

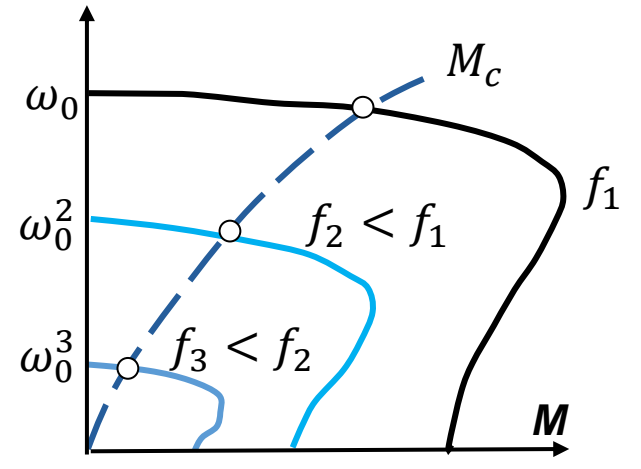
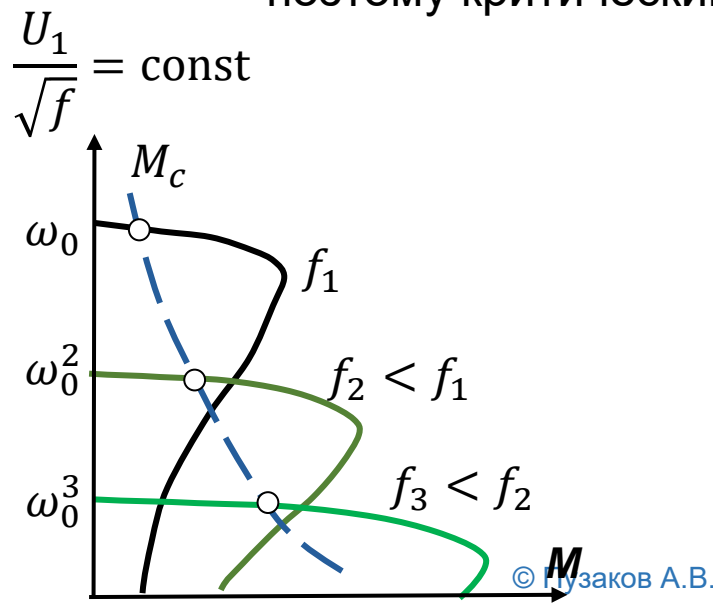
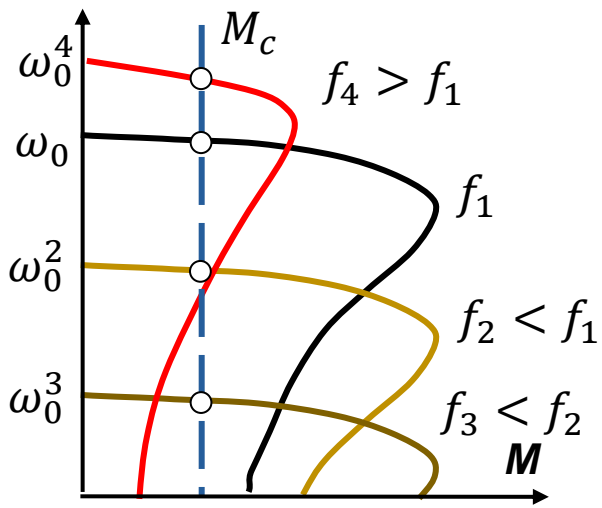
Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки. Основной критерий – сохранить перегрузочную способность λ при регулировании напряжения и частоты.

При $M_c = \text{const}$: $\frac{U_1}{f_1} = \text{const}$

При вентиляторной характеристике: $\frac{U_1}{f_1^2} = \text{const}$

Если M_c обратно пропорционален скорости, то: $\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$

При регулировании частоты вверх от f_1 невозможно одновременно увеличивать U_1 свыше $U_{1н}$, следовательно, нельзя обеспечить $\lambda = \text{const}$, поэтому критический момент M_c снижается.



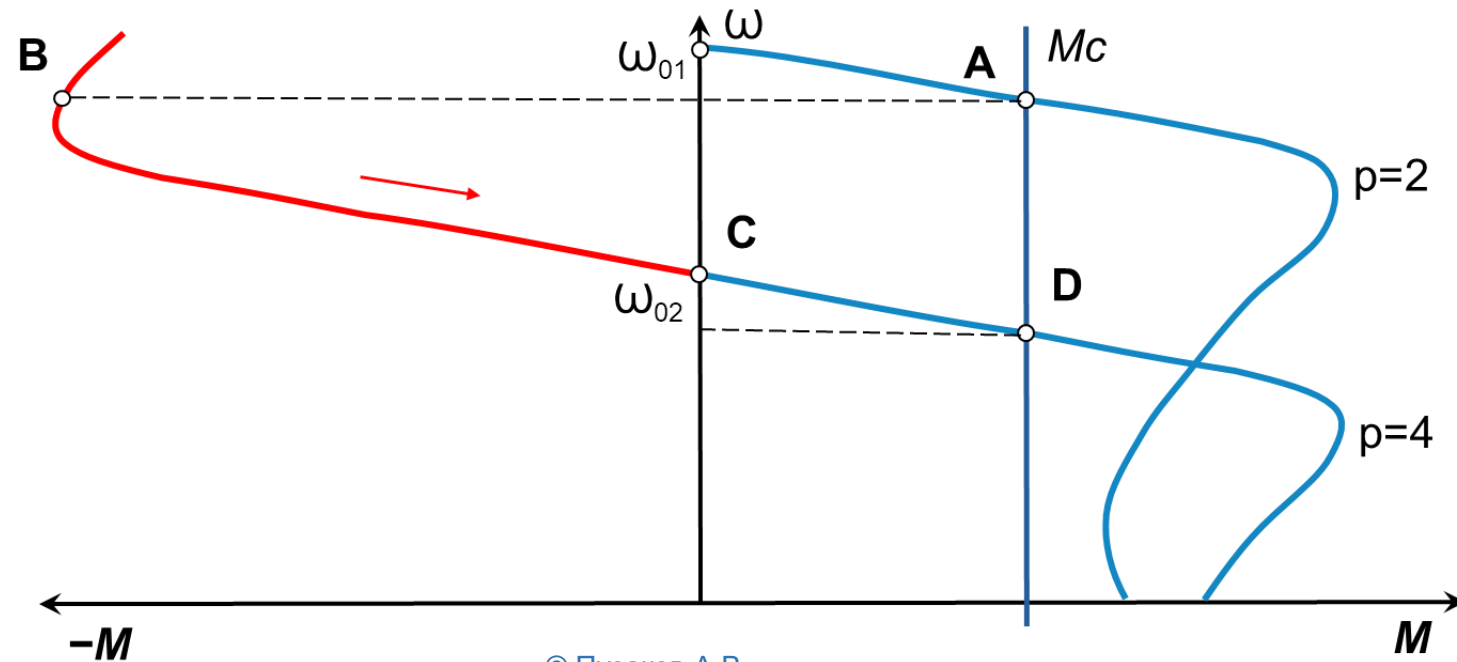
Тормозные режимы асинхронных электродвигателей

Рекуперативное торможение часто используется для «подтормаживания», т.е. для уменьшения скорости перед полной остановкой механизма. Делают это для того, чтобы избежать механических ударов и толчков при резком торможении. Например, «подтормаживание» применяют в электроприводах лифтов и других подъемных механизмах.

Рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть осуществляется тогда, когда скорость превышает синхронную.

Такой режим возникает при переходе двухскоростного АД с высокой на низкую скорость. Если АД работал со скоростью ω_{01} в точке **A**, то при переключении числа пар полюсов станет работать по характеристике с установившейся скоростью ω_{02} в точке **D**.

Участок **BC** – торможение с рекуперацией энергии в сеть.



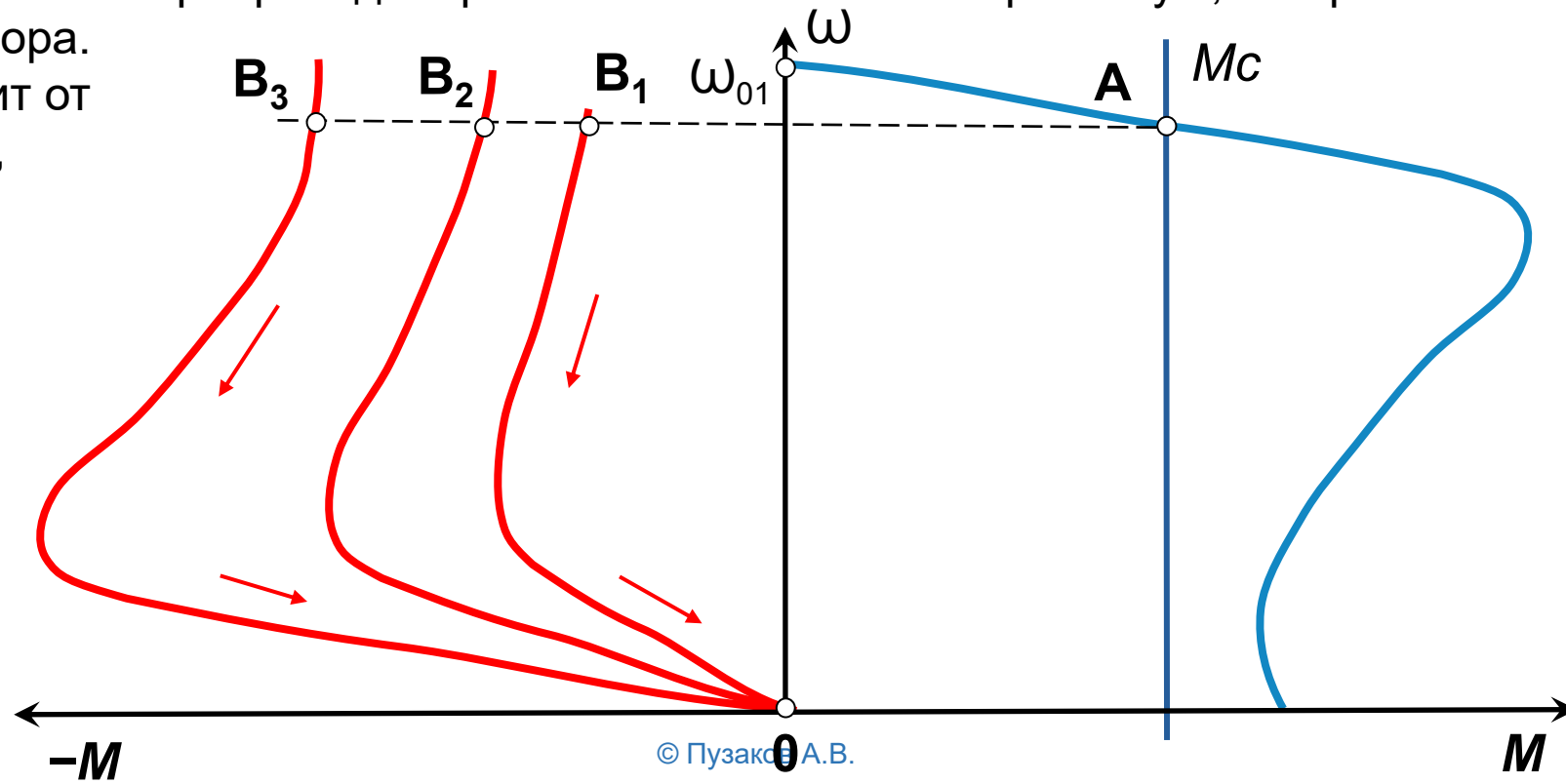
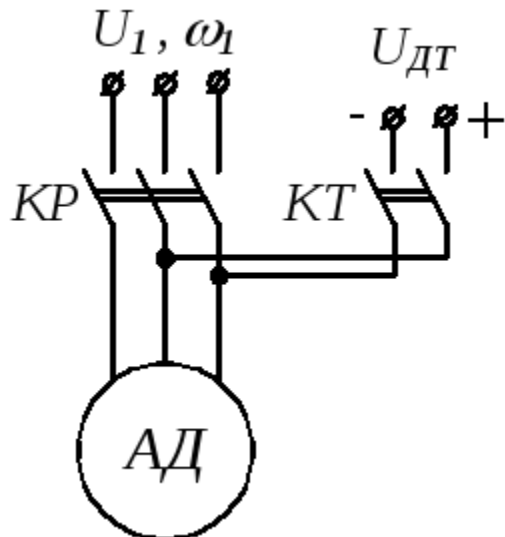
Динамическое торможение асинхронных электродвигателей

Для перевода АД в режим **динамического торможения** следует отключить его обмотки статора от сети переменного тока и включить их в сеть постоянного тока.

Постоянный ток, протекая по обмоткам статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении в роторе наводится ЭДС, под действием которой в обмотке ротора возникает ток, который, взаимодействуя с результирующим магнитным полем АД, создает тормозной момент.

Двигатель работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая механическую энергию движущихся частей электропривода и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде тепла в обмотке ротора.

Величина тормозного момента зависит от величины постоянного тока возбуждения, который берется в пределах до $2,5I_n$

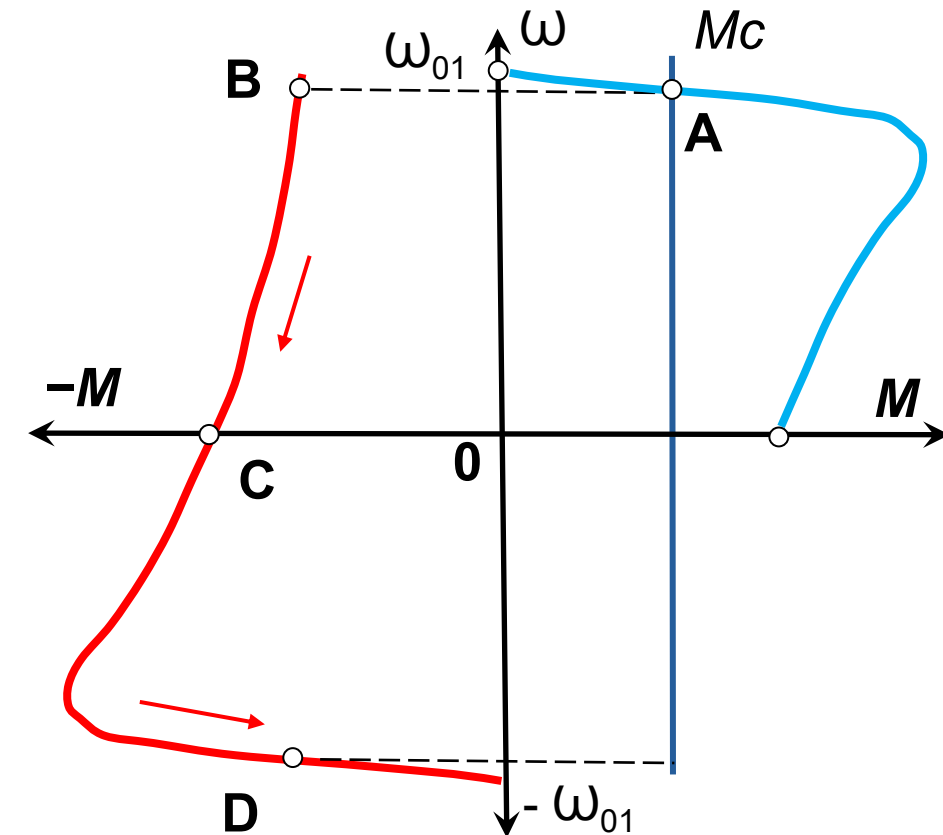
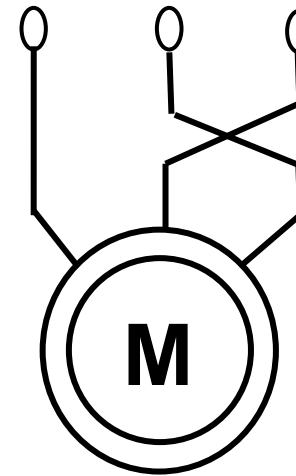


Торможение асинхронных электродвигателей противовключением

Торможение противовключением позволяет получать большие тормозные моменты, поэтому его применяют при необходимости быстрой остановки электропривода. Для создания этого режима достаточно у работающего асинхронного двигателя изменить направление вращения поля статора путем переключения двух проводов, присоединяющих к сети обмотку статора.

Если двигатель работал в точке **A**. При изменении чередования фаз рабочая точка сместится на характеристику обратного следования фаз (точка **B**). В результате на ротор двигателя будет действовать тормозной момент, под действием которого частота вращения ротора n будет снижаться до нуля.

При $n = 0$ (точка **C**) двигатель необходимо отключить от сети, иначе произойдет его **реверсирование**, т.е. двигатель после остановки ротора перейдет из тормозного в двигательный режим с противоположным направлением вращения ротора (точка **D**).



Пуск в ход синхронного двигателя

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. При неподвижном роторе за период изменения тока в статоре (0,02 с при $f_1=50$ Гц) электромагнитный момент $M_{эм}$ будет дважды менять свое направление. Ротор, обладающий определенной инерцией, не может разогнаться в течении полупериода (0,01 с) до синхронной частоты вращения n_1 .

Поэтому для пуска СД приходится применять специальные способы, сущность которых состоит в предварительном приведении ротора во вращение до **синхронной** или близкой к ней частоте.

Существуют три способа синхронизации синхронных двигателей:

- **запуск с помощью асинхронного двигателя небольшой мощности;**
- **частотный пуск;**
- **асинхронный пуск.**

Частотный пуск реализуется при питании двигателя от управляемого преобразователя частоты. Здесь частота питания **f_1** повышается от нуля до номинального значения с небольшой скоростью, достаточной для удержания синхронизма.

Пуск в ход синхронного двигателя

Наиболее распространённым способом пуска является **асинхронный пуск**.

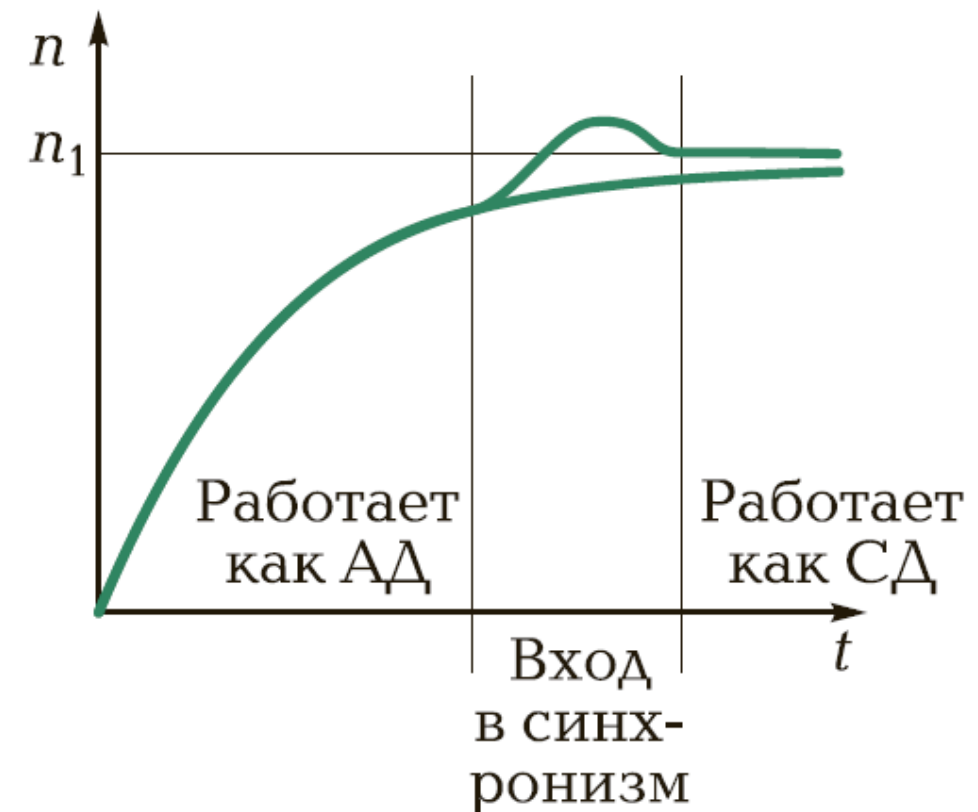
Для этого используется демпферная короткозамкнутая обмотка. При пуске ротор разгоняется до **подсинхронной** частоты ($n_2 \approx 0,95n_1$) за счёт асинхронного вращающего момента.

После разгона ротора до частоты вращения, близкой к синхронной, подают ток в обмотку возбуждения и ротор втягивается в **синхронизм**.

Частотное регулирование является единственным способом регулирования угловой скорости СД. Диапазон регулирования вверх от номинальной синхронной скорости ограничивается механической прочностью ротора, его балансировкой и качеством подшипников.

Диапазон регулирования вниз от номинальной синхронной скорости может достигать значений 50–100 и более с учетом абсолютной жесткости механических характеристик двигателя.

Для торможения СД используют режим динамического торможения. Механические характеристики СД при этом подобны характеристикам АД при динамическом торможении.



Электропривод – электромеханическая система, состоящая из управляющего, преобразовательного, электродвигательного и передаточного устройств, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую и управления ею.

Зависимость между приведенными к валу двигателя скоростью и моментом сопротивления называют механической характеристикой производственного механизма. Аналогично, механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента. Жесткость механических характеристик – это отношение разности электромагнитных моментов двигателя к соответствующей разности угловых скоростей.

Работе электродвигателя и производственного механизма в установившемся режиме соответствует равновесие момента сопротивления механизма и вращающего момента двигателя. Для получения устойчивой работы электропривода в установившемся режиме при определенных значениях скорости и момента нагрузки, необходимо подбирать механическую характеристику электродвигателя соответствующей формы.

Механические характеристики двигателя, полученные при номинальных значениях напряжения на обмотках якоря и возбуждения и при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи якоря, называют естественными. Если же хотя бы один из перечисленных параметров двигателя изменен (напряжение на обмотках якоря или возбуждения отличаются от номинальных значений, или же изменено сопротивление в цепи якоря), то механические характеристики называются искусственными.

Регулировать частоту вращения двигателя постоянного тока можно тремя способами: изменением сопротивления в цепи якоря R_d ; изменением основного магнитного потока Φ ; изменением напряжения в цепи якоря U .

При отключении двигателя от сети вращающий момент $M = 0$, но якорь двигателя за счет кинетической энергии вращающихся масс электропривода некоторое время будет продолжать вращение, т. е. произойдет выбег двигателя. Чтобы уменьшить время выбега двигателя, применяют тормозные режимы.

Тормозные режимы – это генераторные режимы, поскольку механическая энергия, поступившая с вала машины, преобразуется в электрическую и передается через электрические зажимы машины. В зависимости от того, куда поступает электрическая энергия, различают три тормозных режима: рекуперативное торможение; торможение противовключением; динамическое торможение.

Режим рекуперативного торможения возможен тогда, когда частота вращения якоря превышает частоту вращения идеального холостого хода n_0 . В этих условиях ЭДС машины увеличивается до значения, превышающего напряжение питающей сети, при этом ток якоря, а следовательно, и момент меняют свое направление. В итоге машина постоянного тока переходит в генераторный режим и вырабатываемую при этом электроэнергию отдает в сеть. Процесс торможения продолжается до тех пор, пока частота вращения якоря, уменьшаясь, не достигнет значения n_0 .

Если обмотку якоря, отключив от сети, замкнуть на резистор R_t , то двигатель перейдет в генераторный режим (обмотка возбуждения должна оставаться включенной в сеть). Вырабатываемая при этом электроэнергия не поступает обратно в сеть, как это происходит при рекуперативном торможении, а преобразуется в теплоту, которая выделяется в сопротивлении.

При торможении противовключением изменяют полярность напряжения на клеммах обмотки якоря (полярность клемм обмотки возбуждения должна остаться прежней) и напряжение питания обмотки якоря становится отрицательным.

В этих условиях ток якоря, а следовательно, и электромагнитный момент становятся отрицательными и под действием тормозящего момента частота вращения якоря уменьшается, достигая нулевого значения.

Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет реверсирование двигателя и его якорь начнет вращение в противоположную сторону, перейдя в двигательный (основной) режим с отрицательными значениями частоты вращения и вращающего момента.

Пуск трехфазных асинхронных электродвигателей, как правило, осуществляется прямым включением в сеть. Однако при таком способе пуска возникает большой бросок пускового тока, в 5–8 раз превышающий номинальное значение. Поэтому такой способ пуска АД используют в основном для двигателей незначительной мощности. Наилучший способ пуска АД – плавное поднятие частоты тока с помощью преобразователя частоты. Это позволяет плавно разгонять рабочую машину даже при номинальном моменте сопротивления на валу двигателя.

Из выражения частоты вращения асинхронного двигателя следует, что частоту вращения ротора можно регулировать изменением: скольжения S ; частоты тока в обмотке статора f_1 ; числа пар полюсов в обмотке статора p . Регулирование скорости изменением частоты f_1 подводимого напряжения обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне. Способ экономичен и обеспечивает широкий диапазон регулирования. Однако для эффективного использования электродвигателя (высокие КПД, $\cos\phi$, перегрузочная способность λ) необходимо одновременно с изменением f_1 изменять и U_1 .

Синхронный двигатель не имеет начального пускового момента. Поэтому для пуска СД приходится применять специальные способы. Существуют три способа синхронизации синхронных двигателей: запуск с помощью асинхронного двигателя небольшой мощности; частотный пуск; асинхронный пуск.

Вопросы для самоконтроля

1. Какие составные части входят в структуру электропривода?
2. Классификация электроприводов по способу распределения механической энергии, степени управления, уровню автоматизации.
3. Уравнение механической характеристики производственных механизмов
4. Виды механических характеристик производственных механизмов
5. Механические характеристики электродвигателей. Жесткость характеристики
6. Устойчивость электропривода в статическом и динамическом режимах
7. Способы пуска двигателей постоянного тока. Реверс двигателей постоянного тока
8. Уравнение механической характеристики ДПТ параллельного возбуждения
9. Регулирование частоты вращения ДПТ параллельного возбуждения
10. Тормозные режимы двигателей постоянного тока параллельного возбуждения
11. Рекуперативное торможение двигателей постоянного тока
12. Динамическое торможение двигателей постоянного тока
13. Торможение противовключением двигателей постоянного тока
14. Способы регулирования частоты вращения ДПТ последовательного возбуждения
15. Тормозные режимы двигателей постоянного тока последовательного возбуждения
16. Способы пуска асинхронных электродвигателей
17. Способы регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей
18. Тормозные режимы асинхронных электродвигателей
19. Пуск в ход синхронного двигателя

1. **Кацман М.М. Электрический привод: учебник.** – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 384 с.
2. **Базулина Т. Г. Основы электропривода: учеб. пособие / Т. Г. Базулина, Н. А. Равинский.** – Минск: РИПО, 2020. – 183 с. : ил.
3. **Лазута И.В. Основы электротехники и электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / И.В. Лазута, И.А. Реброва.** – Омск : СибАДИ, 2018. – Режим доступа : <http://bek.sibadi.org/fulltext/esd636.pdf>.
4. **Шандриков, А. С. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие / А.С. Шандриков.** – 3-е изд., испр. – Минск : РИПО, 2020. – 318 с.
5. **Прошин В.М. Электротехника: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / В.М. Прошин.** — 6-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2017. – 288 с.
6. **Общая электротехника и электроника: учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Р.И. Екутеч, А.А. Паранук, В.А. Хрисониди – п. Яблоновский, Краснодар –** Издательство: Краснодарский ЦНТИ – филиал ФГБУ «РЭА» Минэнерго России, 2019. – 371 с.