

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ**

**ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО**

**ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**(ДГТУ)**

Факультет «Автоматизация производственных процессов»

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

Курс лекций по дисциплине

**«Автоматизированный электропривод»**

Ростов-на-Дону

2022

УДК 62-192

Составитель: Туркин И.А.

Методические указания. – Ростов-на-Дону:Донской гос.

техн. ун-т, 2022. – 11с

Курс лекций по дисциплине «Автоматизированный электропривод» предназначены для студентов заочной формы обучения по направлению 15.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств» профиль «Промышленное программирование».

УДК 62-192

Печатается по решению редакционно-издательского совета

Донского государственного технического университета

Аннотация

В курсе лекций достаточно подробно излагается предметная область подготовки по программе подготовки – «Промышленное программирование». Изучение дисциплины полагает значительную часть достаточно большого курса выполнять самостоятельно. Поэтому изложение лекционного курса сделано достаточно полно. В нем подробно рассматриваются виды электродвигателей, облась их применения, управления, а также рассматриваются конкретные задачи по внедрению в производство.

Курс лекций является достаточно полным. Он существенно превосходит объем материала, который студенту дает преподаватель непосредственно во время чтения лекций. Это связано с особенностями проведения занятий при магистерской подготовке, в процессе которой студент большую часть материала изучает самостоятельно. Более того, студент должен предварительно изучить представленный материал, а во время аудиторных занятий преподаватель должен пояснять лишь не ясные при изучении вопросы и останавливаться на основных моментах изучаемого курса.

**Раздел 1.** Конструкция, и принцип работы асинхронного двигателя

**1.1 Асинхронный двигатель конструкция и параметры**

Современные трёхфазные асинхронные двигатели являются преобразователями электрической энергии в механическую. Благодаря своей простоте, низкой стоимости и высокой надёжности асинхронные двигатели получили широкое применение. Они присутствуют повсюду, это самый распространённый тип двигателей, их выпускается 90% от общего числа двигателей в мире.

Огромная популярность асинхронных двигателей связана с простотой их эксплуатации, дешевизной и надежностью.

**Асинхронный двигатель** - это асинхронная машина, предназначенная для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. Само слово “асинхронный” означает не одновременный. При этом имеется ввиду, что у асинхронных двигателей частота вращения магнитного поля статора всегда больше частоты вращения ротора. Работают асинхронные двигатели, как понятно из определения, от сети [переменного тока](http://electroandi.ru/toe/peremennyj-sinusoidalnyj-tok.html).

Достоинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором:

1. Простота изготовления.
2. Относительная дешевизна.
3. Высокая надёжность в эксплуатации.
4. Невысокие эксплуатационные затраты.
5. Возможность включения в [сеть](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D1%91%D1%85%D1%84%D0%B0%D0%B7%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%B0%D0%B1%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F) без каких-либо преобразователей (для нагрузок, не нуждающихся в регулировке скорости).

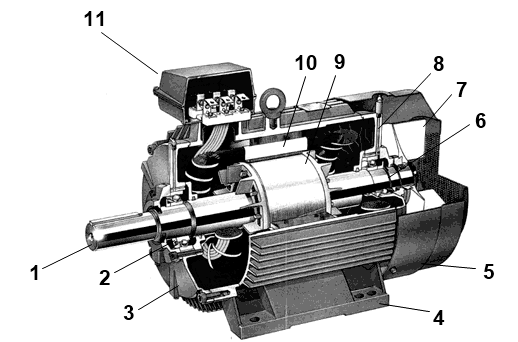
Все вышеперечисленные достоинства являются следствием отсутствия механических коммутаторов в цепи ротора и привели к тому, что большинство электродвигателей, используемых в промышленности - это асинхронные машины.

Недостатки:

1. Небольшой пусковой момент.
2. Значительный пусковой ток.
3. Низкий коэффициент мощности.
4. Сложность регулирования скорости с необходимой точностью.
5. Максимальная скорость двигателя ограничена частотой сети (для АДКЗ, питаемых непосредственно от трёхфазной сети 50 Гц — это 3000 об/мин).
6. Сильная зависимость (квадратичная) электромагнитного момента от напряжения питающей сети (при изменении напряжения в 2 раза вращающий момент изменяется в 4 раза; у [ДПТ](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0) вращающий момент зависит от напряжения питания якоря в первой степени, что более благоприятно).

Самый совершенный подход к устранению вышеуказанных недостатков - это питание двигателя через [частотный преобразователь](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C), в котором управление производится по сложным [алгоритмам](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC).

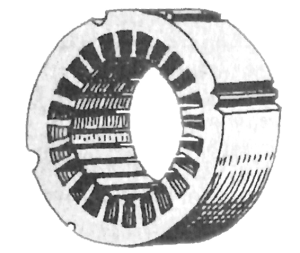
**Устройство**



На рисунке: 1 - вал, 2,6 - подшипники, 3,8 - подшипниковые щиты, 4 - лапы, 5 - кожух вентилятора, 7 - крыльчатка вентилятора, 9 - короткозамкнутый ротор, 10 - статор, 11 - коробка выводов.

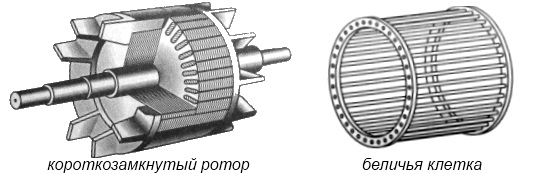
Основными частями асинхронного двигателя являются статор (10) и ротор (9).

**Статор** имеет цилиндрическую форму, и собирается из листов стали. В пазах сердечника статора уложены обмотки статора, которые выполнены из обмоточного провода. Оси обмоток сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120°. В зависимости от подаваемого напряжения концы обмоток соединяются треугольником или звездой.

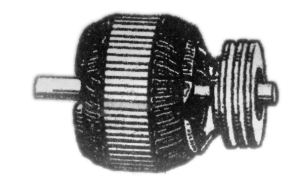


**Роторы** асинхронного двигателя бывают двух видов: короткозамкнутый и фазный ротор.

**Короткозамкнутый ротор** представляет собой сердечник, набранный из листов стали. В пазы этого сердечника заливается расплавленный алюминий, в результате чего образуются стержни, которые замыкаются накоротко торцевыми кольцами. Эта конструкция называется "беличьей клеткой". В двигателях большой мощности вместо алюминия может применяться медь. Беличья клетка представляет собой короткозамкнутую обмотку ротора, откуда собственно название.



**Фазный ротор** имеет трёхфазную обмотку, которая практически не отличается от обмотки статора. В большинстве случаев концы обмоток фазного ротора соединяются в звезду, а свободные концы подводятся к контактным кольцам. С помощью щёток, которые подключены к кольцам, в цепь обмотки ротора можно вводить добавочный резистор. Это нужно для того, чтобы можно было изменять активное сопротивление в цепи ротора, потому что это способствует уменьшению больших пусковых токов. Подробнее о фазном роторе можно прочитать в статье -[асинхронный двигатель с фазным ротором](http://electroandi.ru/elektricheskie-mashiny/asinkhronnyj-dvigatel-s-faznym-rotorom.html).



**Принцип работы**

При подаче к обмотке статора напряжения, в каждой фазе создаётся магнитный поток, который изменяется с частотой подаваемого напряжения. Эти магнитные потоки сдвинуты относительно друг друга на 120°, как во времени, так и в пространстве. Результирующий магнитный поток оказывается при этом вращающимся.

Результирующий магнитный поток статора вращается и тем самым создаёт в проводниках ротора ЭДС. Так как обмотка ротора, имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который в свою очередь взаимодействуя с магнитным потоком статора, создаёт пусковой момент двигателя, стремящийся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Когда он достигает значения, тормозного момента ротора, а затем превышает его, ротор начинает вращаться. При этом возникает так называемое скольжение**.**

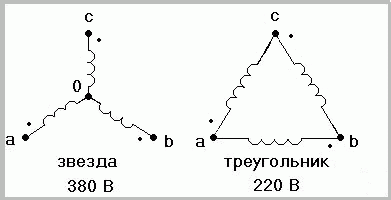
**Скольжение** **s** - это величина, которая показывает, насколько синхронная частота ***n1*** магнитного поля статора больше, чем частота вращения ротора ***n2***, в процентном соотношении.*http://electroandi.ru/images/dvig/asinhronniy-dvigatel-111.jpg*

Скольжение — это крайне важная величина. В начальный момент времени она равна единице, но по мере возрастания частоты вращения **n2** ротора относительная разность частот **n1-n2** становится меньше, вследствие чего уменьшаются ЭДС и ток в проводниках ротора, что влечёт за собой уменьшение вращающего момента. В режиме холостого хода, когда двигатель работает без нагрузки на валу, скольжение минимально, но с увеличением статического момента, оно возрастает до величины **sкр****-** критического скольжения. Если двигатель превысит это значение, то может произойти так называемое опрокидывание двигателя, и привести в последствии к его нестабильной работе. Значения скольжения лежит в диапазоне от 0 до 1, для асинхронных двигателей общего назначения оно составляет в номинальном режиме - 1 - 8 %.

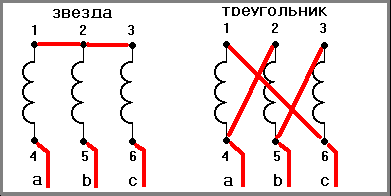
Как только наступит равновесие между электромагнитным моментом, вызывающим вращение ротора и тормозным моментом создаваемым нагрузкой на валу двигателя процессы изменения величин прекратятся.

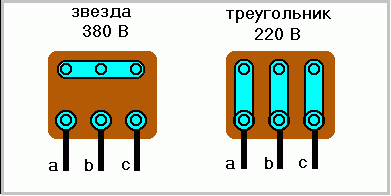
Выходит, что принцип работы асинхронного двигателя заключается во взаимодействии вращающегося магнитного поля статора и токов, которые наводятся этим магнитным полем в роторе. Причём вращающий момент может возникнуть только в том случае, если существует разность частот вращения магнитных полей.

Всякий асинхронный трехфазный двигатель рассчитан на два номинальных напряжения трехфазной сети 380 /220 - 220/127 и т. д. Наиболее часто встречаются двигатели 380/220В.  Переключение двигателя с одного напряжения на другое производится подключением обмоток «на звезду» - для 380 В или на «треугольник» - на 220 В. Если у двигателя имеется колодка подключения, имеющая 6 выводов с установленными перемычками, следует обратить внимание в каком порядке установлены перемычки. Если у двигателя отсутствует колодка и имеются 6 выводов - обычно они собраны в пучки по 3 вывода.).



Для правильного подключения на «треугольник» нужно определить выводы каждой обмотки, разложить их попарно и подключить по след. схеме:





Трехфазный двигатель может работать и в однофазной сети. Мощность в самом лучшем случае будет не более 70% от номинала, пусковой момент сильно зависит от пусковой емкости, сложность подбора рабочей емкости при изменяющейся нагрузке.

**Скорость вращения поля статора**

При питании обмотки статора трёхфазным (в общем случае — многофазным) током создаётся вращающееся магнитное поле, синхронная частота вращения n_1\,\! [об/мин] которого связана с частотой питающего напряжения сети f\,\! [Гц] соотношением:

n_1 = \frac{60f}{p},

где p\,\! — число пар магнитных полюсов обмотки статора.

В зависимости от количества числа пар полюсов возможны следующие значения частот вращения магнитного поля статора, при частоте питающего напряжения сети 50 Гц:

|  |  |
| --- | --- |
| **n, об/мин** | **p** |
| 3000 | 1 |
| 1500 | 2 |
| 1000 | 3 |
| 300 | 10 |

Большинство двигателей имеют 1-3 пары полюсов, реже 4. Большее число полюсов используется очень редко, такие машины имеют низкий КПД и коэффициент мощности, однако позволяют очень плавно и медленно вращать ротор двигателя.

**Параметры асинхронного двигателя**

**сos ϕ -** коэффициент мощности, (где φ — сдвиг фаз между [силой тока](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D0%B0_%D1%82%D0%BE%D0%BA%D0%B0) и [напряжением](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5))) — безразмерная физическая величина, характеризующая потребителя [переменного электрического тока](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA) с точки зрения наличия в нагрузке [реактивной составляющей](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%BE%D1%89%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C). Коэффициент мощности показывает, насколько сдвигается по фазе переменный ток, протекающий через нагрузку, относительно приложенного к ней напряжения.

**Мощность**

Коэффициент мощности необходимо учитывать при проектировании электросетей. Низкий коэффициент мощности ведёт к увеличению доли потерь электроэнергии в электрической сети в общих потерях. Чтобы увеличить коэффициент мощности, используют [компенсирующие устройства](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B8%D1%80%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0). Неверно рассчитанный коэффициент мощности может привести к избыточному потреблению электроэнергии и снижению [КПД](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%B4%D0%B5%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B8%D1%8F) электрооборудования, питающегося от данной сети.

Для расчётов в случае гармонических переменных U (напряжение) и I (сила тока) используются следующие [математические](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0) формулы:

1. \cos \varphi = \frac{P}{S} 
2. P = U \times I \times \cos \varphi
3. Q = U \times I \times \sin \varphi
4. S = U \times I = \sqrt{P^2+Q^2} 

Здесь ~P  — активная мощность, ~S  — полная мощность, ~Q  — реактивная мощность.

**1.2 Режимы работы асинхронного двигателя**

***Двигательный режим.*** Если ротор неподвижен или частота его вращения меньше синхронной, то вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС, под действием которой в обмотке ротора возникает ток. На проводники с током этой обмотки (а точнее, на зубцы сердечника ротора), действуют электромагнитные силы; их суммарное усилие образует электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор вслед за магнитным полем. Если этот момент достаточен для преодоления сил трения, ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения n_2\,\! [об/мин] соответствует равенству электромагнитного момента тормозному, создаваемого нагрузкой на валу, силами трения в подшипниках, вентиляцией и т. д. Частота вращения ротора не может достигнуть частоты вращения магнитного поля, так как в этом случае угловая скорость вращения магнитного поля относительно обмотки ротора станет равной нулю, магнитное поле перестанет индуцировать в обмотке ротора ЭДС и, в свою очередь, создавать вращающий момент; таким образом, для двигательного режима работы асинхронной машины справедливо неравенство:

0 \le n_2 < n_1.

Относительная разность частот вращения магнитного поля и ротора называется *скольжением*:

s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.

Очевидно, что при двигательном режиме 0 < s \le 1\,\!.

***Генераторный режим.*** Если ротор разогнать с помощью внешнего момента (например, каким-либо двигателем) до частоты, большей частоты вращения магнитного поля, то изменится направление ЭДС в обмотке ротора и активной составляющей тока ротора, то есть асинхронная машина перейдёт в *генераторный режим*. При этом изменит направление и электромагнитный момент, который станет тормозным. В генераторном режиме работы скольжение s < 0\,\!.

Для работы асинхронной машины в генераторном режиме требуется источник реактивной мощности, создающий магнитное поле. При отсутствии первоначального магнитного поля в обмотке статора поток создают с помощью постоянных магнитов, либо при активной нагрузке за счёт остаточной индукции машины и конденсаторов, параллельно подключенных к фазам обмотки статора.

Асинхронный генератор потребляет реактивный ток и требует наличия в сети генераторов реактивной мощности в виде синхронных машин, [синхронных компенсаторов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B8%D1%80%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0), [батарей статических конденсаторов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B8%D1%80%D1%83%D1%8E%D1%89%D0%B8%D0%B5_%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%B0) (БСК). Из-за этого, несмотря на простоту обслуживания, асинхронный генератор применяют сравнительно редко, в основном в качестве [ветрогенераторов](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80) малой мощности, вспомогательных источников небольшой мощности и тормозных устройств. Генераторный режим асинхронного двигателя используется довольно часто в механизмах с активным моментом: в таком режиме могут работать двигатели эскалаторов метро (при движении вниз), опускании груза в [подъёмных кранах](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D1%80%D1%83%D0%B7%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D0%B4%D1%8A%D1%91%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BA%D1%80%D0%B0%D0%BD), в генераторном режиме также работают двигатели лифтов, в зависимости от соотношения веса в кабине и в противовесе; при этом сочетаются необходимый по технологии режим торможения механизма и рекуперация энергии сеть с экономией электроэнергии.

***Режим холостого хода***

Режим холостого хода асинхронного двигателя возникает при отсутствии на валу нагрузки в виде [редуктора](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80) и рабочего органа. Из опыта холостого хода могут быть определены значения намагничивающего тока и мощности потерь в магнитопроводе, в подшипниках, в вентиляторе. В режиме реального холостого хода *s*=0,01-0,08. В режиме идеального холостого хода *n*2=*n*1, следовательно *s*=0 (на самом деле этот режим недостижим, даже при допущении, что трение в подшипниках не создаёт свой момент нагрузки — сам принцип работы двигателя подразумевает отставание ротора от поля статора для создания поля ротора. При *s*=0 поле статора не пересекает обмотки ротора и не может индуцировать в нём ток, а значит не создаётся магнитное поле ротора.)

### Режим электромагнитного тормоза (противовключение)

Если изменить направление вращения ротора или магнитного поля так, чтобы они вращались в противоположных направлениях, то ЭДС и активная составляющая тока в обмотке ротора будут направлены так же, как в двигательном режиме, и машина будет потреблять из сети активную мощность. Однако электромагнитный момент будет направлен встречно моменту нагрузки, являясь тормозящим. Для режима справедливы неравенства:

n_2 < 0, s > 1\,\!.

Этот режим применяют кратковременно, так как при нём в роторе выделяется много тепла, которое двигатель не способен рассеять, что может вывести его из строя.

Для более мягкого торможения может применяться генераторный режим, но он эффективен только при оборотах, близких к номинальным.

**1.3. Способы управления асинхронным двигателем**

***Реостатное регулирование частоты*** вращения асинхронных двигателей является одним из наиболее простых способов регулирования и может осуществляться введением добавочных активных сопротивлений (резисторов) в цепь статора Rд1или ротора Rд2

Однако первый способ не нашел широкого практического распространения из-за ряда существенных недостатков— снижения максимального (критического) момента и перегрузочной способности при увеличении сопротивления, малого диапазона регулирования частоты вращения и др. Данный способ регулирования применяется для ограничения пускового момента асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, используемых, например, в приводах металлорежущих станков. Это необходимо для предотвращения ударов в механических передачах станков.

Для регулирования в широких пределах частоты вращения асинхронных двигателей с контактными кольцами используется введение дополнительных активных сопротивлений (резисторов) в роторную цепь.

***Частотное регулирование*** — система управления частотой вращения ротора асинхронного (или синхронного) [электродвигателя](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C). Состоит из собственно электродвигателя и [частотного преобразователя](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B0%D0%B7%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_(%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B2%D0%BE%D0%B4)).

### Преимущества

* Высокая точность регулирования
* Экономия электроэнергии в случае переменной нагрузки (то есть работы эл. двигателя с неполной нагрузкой)
* Равный максимальному пусковой момент
* Возможность удалённой диагностики привода по [промышленной сети](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%BC%D1%8B%D1%88%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B5%D1%82%D1%8C)
* Распознавание выпадения фазы для входной и выходной цепей
* Учёт моточасов
* Повышенный ресурс оборудования
* Уменьшение гидравлического сопротивления трубопровода из-за отсутствия регулирующего клапана
* Плавный пуск двигателя, что значительно уменьшает его износ
* ЧРП как правило содержит в себе [ПИД-регулятор](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%94-%D1%80%D0%B5%D0%B3%D1%83%D0%BB%D1%8F%D1%82%D0%BE%D1%80) и может подключаться напрямую к датчику регулируемой величины (например, давления).
* Управляемое торможение и автоматический перезапуск при пропадании сетевого напряжения
* Подхват вращающегося электродвигателя
* Стабилизация скорости вращения при изменении нагрузки
* Значительное снижение акустического шума электродвигателя, (при использовании функции «Мягкая ШИМ»)
* Дополнительная экономия электроэнергии от оптимизации возбуждения эл. двигателя
* Позволяют заменить собой автоматический выключатель

*Недостатки*

* Большинство моделей ЧРП являются источником помех
* Сравнительно высокая стоимость для ЧРП большой мощности (окупаемость минимум 1-2 года)
* Старение конденсаторов главной цепи
  1. **Частотное управление асинхронным двигателем, основные принципы**

Основной недостаток асинхронных электродвигателей – сложность регулирования их скорости традиционными методами (изменением питающего напряжения, введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток).  
      Управление асинхронным электродвигателем в частотном режиме до недавнего времени было большой проблемой, хотя теория частотного регулирования была разработана еще в тридцатых годах. Развитие частотно-регулируемого электропривода сдерживалось высокой стоимостью преобразователей частоты. Появление силовых схем с IGBT-транзисторами, разработка высокопроизводительных микропроцессорных систем управления позволило различным фирмам Европы, США и Японии создать современные преобразователи частоты доступной стоимости.   
  Известно, что регулирование частоты вращения исполнительных механизмов можно осуществлять при помощи различных устройств: механических вариаторов, гидравлических муфт, дополнительно вводимыми в статор или ротор резисторами, электромеханическими преобразователями частоты, статическими преобразователями частоты.   
      Применение первых четырех устройств не обеспечивает высокого качества регулирования скорости, неэкономично, требует больших затрат при монтаже и эксплуатации.

Статические преобразователи частоты являются наиболее совершенными устройствами управления асинхронным приводом в настоящее время.  
      Принцип частотного метода регулирования скорости асинхронного двигателя заключается в том, что, изменяя частоту **f1** питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

http://www.technowell.ru/images/formula_1.jpg

 неизменном числе пар полюсов p изменять угловую скорость магнитного поля статора.  
      Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью.  
      Регулирование скорости при этом не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя, поэтому потери мощности при регулировании невелики.  
  
      Для получения высоких энергетических показателей асинхронного двигателя – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение.  
  
      Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки **Mс**.  При постоянном моменте   нагрузки **Mс=**

**сonst**напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте**:**

**http://www.technowell.ru/images/formula_2.jpg**

Для вентиляторного характера момента нагрузки — это состояние имеет вид:

http://www.technowell.ru/images/formula_3.jpg

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

http://www.technowell.ru/images/formula_4.jpg

      Таким образом, для плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения вала асинхронного электродвигателя, преобразователь частоты должен обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на статоре асинхронного двигателя.

**1.4 Преимущества использования частотно регулируемого электропривода в технологических процессах**

  Применение регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования какого-либо технологического параметра. Если это транспортер или конвейер, то можно регулировать скорость его движения. Если это насос или вентилятор – можно поддерживать давление или регулировать производительность. Если это станок, то можно плавно регулировать скорость подачи или главного движения.

     Особый экономический эффект от использования преобразователей частоты дает применение частотного регулирования на объектах, обеспечивающих транспортировку жидкостей. До сих пор самым распространённым способом регулирования производительности таких объектов является использование задвижек или регулирующих клапанов, но сегодня доступным становится частотное регулирование асинхронного двигателя, приводящего в движение, например, рабочее колесо насосного агрегата или вентилятора.

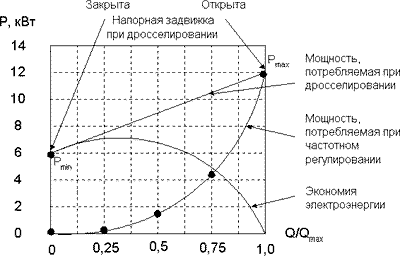
**Раздел 2. Принципы управления асинхронным двигателем.**

**2.1 Преимущества использования регулируемого электропривода в технологических процессах**

Применение регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительная экономия электроэнергии обеспечивается за счет регулирования какого-либо технологического параметра. Если это транспортер или конвейер, то можно регулировать скорость его движения. Если это насос или вентилятор – можно поддерживать давление или регулировать производительность. Если это станок, то можно плавно регулировать скорость подачи или главного движения.

      Особый экономический эффект от использования преобразователей частоты дает применение частотного регулирования на объектах, обеспечивающих транспортировку жидкостей. До сих пор самым распространённым способом регулирования производительности таких объектов является использование задвижек или регулирующих клапанов, но сегодня доступным становится частотное регулирование асинхронного двигателя, приводящего в движение, например, рабочее колесо насосного агрегата или вентилятора.

Перспективность частотного регулирования наглядно видна из рисунка



Таким образом, при дросселировании поток вещества, сдерживаемый задвижкой или клапаном, не совершает полезной работы. Применение регулируемого электропривода насоса или вентилятора позволяет задать необходимое давление или расход, что обеспечит не только экономию электроэнергии, но и снизит потери транспортируемого вещества.

* 1. **Принцип управления**

Принцип частотного метода регулирования скорости асинхронного двигателя заключается в том, что, изменяя частоту **f1** питающего напряжения, можно в соответствии с выражением

частотный преобразователь

неизменном числе  пар полюсов p изменять угловую скорость магнитного поля статора.  
  
Этот способ обеспечивает плавное регулирование скорости в широком диапазоне, а механические характеристики обладают высокой жесткостью.  
  
Регулирование скорости при этом не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя, поэтому потери мощности при регулировании невелики.  
  
Для получения высоких энергетических показателей асинхронного двигателя коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности - необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение.

Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки **M**.  При постоянном моменте   нагрузки

**M = const**

напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте**:**

формула

Для вентиляторного характера момента нагрузки, это состояние имеет вид:

формула

При моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости:

формула

Таким образом, для плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения вала асинхронного электродвигателя, преобразователь частоты должен обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на статоре асинхронного двигателя.

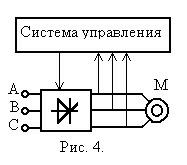
* 1. **Структура и принцип работы частотного преобразователя**

Частотные преобразователи, применяемые в регулируемом электроприводе, в зависимости от структуры и принципа работы силовой части разделяются на два класса:

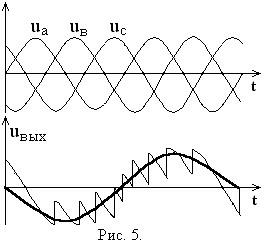
* 1. С явно выраженным промежуточным звеном постоянного тока.
  2. С непосредственной связью (без промежуточного звена постоянного тока).

Каждый из существующих классов имеет свои достоинства инедостатки, которые определяют область рационального применения каждого из них.

Исторически первыми появились преобразователи с непосредственной связью, в которых силовая часть представляет собой управляемый выпрямитель и выполнена на не запираемых тиристорах. Система управления поочередно отпирает группы тиристоров и подключает статорные обмотки двигателя к питающей сети.



Таким образом, выходное напряжение преобразователя формируется из «вырезанных» участков синусоид входного напряжения.

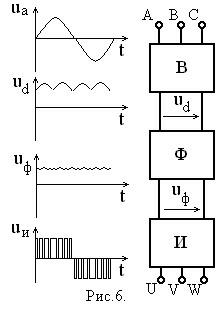


На рисунке показан пример формирования выходного напряжения для одной из фаз нагрузки. На выходе Uвых получается трехфазное синусоидальное напряжение Uа, Uв, Uс. Выходное напряжение Uвых имеет несинусоидальную «пилообразную» форму, которую условно можно аппроксимировать синусоидой (утолщенная линия). Из рисунка видно, что частота выходного напряжения не может быть равна или выше частоты питающей сети. Она находится в диапазоне от 0 до 30 Гц. Как следствие малый диапазон управления частоты вращения двигателя (не более 1: 10). Это ограничение не позволяет применять такие преобразователи в современных частотно регулируемых приводах с широким диапазоном регулирования технологических параметров.

Использование не запираемых тиристоров требует относительно сложных систем управления, которые увеличивают стоимость преобразователя.

«Резаная» синусоида на выходе преобразователя является источником высших гармоник, которые вызывают дополнительные потери в электрическом двигателе, перегрев электрической машины, снижение момента, очень сильные помехи в питающей сети. Применение компенсирующих устройств приводит к повышению стоимости, массы, габаритов, понижению к.п.д. системы в целом.

Наиболее широкое применение в современных частотно регулируемых приводах находят частотники с явно выраженным звеном постоянного тока



В частотных преобразователях этого класса используется двойное преобразование электрической энергии: входное синусоидальное напряжение с постоянной амплитудой и частотой выпрямляется в выпрямителе (В), фильтруется фильтром (Ф), сглаживается, а затем вновь преобразуется инвертором (И) в переменное напряжение изменяемой частоты и амплитуды. Двойное преобразование энергии приводит к снижению к.п.д. и к некоторому ухудшению массогабаритных показателей по отношению к преобразователям с непосредственной связью.

Для формирования синусоидального переменного напряжения используются автономные инверторы напряжения и автономные инверторы тока.

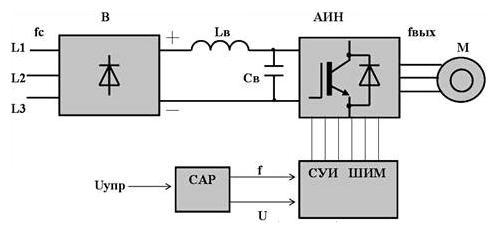
В качестве электронных ключей в инверторах применяются запираемые тиристоры GTO и их усовершенствованные модификации GCT, IGCT, SGCT, и биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT.

Главным достоинством тиристорных преобразователей частоты, как и в схеме с непосредственной связью, является способность работать с большими токами и напряжениями, выдерживая при этом продолжительную нагрузку и импульсные воздействия. Они имеют более высокий КПД (до 98%) по отношению к преобразователям на IGBT транзисторах (95 – 98%).

Преобразователи частоты на тиристорах в настоящее время занимают доминирующее положение в высоковольтном приводе в диапазоне мощностей от сотен киловатт и до десятков мегаватт с выходным напряжением 3 — 10 кВ и выше. Однако их цена на один кВт выходной мощности самая большая в классе высоковольтных преобразователей.

Частотные преобразователи с явно выраженным промежуточным звеном состоят из следующих основных частей:

* 1. Звена постоянного тока (неуправляемого выпрямителя), силового импульсного инвертора и системы управления. Звено постоянного тока состоит из неуправляемого выпрямителя и фильтра.  Переменное напряжение питающей сети преобразуется в нем в напряжение постоянного тока.
  2. Силовой трехфазный импульсный инвертор, который состоит из шести транзисторных ключей. Каждая обмотка электродвигателя подключается через соответствующий ключ к положительному и отрицательному выводам выпрямителя. Инвертор осуществляет преобразование выпрямленного напряжения в трехфазное переменное напряжение нужной частоты и амплитуды, которое прикладывается к обмоткам статора электродвигателя.  
           В выходных каскадах инвертора в качестве ключей используются силовые IGBT-транзисторы. По сравнению с тиристорами они имеют более высокую частоту переключения, что позволяет вырабатывать выходной сигнал синусоидальной формы с минимальными искажениями.



Преобразователь частоты состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя В, автономного инвертора, системы управления ШИМ, системы автоматического регулирования, дросселя Lв и конденсатора фильтра Cв.

Регулирование выходной частоты fвых. и напряжения Uвых осуществляется в инверторе за счет высокочастотного широтно-импульсного управления.

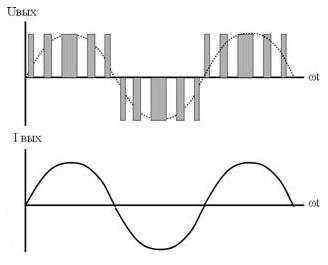
Широтно-импульсное управление характеризуется периодом модуляции, внутри которого обмотка статора электродвигателя подключается поочередно к положительному и отрицательному полюсам выпрямителя.

Длительность этих состояний внутри периода ШИМ модулируется по синусоидальному закону. При высоких (обычно 2…15 кГц) тактовых частотах ШИМ, в обмотках электродвигателя, вследствие их фильтрующих свойств, текут синусоидальные токи.

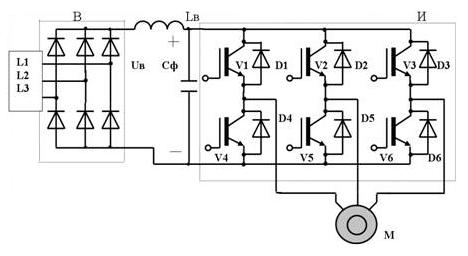
Регулирование скорости при этом не сопровождается увеличением скольжения асинхронного двигателя, поэтому потери мощности при регулировании невелики. Для получения высоких энергетических показателей асинхронного двигателя – коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности – необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение.

Таким образом, форма кривой выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов. Частота импульсов определяется частотой ШИМ, длительность (ширина) импульсов в течение периода выходной частоты АИН промодулирована по синусоидальному закону. Форма кривой выходного тока (тока в обмотках асинхронного электродвигателя) практически синусоидальна.  
Регулирование выходного напряжения инвертора можно осуществить двумя способами: амплитудным (АР) за счет изменения входного напряжения Uв  и широтно-импульсным (ШИМ) за счет изменения программы переключения вентилей V1-V6 при Uв = const.

Второй способ получил распространение в современных преобразователях частоты благодаря развитию современной элементной базы (микропроцессоры, IBGT-транзисторы). При широтно-импульсной модуляции форма токов в обмотках статора асинхронного двигателя получается близкой к синусоидальной благодаря фильтрующим свойствам самих обмоток.



Такое управление позволяет получить высокий КПД преобразователя и эквивалентно аналоговому управлению с помощью частоты и амплитуды напряжения.  
      Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов – запираемых GTO – тиристоров, либо биполярных IGBT-транзисторов с изолированным затвором. На рис. 2.45 представлена 3-х фазная мостовая схема автономного инвертора на IGBT-транзисторах.  
      Она состоит из входного емкостного фильтра Cф и шести IGBT-транзисторов V1-V6 включенными встречно-параллельно диодами обратного тока D1-D6.  
      За счет поочередного переключения вентилей V1-V6 по алгоритму, заданному системой управления, постоянное входной напряжение Uв  преобразуется в переменное прямоугольно-импульсное выходное напряжение. Через управляемые ключи V1-V6 протекает активная составляющая тока асинхронного электродвигателя, через диоды D1-D6 – реактивная составляющая тока.



И – трехфазный мостовой инвертор;  
В – трехфазный мостовой выпрямитель;

Сф – конденсатор фильтра;

**Раздел 3. Виды управления асинхронным двигателем**

# 3.1 Скалярное управление электродвигателем

**Скалярное управление** (частотное) - метод управления [электродвигателем](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/) переменного тока, который заключается в том, чтобы поддерживать постоянным отношение напряжение/частота (В/Гц) во всем рабочем диапазоне скоростей, при этом контролируется только величина и частота питающего напряжения.

Отношение В/Гц вычисляется на основе номинальных значений ([напряжения](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/#voltage) и частоты) контролируемого электродвигателя переменного тока. Поддерживая постоянным значение отношения В/Гц мы можем поддерживать относительно постоянным магнитный поток в зазоре двигателя. Если отношение В/Гц увеличивается тогда электродвигатель становится перевозбужденным и наоборот если отношение уменьшается двигатель находится в недовозбужденном состоянии.

На низких оборотах необходимо компенсировать падение напряжения на сопротивлении статора, поэтому отношение В/Гц на низких оборотах устанавливают выше чем номинальное значение. Скалярный метод управления наиболее широко используется для управления асинхронными электродвигателями.

При скалярном методе управления, скорость [асинхронного электродвигателя](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction/) контролируется установкой величины напряжения и частоты статора, таким образом, чтобы магнитное поле в зазоре поддерживалось на нужной величине. Для поддержания постоянного магнитного поля в зазоре, отношение В/Гц должно быть постоянным на разных скоростях. При увеличении скорости напряжение питания статора так же должно пропорционально увеличиваться. Однако синхронная частота асинхронного двигателя не равна частоте вращения вала, а [скольжение асинхронного двигателя](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction3ph/#slip) зависит от нагрузки. Таким образом система контроля со скалярным управлением без обратной связи не может точно контролировать скорость при наличии нагрузки. Для решения этой задачи в систему может быть добавлена обратная связь по скорости, а следовательно, и компенсация скольжения.

## Когда используется

Скалярное управление электродвигателями переменного тока - хорошая альтернатива для приложений, где нет переменной нагрузки и не требуется хорошая динамика (вентиляторы, насосы). Обычно для работы скалярного управления не требуется датчик положения ротора, а скорость ротора может быть оценена по частоте питающего напряжения. Когда используется скалярное управление, не требуется высокопроизводительный цифровой сигнальный процессор как в случае с [векторным управлением](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/).

## Недостатки скалярного управления

При скалярном управлении [электродвигателя](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/) токи статора не контролируются на прямую. [СДПМ](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/) со скалярным методом может легко стать неуправляемым (выйти из синхронного состояния) особенно когда момент нагрузки превышает значение предельного момента электропривода.

Скалярный метод не подходит для контроля СДПМ на низких оборотах для приложений, требующих высокую динамику.

Метод **скалярного управления** относительно прост в реализации, но обладает несколькими существенными недостатками:

* во-первых, если не установлен датчик скорости нельзя управлять скоростью вращения вала, так как она зависит от нагрузки (наличие датчика скорости решает эту проблему);
* во-вторых, нельзя управлять [моментом](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/#torque). Конечно, эту задачу можно решить с помощью датчика момента, но стоимость его установки очень высока, и будет скорее всего выше самого электропривода. При этом управление моментом будет очень инерционным;
* также нельзя управлять одновременно моментом и скоростью.

Скалярное управление достаточно для большинства задач, в которых применяется электропривод с диапазоном регулирования частоты вращения двигателя до 1:40.

# 3.2 Векторное управление двигателем

* [Прямой контроль момента](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/#dtc)
* [Векторное управление по полю](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/#foc)

Главная идея **векторного управления** заключается в том, чтобы контролировать не только величину и частоту напряжения питания, но и фазу. Другими словами, контролируется величина и угол пространственного вектора. Векторное управление позволяет независимо и практически безынерционно регулировать [скорость вращения](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/#frequency) и [момент на валу электродвигателя](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/#torque). Векторное управление в сравнении со [скалярным](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/scalar/) обладает более высокой производительностью. Векторное управление избавляет практически от всех недостатков скалярного управления.

**Преимущества векторного управления:**

* высокая точность регулирования скорости;
* плавный старт и плавное вращение двигателя во всем диапазоне частот;
* быстрая реакция на изменение нагрузки: при изменении нагрузки практически не происходит изменения скорости;
* увеличенный диапазон управления и точность регулирования;
* снижаются потери на нагрев и намагничивание, повышается [КПД электродвигателя](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/#efficiency).

**К недостаткам векторного управления можно отнести:**

* необходимость задания параметров [электродвигателя](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/);
* большие колебания скорости при постоянной нагрузке;
* большая вычислительная сложность.

Существует несколько разновидностей векторного управления. Наиболее широко используются [прямой контроль момента](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/#dtc) (DTC - direct torque control) и [контроль по полю](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/#foc) (FOC - field oriented control).

## Прямой контроль момента

Прямой контроль момента был представлен на рынке компанией ABB.

Этот метод имеет такие преимущества как:

* простая схема управления;
* хорошая динамика;
* не требует датчика положения ([бездатчиковое управление](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/sensorless/)).

Схема управления классического метода прямого контроля момента (DTC) на много проще, чем у метода контроля по полю (FOC), так как не требуется преобразования систем координат и измерения положения и скорости. Схема метода прямого момента (DTC) содержит оценщик момента и поля статора, гистерезисные компараторы момента и поля, таблицу включения и инвертор. Принцип метода **прямого контроля момента** заключается в выборе вектора напряжения для одновременного управления и моментом, и полем статора. Токи статора и напряжение инвертора измеряются и используются для оценки поля и момента. Оцененные величины момента и поля сравниваются с заданными значениями с помощью гистерезисного компаратора, после чего сигнал с выхода компараторов подается на таблицу включения для того, чтобы выбрать подходящие вектора напряжения в каждый период дискретизации.

Недостатком классического метода прямого контроля момента (DTC) является наличие высоких пульсаций тока и [момента](http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/motor/#torque) в установившемся состоянии. Проблема устраняется повышением рабочей частоты инвертора выше 40кГц, что увеличивает общую стоимость системы управления.

**3.3 Основные функции работы частотного преобразователя**

**Плавный пуск асинхронного двигателя**

**Необходимость ограничения тока двигателей диктуется причинами электрического и механического характера. Причины электрического характера ограничения тока двигателей могут быть следующие:**

1) Уменьшение толчков тока в сети. В некоторых случаях для крупных двигателей требуется ограничить пусковой ток до допускаемого для питающей системы.

2) Уменьшение электродинамических усилий в обмотках двигателя.

Уменьшение толчков тока в сети требуется обычно при пуске крупных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, если они получают питание от сравнительно маломощной питающей системы. Кроме того, для крупных двигателей заводы-изготовители машин не разрешают прямой пуск из-за чрезмерно больших электродинамических усилий в лобовых частях обмоток статора и ротора.

**Причины механического характера ограничения момента двигателей** могут быть самыми разнообразными, например предотвращение поломки или быстрого изнашивания передач, соскальзывания ремней со шкивов, буксования колес подвижных тележек, больших ускорений или замедлений, недопустимых для оборудования или людей в различных средствах передвижения и т. д. Иногда требуется уменьшить пусковой момент двигателей, даже небольших, для того чтобы смягчить удары в передачах и обеспечить плавное ускорение.

Во всех случаях, где условия работы не требуют форсированных ускорений или замедлений, желательно рассчитывать режимы на минимальные броски тока, а следовательно, и момента, сохраняя этим передачи механизма и двигатель.

**Режим компенсации скольжения**

Встроенная функция преобразователя позволяет поддерживать скорость двигателя постоянной вне зависимости от нагрузки на валу. Обеспечивается это динамическим регулированием выходной частоты инвертора.

Режим компенсации скольжения применяется при V/f-регулировании. В этом режиме скорость двигателя меньше заданной скорости на величину скольжения. Алгоритм работы регулятора скорости позволяет скомпенсировать скольжение, отслеживая нагрузку на валу и увеличивая или уменьшая выходную частоту инвертора.

Рассмотрим на примере. При увеличении момента нагрузки на валу с М1 до М2 скорость двигателя уменьшается с f1 до f2.

|  |
| --- |
| http://soshevsky1983.narod.ru/pic_1_4.JPG |

В режиме компенсации скольжения частотный преобразователь измеряет ток нагрузки и увеличивает выходную частоту инвертора на необходимое значение. Таким образом рабочая точка смещается не вниз по исходной механической характеристике, а переходит на новую механическую характеристику с неизменной скоростью двигателя (на рисунке стрелками показано изменение скорости-подъем по характеристике, показанной пунктиром, и горизонтальный переход на характеристику fout(M2)).

**Режим динамического торможения**

Динамическое торможение АД (торможение постоянным током) осуществляется путем подключения к двум любым обмоткам статора источника постоянного тока. При этом с помощью группы контактов К1 асинхронный двигатель сначала отключают от питания трехфазным переменным током, и только после этого, замыкают группу контактов К2 и подают постоянный ток. Величину постоянного тока регулируют сопротивлением rт (рисунок 1).

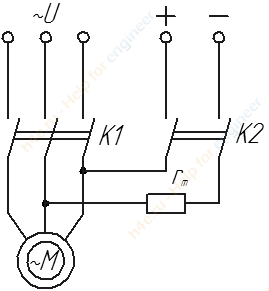


Рисунок 1 - Схема динамического торможения [асинхронного двигателя](http://h4e.ru/elektricheskie-mashini/125-asinhronniy-dvigatel-princip-raboti)

Само динамическое торможение асинхронного двигателя сопровождается следующими процессами и изменениями:

 При отключении переменного тока, [вращающееся магнитное поле](http://h4e.ru/elektricheskie-mashini/87-kak-sozdaetsya-vrashchayushcheesya-magnitnoe-pole) перестает существовать. Далее подключают источник постоянного тока, который создает постоянное магнитное поле. Ротор по инерции продолжает крутиться теперь уже в постоянном магнитном поле, в обмотке ротора наводится ЭДС, ее частота прямо пропорциональна скорости вращения вала. Появление тока в обмотке ротора вызвано наличием вышеупомянутой ЭДС. Ток создает магнитный поток, который неподвижнен относительно статора. Взаимодействие результирующего магнитного поля АД и тока ротора создает тормозной момент. При этом асинхронный двигатель становится генератором; преобразовует кинетическую энергию вращающегося вала в электрическую, которая на обмотке ротора рассеивается в виде тепловой энергии. При переходе в режим динамического торможения частота и угловая скорость равны: f=0 w0=0. Кривая динамического торможения должна проходить через начало координат и торможение происходит до полной остановки (рисунок 2).

         Эффективность динамического торможения зависит от параметров:

- Величина постоянного тока, который протекает по статорной обмотке двигателя (чем больше ток, тем больше тормозной эффект);

- Величина сопротивления, введенного в цепь ротора. Эффективность торможения повышается путем комбинирования динамического торможения и торможения с введением сопротивлений в обмотку ротора (рисунок 2):

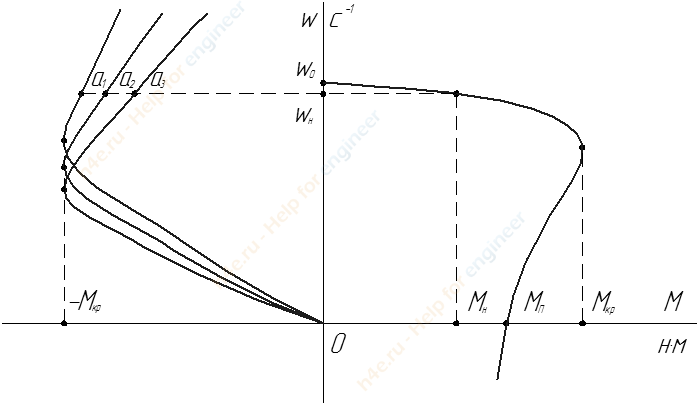


Рисунок 2 – Механическая характеристика динамического торможения асинхронного двигателя

 Чем больше сопротивление введено в цепь ротора, тем выше эффективность торможения, то есть на кривой а1изображена самая быстрая остановка двигателя при наибольшем сопротивлении - R1>R2>R3.

- Схема соединения обмоток статора.

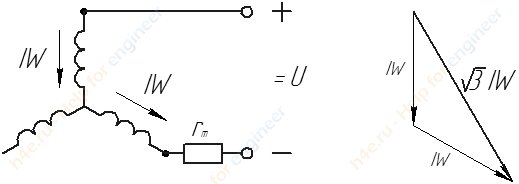
Величина магнитодвижущей силы (F) напрямую связана с понятием эффективность торможения, чем больше значение силы – тем эффективней происходит торможение,

F=I·W.

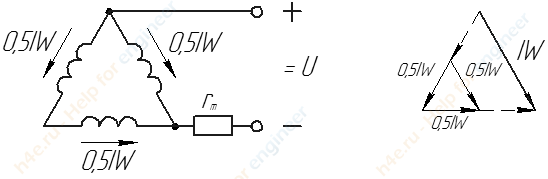
На рисунках, которые изображены ниже, стрелками показаны направления протекания постоянного тока по обмоткам, IW– ампер витки (так как количество витков в обмотках одинаково, то зависит значение только от величины тока). Векторные диаграммы иллюстрируют направления магнитодвижущих сил (F), сложив по правилам суммирования векторы, мы получим результирующий вектор, который обозначен жирной стрелкой.

Обмотка статора может быть соединена:

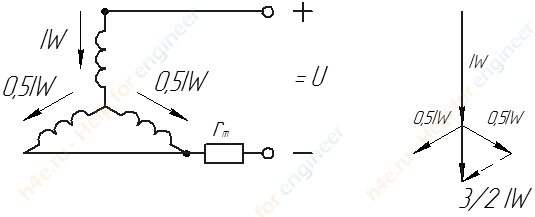
а) Схема соединения обмотки статора в звезду:



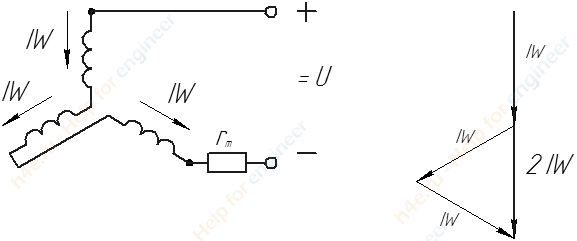
б) Схема соединения статорной обмотки в треугольник:



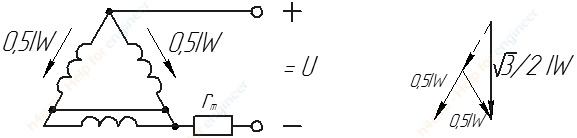
в) Соединение обмотки статора в звезду с закороченными двумя фазами:



г) Подключение звезда с разорванным нулем:



д) Подключение треугольник с закороченными фазами:



            Схемы соединения а) и б) имеют наибольшее распространение, потому что не требуют переключения при торможении самих обмоток.

            Необходимо подметить, что напряжение (U) источника постоянного тока должно быть малой величиной, потому что сопротивление обмотки статора мало. Ток выбирается из условия необходимого начального тормозного момента, обычно выбирают ~2Mном.

Преимущества режима динамического торможения:

- Относительная простота осуществления способа;

- Возможность торможения до полной остановки вала ротора;

- Высокая эффективность торможения, особенно при использовании комбинированного метода.

Основным недостатком является необходимость наличия источника постоянного тока.

Расчет величины тормозного сопротивления:

RT= 2·rф.ст+ rт,

rт=RT - 2rф.ст,

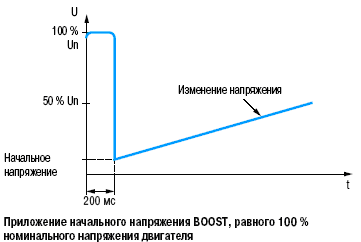
где RT - полное сопротивление цепи источника постоянного тока,

rф.ст - сопротивление фазы статора.

Вышеприведенные формулы являются частным случаем (для понимания отношений величин сопротивления), когда постоянный ток протекает только по двум обмоткам статора, если же ток будет протекать по трем обмоткам, то коэффициент (количество фаз) перед сопротивлением фазы статора нужно соответственно изменить.

**Режим boost**

**Функция BOOST поддержки напряжения** позволяет получить пусковой момент для преодоления механического трения. Применяется, когда крутящий момент при пониженном стартовом напряжении недостаточен для трогания вала с места, но основной разгон уже стартовавшего двигателя можно выполнить и от пониженного напряжения. Кривая изменения напряжения на старте показана на рис.



Возможные применения функции BOOST — дробилки, тестомесы, мясорубки. Первые 0,2 с (10 полных периодов) тиристоры полностью открыты, и двигатель ведёт себя, как и при прямом пуске, и нагружает сеть соответствующим образом. Такая короткая по времени просадка в сети обычно не вызывает аварийных остановок других механизмов. Эта функция также имеется не во всех **устройствах плавного пуска** (**УПП**).

Простейшие двухфазные **устройства плавного пуска** (**УПП**) с плавным торможением на токи до 32 А собираются в пластиковом корпусе с креплением на 35 мм DIN-рейку. На передней панели находятся регулировки времени пуска, времени торможения и начального напряжения, винты клемм питания, выхода на двигатель, логических входов для подключения кнопок «Пуск» и «Стоп» и, при наличии, BOOST, и выходы сигналов ошибки и завершения процесса разгона. Более функционально продвинутые **устройства плавного пуска** (**УПП**) позволяют устанавливать настройки и управлять процессом с интерактивной передней панели или по сетевому протоколу, реализуя, например, смену режимов пуска или последовательный запуск двигателей разной мощности.

### Automatic energy optimization AEO

Основное преимущество применения функции автоматической оптимизации энергопотребления проявляется при нагрузках с переменном крутящим моментом. Когда обороты двигателя небольшие, не требуется максимальная мощность на валу двигателя. Функция определяет минимальный уровень напряжения, при котором будут обеспечиваться заданные обороты двигателя с учетом динамического момента на валу. Функция позволяет снизить температуру двигателя и расход электроэнергии на 5-10 %

**Выбор предустановленных режимов типичных нагрузок**

Для задач, в которых применяется статическая нагрузка и требуется постоянный крутящий момент ток намагничивания двигателя должен так же оставаться постоянным во всем диапазоне управляемых преобразователем частоты оборотов. Для поддержания требуемого момента на валу двигателя требуется прямая зависимость между прилагаемым напряжением и частотой.



На графике изображена характеристика для нагрузки при постоянном крутящем моменте. Она подходит для таких задач, как конвейеры, лебедки и подобные промышленные установки.

Эта зависимость, может быть изменена в зависимости от характера нагрузки на валу двигателя.

Когда **преобразователь частоты с постоянной характеристикой U/f** применяется при нагрузке с переменным крутящим моментом, полный ток намагничивания на малых оборотах больше, чем требуется самой нагрузкой. Это перенамагничивание, создает в двигателе избыточное тепло.

Решение заключается в определении, напряжения которое требуется двигателю для правильной работы в динамическом режиме, однако поскольку для этого требуются специальные сложные функции, основанные на обратных связях многие производители преобразователей просто используют линейную характеристику. Такой подход приводит к снижению КПД двигателя, но он позволяет избежать перемагничивания двигателя и образования чрезмерного скольжения ротора двигателя.

Во многих задачах используется нагрузки, которые в процессе работы изменяют свой момент сопротивления. Для таких задач, чтобы повысить КПД двигателя, в частотных преобразователях существует настройка профиля частотной характеристики.



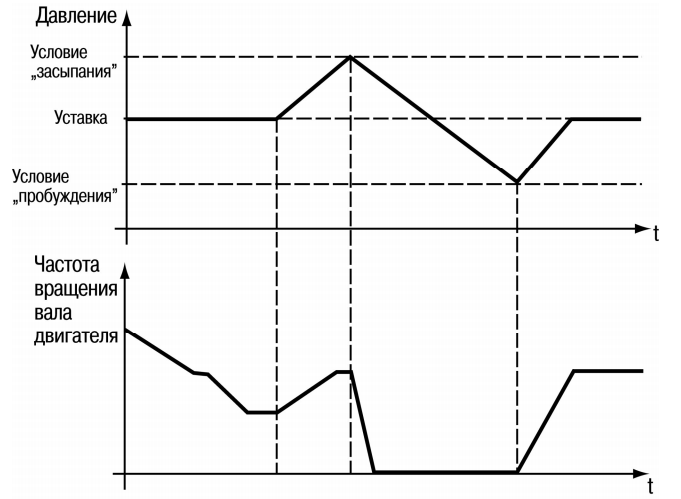
Для составления необходимого профиля нагрузки требуется большое количество экспериментов и оценок во всем диапазоне оборотов и нагрузки системы. Кроме того, если характеристики системы меняются, требуется повторить весь процесс настройки.

Некоторые изготовители преобразователей частоты предлагают пользователю выбор из ряда предварительно заданных переменных профилей U/f. Хотя это и упрощает процедуру, все еще требуется вручную прогнать двигатель через весь диапазон оборотов и определить самый низкий профиль В/Гц, который будет воспринимать нагрузку без чрезмерного скольжения ротора и нагрева двигателя.

Характеристики нагрузки могут измениться из-за сезонных изменений. В этом случае повторно должен быть осуществлен процесс ручной настройки.

**«Спящий режим» с гистерезисом**

Назначение Конфигурация «SLEEP с гистерезисом» предназначена для обеспечения дополнительной экономии электроэнергии и продления срока службы оборудования. При выполнении условия «засыпания» привод останавливается с выбегом. После выполнения условия «пробуждения», привод включается на работу. ПЧВ осуществляет управление насосом с замкнутым контуром процесса по сигналу от датчика давления с уставкой - 4 бар. Иллюстрация работы алгоритма представлена на рисунке.



### Подхват



В случае недопустимого снижения или отключения напряжения питающей сети преобразователь частоты отключится, а двигатель будет останавливаться самовыбегом. Если приводной механизм имеет большой момент инерции, как, например, у вентилятора воздуходувки, то его полный останов самовыбегом может длиться более часа! Если повторное автоматическое включение произвести до полного останова, то возникнет сильный токовый удар в обмотках двигателя, сопровождающийся механическим ударом в приводном механизме. Аналогичная ситуация возможна в насосах, когда при отсутствующем или неисправном обратном клапане двигатель под действием противонапора раскручивается в обратном направлении и попытка пуска неизбежно приводит к огромным токовым перегрузкам.

Для обеспечения безударного плавного включения на вращающийся двигатель в подобных ситуациях может быть использована функция "подхват". При использовании этой функции преобразователь частоты автоматически определяет текущую частоту вращения вала двигателя и формирует выходное напряжение таким образом, чтобы не возникло токовых перегрузок, т.е. как бы "подхватывает" двигатель. После этого двигатель плавно выводится на заданный рабочий режим. Время, требуемое для "подхвата" двигателя после восстановления напряжений питания составляет всего 4-6 секунд!

### Работа по расписанию



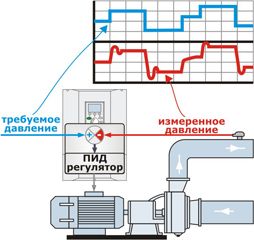
Работа многих объектов характеризуется тем, что необходимое значение технологического параметра циклически изменяется в течение суток или в течение недели. Типичный пример – это насосные станции водоснабжения жилых домов. Для таких станций график расхода является одинаковым для каждого дня; при этом существуют часы пиковой загрузки, когда насос работает с полной производительностью, и часы, когда производительность насоса снижается до минимальной. Регулирование с использованием датчика давления в таких системах затруднено из-за большой протяженности трубопроводов и необходимости поддерживать давление именно в удаленной диктующей точке сети, а не на выходе насоса.

Отличное решение в такой ситуации – это автоматическое изменение скорости вращения двигателя, а, следовательно, и производительности насоса в соответствии с заданным расписанием. Это возможно благодаря наличию в преобразователе частоты встроенного модуля часов реального времени. Каждое событие, настроенное для этого модуля, включает следующую информацию:

* выполняемое действие (пуск, останов, изменение уставки частоты или давления);
* время суток, когда наступает событие;
* дни недели, в которые событие может наступить.

Еще один пример использования расписания – системы кондиционирования, которые должны обеспечивать микроклимат в помещении, например с 7 до 18 часов, а остальное время могут быть отключены. Работа преобразователя частоты или устройства плавного пуска с использованием расписания позволит решить эту задачу без участия оператора!

### ПИД-регулирование



Наличие встроенного ПИД-регулятора позволяет просто и быстро организовать управление любым параметром технологического процесса, который зависит от скорости вращения вала двигателя. Все что необходимо для построения замкнутой системы управления – это подключить датчик технологического параметра к преобразователю частоты и настроить параметры ПИД-регулятора! Наиболее часто регулируемыми параметрами являются давление или расход воды, температура или степень разрежения воздуха. Именно использование ПИД-регулятора позволяет отказаться от использования задвижек и добиться максимального технико-экономического эффекта от внедрения преобразователей частоты.

### Защита от потери нагрузки



Многие современные насосы используют сальники и графитовые подшипники, смазываемые и охлаждаемые перекачиваемой жидкостью. Отсутствие жидкости или «заглатывание» насосом воздуха приводит к перегреву этих элементов и выходу их из строя в течение нескольких секунд. Еще одно «проблемное место» – это механизмы с муфтами или ременными передачами. В случае обрыва ремня или срыва муфты необходимо остановить технологический процесс для исключения дальнейшего разрушения механизмов. Обрыв ремня, так же, как и пропадание жидкости или кавитация в насосе характеризуется резким снижением нагрузки на валу двигателя. Преобразователь частоты или устройство плавного пуска отслеживают нагрузку на валу двигателя, и в случае ее снижения ниже установленного уровня производится останов двигателя, предупреждая выход насоса или приводного механизма из строя.

**Рекуперативный режим**

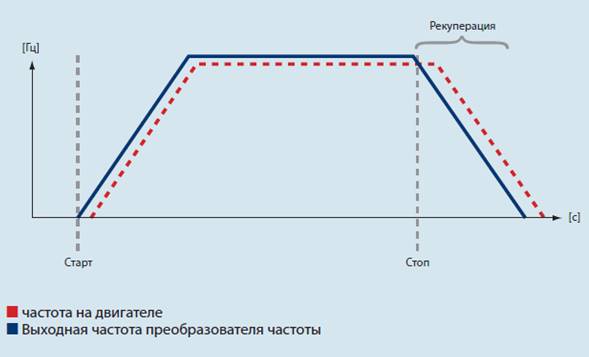
Одна из самых заманчивых идей в области сбережения энергии – это возможность использовать энергию, генерируемую в процессе работы двигателя (в режиме генератора) или частотного преобразователя. Энергия вырабатывается потому, что трехфазный индукционный двигатель работает быстрее, чем питающая его сеть; как правило, это происходит при замедлении движения.

В большинстве случаев эта энергия направляется пользователем на тормозные резисторы и превращается в тепло.Возможно, однако, что более выгодно перенаправлять эту энергию обратно в сеть или подводить ее к другим устройствам.

На практике используются два наиболее распространенных решения:

* распределение нагрузки.
* объединение по звену постоянного тока.

Для многих преобразователей возможно подключение линии постоянного тока к промежуточным цепям или другим устройствам, что позволяет подводить регенеративную энергию непосредственно к другим устройствам. Однако необходимо принимать во внимание несколько важных органичений. Необходимо убедиться в том, что короткое замыкание на одном из устройств не повредит остальные. Следует также обращать внимание на то, что произойдет в случае одновременного выброса регенеративной энергии всеми соединенными устройствами.

[](http://plc24.ru/rekuperatory-i-preobrazovateli-s-aktivnym-vypryamitelem-active-front-end/image002-55/)

В модуле частотного преобразователя, ответственного за рекуперацию энергии, используется управляемый выпрямитель, подающий энергию регенерации обратно в сеть. Данный метод применяется преимущественно при работе преобразователя с двигателем. Зачастую энергия, получаемая при рекуперации, меньше потерь, происходящих за счет работы управляемого выпрямителя. Именно, в связи с этим регенеративные преобразователи экономичны только при высоких мощностях, причем следует учитывать цикл нагрузки и множество ограничений, например, таких, как частое разъединение.

Перед вложением средств в покупку и установку рекуперационных систем или объединение модулей по звену постоянного тока операторам системы следует провести тщательную проверку ее работы и соответствующие вычисления.

Количество генерируемой энергии зачастую переоценивается. Для правильной оценки экономичности следует точно определить часть рабочего цикла, в которой система работает в регенеративном режиме, а также среднюю энергию торможения системы. В большинстве случаев, как с экономической, так и с экологической точек зрения рекомендуется использование тормозных резисторов, а не энергии, генерируемой в процессе торможения.

1. **МЕХАНИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Уравнение механического движения**

Согласно второму закону Ньютона, сформулированному им в 1687 году, преобразованному для тел вращения:

|  |  |
| --- | --- |
| *M -M*c *=M* дин, (1) |  |

где *M* – момент движения, Н·м ; *M*с – момент сопротивления, Н·м ;

1. дин – динамический момент, Н·м .

Уравнение 1 в электроприводе получило также название «уравнение движения». Согласно уравнению движения, если *M>M*c , то *M*дин>0 и электропривод находится в состоянии ускорения. Если

1. *M<M*c,то *M* дин *=* 0–электропривод замедляется или тормозится.И,

наконец, если *M=M*c , то *M*дин=0 – электропривод находится в состоянии покоя или равномерного установившегося движения.

Таким образом, динамический момент проявляется и действует только в переходных режимах при ускорении и замедлении электропривода. То есть тогда, когда меняется кинетическая энергия электропривода. Выражение для определения динамического момента *M*дин найдем из уравнения, определяющего запас кинетической энергии во вращающемся теле:

*(2)*

где *J*=*m·r* 2–момент инерции тела обладающего массой *m* ,кг·м2;

1. – радиус вращающегося тела правильной цилиндрической формы, м.

Мощность, которую вращающиеся массы получают при ускорении электропривода или отдают при торможении

Тогда, динамический момент можно найти из выражения:

(4)

Уравнение для определения динамического момента состоит из двух составляющих: первое из них определяет изменение динамического момента при изменении угловой скорости ω электропривода, второе при изменении его момента инерции *J*.

1. В электроприводе изменение момента инерции наблюдается в механизмах роботов или манипуляторов, в том случае, когда во время их вращения вокруг центральной оси меняется вылет руки. Пример, показывающий изменение момента инерции во время вращения, можно наблюдать у фигуристов, выполняющих элемент «вращение». Прижимая руки к телу во время вращения, фигурист уменьшает собственный момент инерции. Так как кинетическая энергия при этом не изменяется, то его скорость вращения резко возрастает. При проектировании электроприводов необходимо помнить, что такие же процессы происходят и в кинематике некоторых типов электроприводов.
2. В тех случаях, когда момент инерции электропривода *J* во времени не изменяется вторым членом в правой части уравнения 4 пренебрегают и динамический момент определяют по выражению:
3. (5)

Таким образом, динамический момент в электроприводе проявляется в большинстве практических случаев только при ускорении или замедлении.

Момент движения в электроприводе обычно обеспечивает электрический двигатель и только в ряде случаев, движение обеспечивает рабочий орган производственного механизма, а электрическая машина тормозит его, обеспечивая равномерность движения.

Момент движения *M* электрической машины является функцией

1. скорости ω. Зависимость между скоростью ω электрической машины и ее моментом *M =f* (ω) называют механической характеристикой.

Механические характеристики электрических машин изображают в виде графиков в правой декартовой системе координат.

**Слайд 1.**

Для удобства рассмотрения процессов, происходящих в электроприводе, считают одно из двух возможных направлений вращения двигателя за положительное. Как правило, за положительное направление вращения двигателя принимают вращение, совпадающее с направлением вращения часовой стрелки. Принимают, что момент электродвигателя имеет тот же знак, что и угловая скорость, если их направления совпадают. В системах электропривода основным режимом работы электрической машины является двигательный режим. Двигательный режим работы электрической машины располагают в первом и третьем квадрантах. Генераторные режимы работы электрической машины располагают во втором и четвертом квадрантах.

В установившемся режиме работы момент сопротивления *M* с имеет тормозящий характер и действует навстречу моменту двигателя. Для простоты нахождения установившегося режима работы электропривода принимают за положительное направление момента сопротивления *M* с противоположное положительному направлению момента двигателя. На слайде1 установившееся значение скорости определено в соответствии с (1) при равенстве по абсолютной величине момента движения *M* и момента сопротивления *M*с .

**Механические характеристики электродвигателей**

При рассмотрении работы электропривода, вращающего рабочий орган производственного механизма, необходимо, прежде всего, выявить соответствие механических свойств электродвигателя и производственного механизма. Поэтому для правильного проектирования и экономичной эксплуатации электропривода необходимо изучить и механические характеристики электрических машин, и производственных механизмов.

Механическая характеристика электродвигателя определяет зависимость его скорости ω от развиваемого им момента *M* . Часто вместо угловой скорости ω используют внесистемную физическую величину – частоту вращения *n*, так как эти величины пропорциональны друг другу:

1. (6)
2. этом случае механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его частоты вращения *n* от развиваемого им момента *M*, то есть *n f*(*M*).

Степень изменения скорости с изменением момента у различных типов электрических машин неодинакова и различаются в зависимости от жесткости механических характеристик.

**Слайд 2**

Под жесткостью механической характеристики *k* будем пони-

мать отношение приращения момента *M* к приращению скорости двигателя ω:

где *M*1, ω1 – момент и угловая скорость в первой точке механической характеристики; *M*2, ω2 – момент и угловая скорость во второй точке механической характеристики.

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основных типа в зависимости от их жесткости *k*:

абсолютно жесткая механическая характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной. Из (7) следует, что если ω=0, то . Такой характеристикой обладают синхронные двигатели **Слайд 3. (Линия 1)**

жесткая механическая характеристика, отличающаяся незначительным изменением угловой скорости с изменением момента. Жесткой механической характеристикой обладают асинхронные двигатели **(Кривая 2)** и двигатели постоянного тока независимого и параллельного возбуждения **(Линия 3)**

мягкая механическая характеристика отличается значительным изменением угловой скорости с изменением момента. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения **(кривая 4)** и двигатели постоянного тока смешанного возбуждения **(кривая 5);**

абсолютно мягкая механическая характеристика, при которой момент двигателя остается неизменным с изменением угловой скорости. Из (7) следует, что если *M*=0, то =0 . Абсолютно мягкой

механической характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании обмотки якоря от источника тока **(зависимость 6).**

При любом типе механической характеристики электродвигателя вращающий момент двигателя определяется нагрузкой на его валу, то есть моментом сопротивления *M*c .

**Механические характеристики производственных**

**механизмов**

Под механической характеристикой производственного механизма понимается зависимость момента сопротивления *M*c механизма от его угловой скорости: *M*c=*f*(ω). При изображении механических характеристик двигателя и производственного механизма в одной системе координат их приводят к одной оси вращения, как правило, к валу двигателя.

Производственные механизмы различающихся как по потребляемой мощности, так и по принципу действия, их механические характеристики можно разделить на пять основных типов:

Независящая от угловой скорости механическая характеристика производственного механизма. К таким механизмам относятся те из них, у которых преобладающим моментом является момент от сил трения: механизмы подач металлорежущих станков, механизмы перемещения подъемных кранов, конвейеры, поршневые насосы. Уравнение механической характеристики

|  |  |
| --- | --- |
| *M* c *=M*c1 *=*const | (8) |

где *M*c1 – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма.

Графически независящая от угловой скорости механическая характеристика производственного механизма приведена на **слайде 4 (зависимость 1).**

* Линейно-возрастающая механическая характеристика производственного механизма. Такой характеристикой обладают генераторы постоянного тока, работающие на постоянную нагрузку, обжимные валки прокатных станов, гладильные машины. Уравнение механической характеристики

|  |  |
| --- | --- |
| *M* c *= M*c2*+ a·*ω, | (9) |

где *M* c2 – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма; *a* – коэффициент пропорциональности. **(зависимость 2)**

* Нелинейно-возрастающая механическая характеристика производственного механизма. Такой характеристикой обладают механизмы с центробежным характером производственного процесса: вентиляторы, центробежные насосы, центрифуги, гребные винты. Уравнение механической характеристики

|  |  |
| --- | --- |
| *M* c *=M*c3*+b·*ω*x*, | (10) |

где *M* c3 – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма; *b* – коэффициент пропорциональности;

*x* – показатель степени; при *x* =2 – движение в газообразной среде, при *x* =3 – движение в жидкости. **(зависимость 3)**

* Нелинейно-спадающая механическая характеристика производственного механизма. Такой характеристикой обладают главные электроприводы обрабатывающих станков: металлообрабатывающих, фанерострогальных и др. В таких станках момент резания меняется обратно пропорционально скорости резания. Например, тонкое сверло – большая скорость вращения патрона, сверло большого диаметра – маленькая скорость вращения патрона. Уравнение механической характеристики

|  |  |
| --- | --- |
| *M* c *=M* c4 *+c·*ω-1, | (11) |

где *M* c4 – момент сопротивления от сил трения в движущихся частях производственного механизма; *c* – коэффициент пропорциональности. **(зависимость 4)**

* Механическая характеристика производственного механизма с повышенным пусковым моментом. Такой характеристикой обладают миксеры, некоторые механизмы перемешивания жидких сред, например, краски и другие. В таких механизмах, после того как в ограниченном пространстве начнет вращаться вся жидкость, момент сопротивления резко падает. В некоторых механизмах большой пусковой момент развивается в начале трогания, например, в электроприводе главного движения трамвая, электропоезда, механизма гайковертов при откручивании гаек. **(зависимость 5)**.

1. С целью поддержания наиболее устойчивой скорости электропривода при случайных изменениях момента сопротивления производственного механизма, в первую очередь обусловленного несоосностью и эксцентриситетом сопрягающих валов, необходимо обеспечить пересечение механической характеристики двигателя и механической характеристики механизма, приведенного к валу двигателя под углом наиболее близким к прямому.
2. По характеру действия все виды статических моментов можно разделить на: реактивные и активные.

Реактивными моментами обладают почти все механизмы – то есть те механизмы, у которых момент создается силами трения. Такие моменты всегда препятствуют движению и поэтому меняют свой знак с изменением направления движения. Механические характеристики производственных механизмов с реактивными моментами приведены на **слайде 5**, зависимости *M*c=*f*(ω). Здесь показаны механические характеристики двигателя постоянного тока и скорости его установившегося движения.

Группа механизмов создает активный момент. Механизмы с активным моментом не только препятствуют движению, но при определенных условиях сами создают вращение электропривода. Видно, что электрическая машина с целью обеспечения постоянства скорости переходит в тормозной режим.

Активные моменты сохраняют свой знак при изменении направления вращения. Характерным примером механизма с активным моментом является лебедка или механизм подъема крана. Механические характеристики производственных механизмов с активными моментами приведены на **слайде 6**, зависимость *M*c=*f*(ω). Здесь показаны механические характеристики асинхронного двигателя и скорости его установившегося движения.

**Двигатель постоянного тока с независимым возбуждением**

**Слайд 7**

*Параметры ДПТ.*

*P*дв.н – номинальная мощность двигателя, кВт;

*U*дв.н – номинальное напряжение обмотки якоря, В;

*I*дв.н – номинальный ток обмотки якоря двигателя, А;

*R*оя – сопротивление обмотки якоря двигателя при 15°С, Ом;

*R*дп – сопротивление дополнительных полюсов двигателя при 15°С, Ом;

*R*ко – сопротивление компенсационной обмотки двигателя при 15°С, Ом;

*L*дв – индуктивность обмотки якоря двигателя, Гн;

ηдв.н – номинальный коэффициент полезного действия, %;

*n*дв.н – номинальная частота вращения, об/мин;

*J*дв – момент инерции якоря, кг·м2 .

Сопротивления двигателя приводятся в каталогах при температуре 150 С. В нагретом состоянии при рабочей температуре сопротивление двигателя



где α 0,0039 0,0041 - температурный коэффициент сопротивления меди (обычно принимается α 0,004 ); θ2 - рабочая температура обмотки машины; θ1 - температура, при которой указываются сопротивления в каталогах.

Вывод уравнений статических характеристик двигателя постоянного тока проводится с учетом следующих допущений:

щетки якоря стоят на геометрической нейтрале, поэтому поперечную реакцию якоря не учитываем и считаем поток, созданный обмоткой возбуждения постоянным;

потерями в подшипниках, щеточно-коллекторном узле и на вентиляцию пренебрегаем, то есть, считаем момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для якорной цепи электродвигателя:

*U= E+ I· R*яц, (12)

Приведенная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения содержит дополнительные полюса с активным сопротивлением *R*дп и компенсационную обмотку с активным сопротивлением *R*ко.Двигатели постоянного тока выполняют с дополнительными полюсами с целью улучшения процессов коммутации. Компенсационная обмотка в машинах постоянного тока обеспечивает компенсацию поперечной составляющей реакции якоря.

где *R*яц*=R*дв*+R*д–полное сопротивление цепи обмотки якоря; *R*дв*=R*оя+*R*дп*+R*ко–сопротивление двигателя,равное сумме сопротивлений обмотки якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки.

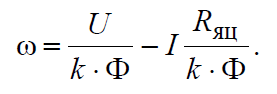
ЭДС обмотки якоря можно найти в соответствие с уравнением Максвелла:

|  |  |
| --- | --- |
| *E=k·*Ф*·*ω, | (13) |

где Ф – магнитный поток, созданный обмоткой возбуждения, Вб; ω – угловая скорость двигателя, рад/c; *k=zp* *N/*(2*·*π*·a*) – конструктивный коэффициент двигателя постоянного тока; *zp* – число пар полюсов

двигателя; *N* – число витков обмотки якоря; *a* – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Подставив (13) в (11) и, решив полученное выражение относительно угловой скорости ω, получим уравнение электромеханической характеристики двигателя постоянного тока:

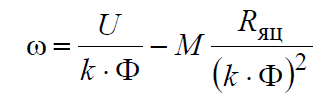
 (14)

Электромагнитный момент двигателя находится из уравнения Фарадея:

*M=k·*Ф*·I* (15)

Решим (15) относительно тока якоря двигателя *I* и подставим его в

(14), получим уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока:

 (16)

*Механической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость его угловой скорости ω от момента двигателя *M*.

Различают естественную и искусственные механические характеристики двигателя постоянного тока.

*Естественной механической характеристикой* двигателя постоянного тока называют зависимость угловой скорости двигателя ω от момента его *M* , полученную при номинальной схеме включения двигателя, номинальных параметрах напряжения обмоток якоря и возбуждения и отсутствии добавочных сопротивлений в цепях двигателя. *Все* *остальные характеристики называют искусственными*.С помощьюискусственных характеристик производят регулирование скорости двигателя.

**Пример.** Для двигателя постоянного тока типа П-11У4,имеющего следующие технические данные, рассчитать и построить статические электромеханическую и механическую характеристики.

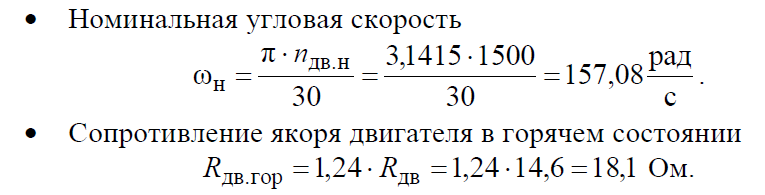
* Основные параметры двигателя:
* номинальная мощность *P*дв.н=0,3 кВт
* номинальное напряжение *U*дв.н =220 В
* Номинальный ток двигателя *I*дв.н =2,066А
* сопротивление двигателя при 150 С, *R*дв =14,6 Ом
* номинальная частота вращения *n*дв.н=1500об/мин
* индуктивность двигателя *L*дв=0,248 Гн
* момент инерции якоря двигателя *J*дв 0,0031кг м2
* допустимый ток двигателя *I*доп 4 *I*дв.н

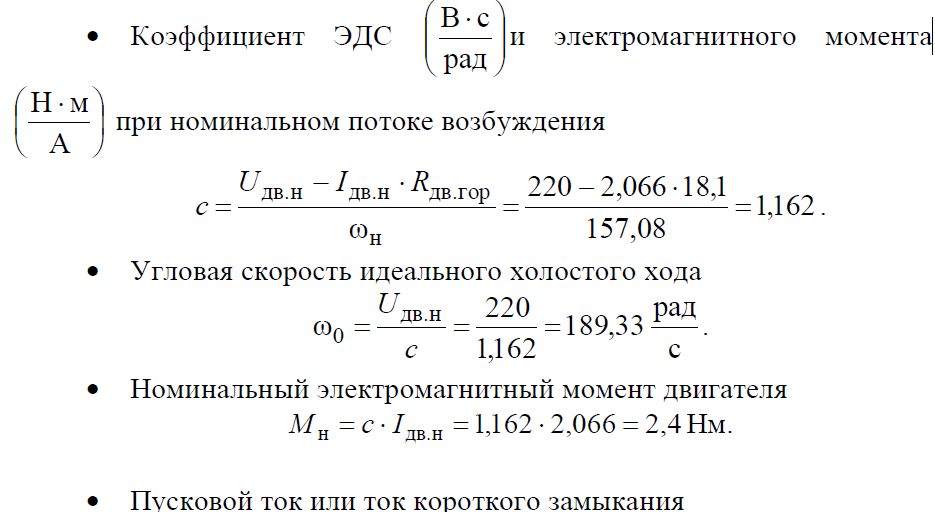
*Решение*.

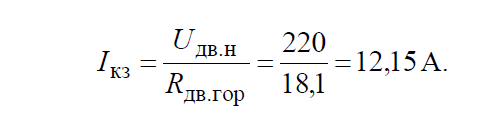
Так как электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения описываются уравнениями прямой, то для их расчета и построения достаточно определить две любые точки. Как правило, координатами этих точек являются: 1) скорость идеального холостого хода ω0, при нулевом токе якоря и электромагнитном моменте и 2) номинальная угловая скорость ωн при номинальном токе *I*дв.н и номинальном электромагнитном моменте *M*н.

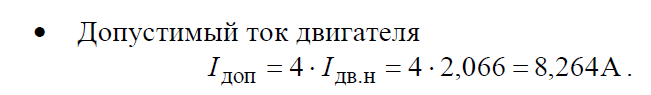
Определим дополнительные параметры двигателя

Номинальная угловая скорость









Рассчитанные статическая естественная электромеханическая и механическая характеристики двигателя приведены на **слайде 8**

**Вывод.** Естественная электромеханическая характеристика двигателя не обеспечивает ограничение пускового тока на допустимом уровне. Как следствие пуска двигателя прямым включением в сеть – неудовлетворительная коммутация на коллекторе и выход коллектора из строя.

**Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

Основными показателями, характеризующими различные способы регулирования скорости электродвигателя, являются:

* диапазон регулирования скорости;
* плавность регулирования скорости;
* погрешность регулирования скорости;
* направление регулирования скорости;
* допустимая нагрузка двигателя.

Под *диапазоном регулирования скорости* электропривода будем понимать отношение средних: максимальной и минимальной скорости электропривода при заданном диапазоне изменения нагрузки на валу двигателя.

*Плавностью регулирования* скорости электропривода называетсяотношение разности двух соседних значений скорости ω*i* и ω*i*-1 электропривода к ее номинальному значению

*Погрешностью поддержания скорости* электропривода называется отношение приращения скорости электропривода при изменении нагрузки от нуля до номинальной, к скорости при номинальной нагрузке

где – скорость идеального холостого хода, рад/c;

– скорость при номинальной нагрузке.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |

*Направление регулирования скорости*,то есть уменьшение илиувеличение ее по отношению к номинальной скорости, зависит от способа регулирования скорости.

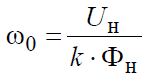
*Допустимой нагрузкой двигателя* называется наибольшее значение момента, который двигатель способен развивать длительно при работе на регулировочной характеристике. Определяется нагревом двигателя и зависит от способа регулирования скорости.

**Способы регулирования скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения**

1. Изменение сопротивления цепи обмотки якоря **слайд 9**

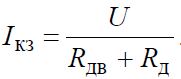
Схема содержит обмотку якоря двигателя *M*, два последовательно включенных добавочных сопротивления *R*д1 и *R*д2, которые шунтированы замыкающими контактами *KM*1 и *KM*2 . Обмотка возбуждения двигателя *LM* питается от отдельного источника напряжения *U*ов . Регулирование скорости двигателя осуществляется при номинальном потоке возбуждения Фн и номинальном напряжении обмотки якоря *U*н . Следовательно, электромагнитный момент двигателя пропорционален току якоря и механические и электромеханические характеристики будут совпадать в относительных единицах.

При токе обмотки якоря равном нулю *I*=0 , двигатель вращается

со скоростью идеального холостого хода 

Скорость идеального холостого хода не зависит от добавочного сопротивления якорной цепи и для данного способа регулирования скорости остается постоянной. Следовательно, все искусственные электромеханические характеристики двигателя независимого возбуждения выходят на оси ординат из одной точки с координатами *I*=0; ω0.

При скорости равной нулю ω=0 по обмотке якоря двигателя протекает

ток короткого замыкания . Ток короткого замыкания обратно пропорционален сопротивлению цепи обмотки якоря и уменьшается с увеличением этого сопротивления. Этим свойством пользуются для ограничения бросков тока якоря при пусках двигателя независимого возбуждения в релейно-контакторных схемах управления. Регулирование скорости производится под нагрузкой. Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости ωу*i* под нагрузкой *I*c уменьшаются

увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря. Погрешность регулирования скорости возрастает с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях цепи обмотки якоря.

1. Регулирование скорости изменением напряжения обмотки якоря **Слайд 11**

Такое регулирование возможно в том случае, когда обмотка якоря питается от отдельного преобразователя П. Обмотка возбуждения *LM* двигателя питается от отдельного источника постоянного напряжения *U*ов и создает номинальный поток Фн.

Напряжение на выходе преобразователя определяется уравнением:

*U*п *= E*п*- I·R*п, (17)

где *E*п – ЭДС преобразователя, В; *R*п – внутреннее сопротивление преобразователя, Ом.

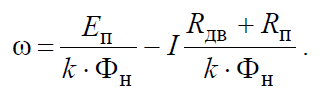
Так как обмотка якоря двигателя включена непосредственно на выход преобразователя, то напряжение на обмотке якоря равно напряжению на выходе преобразователя:

*U =U*п. (18)

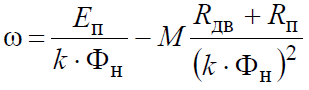
На основании (18) приравняем правые части уравнений (17) и (12), с учетом (13) и того, что добавочное сопротивление в цепи обмотки якоря двигателя отсутствует *R*д 0, получим:

|  |  |
| --- | --- |
| *E*п *- I·R*п*=k ·*Фн*·*ω*+I·R*дв | (19) |

Решив (19) относительно ω получим уравнение электромеханической характеристики двигателя управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения, работающего в системе преобразователь – двигатель:

 (20)

Решив (15) относительно тока якоря двигателя *I* и подставив его

1. (20), получим уравнение механической характеристики двигателя управляемого по цепи обмотки якоря изменением напряжения, работающего в системе преобразователь – двигатель:
2.  (21)

**Слайд 12**

Электромеханические характеристики параллельны друг другу, большему ЭДС преобразователя соответствует большая скорость идеального холостого хода ω0*i*.

Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением напряжения обмотки якоря плавное.

Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Установившиеся значения скорости ωу*i* снижаются с

уменьшением напряжения обмотки якоря.

Погрешность регулирования скорости возрастает с уменьшением напряжения обмотки якоря и на нижних регулировочных характеристиках может достигать 0,3 0,4 относительных единиц.

Регулирование скорости производится с высоким КПД, достигающим значений 0,9 0,95 в электроприводах с транзисторными и тиристорными силовыми преобразователями.

1. Регулирование скорости двигателя потоком возбуждения

**Слайд 13**

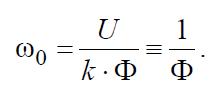
Регулирование скорости двигателя постоянного тока независимого возбуждения изменением потока возбуждения производится в маломощной цепи обмотки возбуждения, что облегчает и удешевляет аппаратуру управления.

Обмотка якоря двигателя *M* питается от отдельного источника напряжения *U*. Обмотка возбуждения *LM* двигателя подключена к полууправляемому выпрямителю, состоящему из диодов *VD*1...*VD*3 и тиристора *VS*1. Такая схема регулирования напряжения обмотки возбуждения применяется для двигателей мощностью до 100 кВт.

Регулирование скорости при использовании этого способа осуществляется уменьшением потока возбуждения. Это связано с тем, что увеличение потока возбуждения требует роста напряжения на обмотке возбуждения выше номинального, а это в свою очередь может привести пробою изоляции обмотки. Кроме того, номинальный поток Фн обмотки возбуждения близок к потоку насыщения магнитной цепи электродвигателя и увеличение тока намагничивания не приводит к существенному росту потока возбуждения.

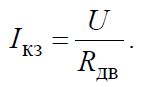
Так как при данном способе регулирования поток возбуждения не равен номинальному, то электромеханические и механические характеристики двигателя независимого возбуждения не будут совпадать, даже построенные в безразмерных единицах.

Проведем анализ искусственных электромеханических характеристик. Скорость идеального холостого хода обратно пропорциональна потоку возбуждения:



Таким образом, с уменьшением потока возбуждения скорость идеального холостого хода будет увеличиваться.

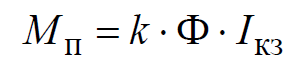
При скорости равной нулю остается постоянным ток короткого замыкания:



Следовательно, все электромеханические характеристики на оси абсцисс сходятся в одной точке *I*кз .

**Слайд 14**

Механические характеристики имеют те же скорости идеального холостого хода, что и электромеханические. Пусковой момент двигателя, определяемый по выражению



будет уменьшаться с уменьшением потока возбуждения.

**Слайд 15**

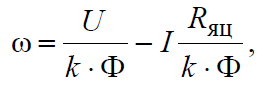
Способ регулирования применяется для механизмов, работающих с постоянной мощность. Регулирование скорости плавное.

Регулирование скорости производится с высоким КПД, так как потребление энергии при регулировании скорости уменьшается за счет снижения напряжения на обмотке возбуждения.

**Схема включения и статические характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения**

**Слайд 16**

Уравнение электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения, так же как и для двигателя независимого возбуждения определяется выражением

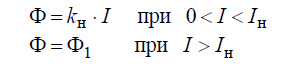
 (22)

где *R*яц *R*дв *R*ов *R*д – сопротивление цепи обмотки якоря, состоящее из сопротивления обмотки якоря, дополнительных полюсов, обмотки возбуждения и добавочного сопротивления цепи обмотки якоря.

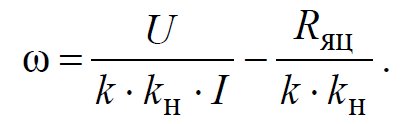
При изменении нагрузки на валу двигателя угловая скорость будет изменяться, как за счет падения напряжения на сопротивлениях якорной цепи, так и за счет увеличения потока возбуждения Ф. У двигателя постоянного тока последовательного возбуждения обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря, поэтому ток обмотки якоря является одновременно и током обмотки возбуждения.

Зависимость потока возбуждения от тока возбуждения двигателя представлена универсальной кривой намагничивания. Кривая намагничивания не имеет точного аналитического выражения и в расчетах обычно аппроксимируется отрезками прямых. **Слайд 17**

Кривая намагничивания может быть аппроксимирована двумя прямыми отрезками:

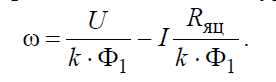
 ( 23,24)

где *k*н – коэффициент пропорциональности между током и потоком кривой намагничивания; Ф1 – поток насыщения кривой намагничивания двигателя. Подставим (23) в (14), получим уравнение электромеханической характеристики двигателя последовательного возбуждения при линейной зависимости потока возбуждения от тока якоря

 (25)

Эта зависимость носит гиперболический характер.

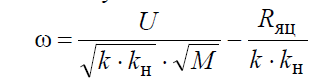
При токах якоря двигателя больших номинального тока при принятом законе аппроксимации поток двигателя стабилизируется и становится равным Ф1. На этом участке работы электродвигателя его электромеханическая характеристика описывается уравнением:

 (26)

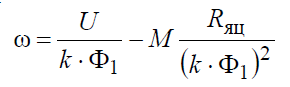
Получится уравнение прямой линии. Таким образом, при больших нагрузках зависимость между угловой скоростью двигателя и током обмотки якоря линейная.

При принятой аппроксимации график электромеханической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведен на **слайде 18**

Механическая характеристика двигателя постоянного тока определяется уравнением

 (27)

При больших нагрузках, когда поток ограничивается на уровне Ф1, механическая характеристика двигателя последовательного возбуждения определяется выражением:

 (28)

При принятой аппроксимации график механической характеристики двигателя постоянного тока последовательного возбуждения приведен на **слайде 19**

Особенность электромеханической и механической характеристик двигателя последовательного возбуждения является то, что они нелинейны при малых нагрузках и становятся практически линейными при нагрузках больших, чем номинальная;

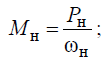
* большинстве практических случаев для расчета естественных электромеханических и механических характеристик двигателя последовательного возбуждения используют универсальные характеристики. Универсальные характеристики двигателей последовательного возбуждения типов МП, ДП и Д мощностью до 10 кВт приведены на **слайде 20.**
* Они представляют собой зависимость относительных значений скорости  и момента  от относительного тока обмотки якоря  , здесь  - номинальные значения скорости, момента и тока якоря.
* В каталожных данных двигателей последовательного возбуждения обычно приводятся следующие параметры:
  + - *P*н–номинальная мощность двигателя,кВт;
    - *n*н–номинальная частота вращения,обмин ;
    - *U*н–номинальное напряжение обмотки якоря,В;
    - *I*н–номинальный ток якоря,А;
    - ηн – номинальный КПД, о.е.

Порядок расчета естественных электромеханической и механической характеристик двигателя последовательного возбуждения следующий:

* определяется номинальная угловая скорость



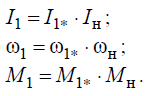
* определяется номинальный момент на валу двигателя



задаемся произвольным относительным значением тока *I*1 и

откладываем его на графике универсальной характеристики двигателя последовательного возбуждения;

* определяем соответствующие току *I*1 относительные значения угловой скорости ω1 и момента *M*1 ;
* пересчитываем относительные значения тока, скорости и момента на абсолютные значения



* строится правая декартовая система координат для электромеханических и механических характеристик в абсолютных единицах;
* абсолютные значения тока скорости и момента откладываются



* аналогичные вычисления производятся и для других значений тока *I*2 , *I* *j* ;
* по отложенным точкам строятся естественные электромеханические и механические характеристики двигателя последовательного возбуждения.

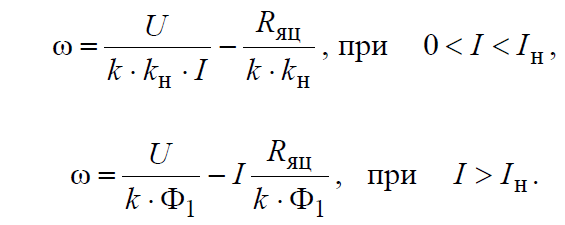
**Регулирование скорости двигателя постоянного тока**

**последовательного возбуждения с помощью резисторов**

**в цепи обмотки якоря**

**слайд 21**

Электромеханические характеристики двигателя последовательного возбуждения описываются уравнениями



Таким образом, искусственные электромеханические характеристики нелинейны при малых нагрузках ( 0<*I<I*н ) и не имеют скорости идеального холостого хода ω0 . При больших нагрузках ( *I>I*н ) искусственные характеристики аналогичны реостатным характеристикам двигателя независимого возбуждения. То есть, линейная их часть сходится на оси ординат в одной точке – фиктивной скорости идеального холостого хода 0ф, которая определяется пересечением продолжения линейной части естественной электромеханической характеристики с осью абсцисс.

**Слайд 22**

Направление регулирования скорости – *вниз* от естественной характеристики. Погрешность регулирования скорости возрастает с увеличением добавочного сопротивления в цепи обмотки якоря.

Регулирование скорости сопровождается потерями мощности в добавочных сопротивлениях цепи обмотки якоря.

**Регулирование скорости двигателя постоянного тока**

**последовательного возбуждения изменением напряжения**

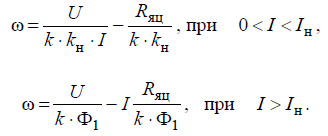
Регулирование скорости двигателя постоянного тока последовательного возбуждения изменением напряжения обмотки якоря производится при питании двигателя от отдельного преобразователя П

**Слайд 23**

Напряжение на выходе преобразователя регулируется напряжением управления *U*у .

Так как двигатель последовательного возбуждения включен непосредственно на выход преобразователя, то напряжение на двигателе равно напряжению преобразователя.

Электромеханические характеристики двигателя последовательного возбуждения описываются уравнениями.



Таким образом, искусственные электромеханические характеристики нелинейны при малых нагрузках ( 0<*I<I*н ) и не имеют скорости идеального холостого хода 0 . При больших нагрузках ( *I>I*н ) искуcтвенные характеристики аналогичны искусственным характеристикам двигателя независимого возбуждения при изменении напряжения об-мотки якоря. То есть, при уменьшении напряжения скорость двигателя снижается, а линейная их часть смещается параллельно линейной части естественной характеристики.

При скорости равной нулю по обмотке якоря двигателя протекает ток короткого замыкания



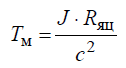
Ток короткого замыкания двигателя пропорционален напряжению обмотки якоря и уменьшается с уменьшением этого напряжения. **Слайд 24**

**Переходные процессы в электроприводах с двигателями постоянного тока**

Переходным режимом работы электропривода называется режим перехода от одного установившегося состояния к другому. Переходные процессы в электроприводе возникают, например, при пуске двигателя, реверсе, торможении, сбросе или набросе нагрузки, изменении параметров двигателя. В переходных процессах взаимозависимо изменяются скорость двигателя, его ток, момент и ЭДС.

От протекающих по обмоткам двигателя токов в них возникают потери и обмотки якоря, и возбуждения нагреваются. Процесс нагрева двигателя обычно весьма продолжителен, поэтому при исследовании переходных процессов тока и скорости тепловыми переходными процессами обычно пренебрегают, считая активные сопротивления двигателя постоянными.

На **сладе 24** показан график переходного процесса пуска  
двигателя постоянного тока независимого возбуждения.

Здесь электромеханическая постоянная времени определяется по формуле .

Под *T*м будем понимать время, в течение которого электропривод, обладающий моментом инерции *J* , разгоняется без нагрузки из неподвижного состояния до скорости идеального холостого хода ω0 при неизменном токе якоря, равном току короткого замыкания.

Эти уравнения могут использоваться для расчета и анализа переходных процессов пуска, реверса, торможения двигателя, а так же при изменении нагрузки на его валу. При расчете по ним необходимо в каждом конкретном случае определить начальные и установившиеся значения координат электропривода.

**Пример:**

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения построить статические электромеханические характеристики реостатного пуска в две ступени пусковых сопротивлений, записать уравнения для расчета переходных процессов скорости и тока для каждого из участков пуска, а также изобразить графики переходных процессов.

Основные параметры двигателя:

Номинальная мощность *P*дв.н =0,3 кВт;

Номинальное напряжение *U*дв.н =220 В;

Номинальный ток двигателя *I*дв.н=2,066А.

сопротивление двигателя при 150 С, *R*дв =14,6 Ом.

Номинальная частота вращения *n*дв.н=1500

Индуктивность двигателя *L*дв=0,248 Гн;

момент инерции якоря двигателя *J*дв = 0,0031кг м2 ;

допустимый ток двигателя *I*доп = 4*\** *I*дв.н

**Решение:**

В соответствие с условиями задачи схема силовых цепей двигателя должна иметь вид **Слайд 25**

В рассматриваемом электроприводе обмотка возбуждения *LM* двигателя включена независимо от его обмотки якоря *M* . В процессе пуска двигателя вначале запитывается обмотка возбуждения *LM* , затем, когда переходный процесс нарастания тока в обмотке возбуждения закончится и поток двигателя Ф станет равным номинальному, замыкается контактор *KM* . Обмотка якоря двигателя подключается к источнику постоянного напряжения *U* через пусковые сопротивления *R*д1 и *R*д2.По мере разгона двигателя пусковые сопротивления *R*д1и *R*д2последовательно выводятся из цепи обмотки якоря путем закорачивания их замыкающими контактами *KM*1 и *KM* 2. **Слайд 26**

Порядок построения характеристик следующий:

Вначале строится естественная характеристика 3 (в предыдущем примере)

Затем строится первая пусковая электромеханическая характеристика 1. Характеристика 1 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода при токе якоря равном нулю (ω0, *I*=0 ) и допустимого тока *I*доп при скорости равной нулю . Значение допустимого тока Iдоп обычно определяется из условия удовлетворительной коммутации



где λ*I* – перегрузочная способность двигателя по току;

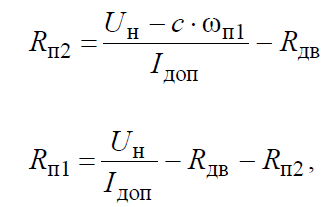
Определяется ток переключения *I*пер , который принимается

равным  в точке с координатами (*I*пер, п1) происходит закорачивание первого пускового сопротивления *R*д1 (замыкается контакт *KM*1) и

двигатель переходит на пусковую характеристику 2. Таким образом, характеристика 2 проходит через две точки: скорости идеального холостого хода 0 при токе якоря равном нулю *I*=0 и допустимого тока *I*доп при скорости равной ωп1.

Закорачивание второго пускового сопротивления *R*д2 также необходимо производить при токе переключения *I*пер. Бросок тока при переходе двигателя на естественную характеристику должен быть равен допустимому току *I*доп . Если это не происходит, то ток переключения *I*пернеобходимо поменять,соответственно несколько увеличив или уменьшив его, однако если ток переключения становиться меньше 1,1\**I*н, то необходимо увеличить число пусковых сопротивлений.

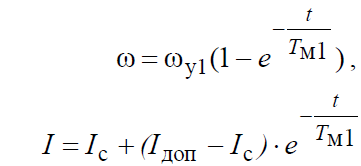
Пусковые сопротивления при пуске двигателя в две ступени определяются по формулам:



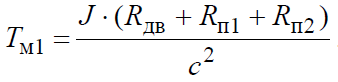
где ωп1 – берется из графика электромеханических характеристик.

Уравнения расчета переходных процессов для первой пусковой

характеристики:

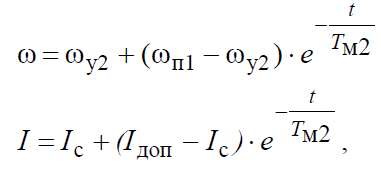


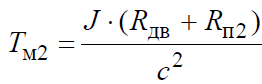
электромеханическая постоянная времени, определяется по формуле



Переходные процессы скорости и тока при пуске двигателя по первой пусковой характеристике стремятся попасть в точку установившейся работы с координатами ωу1 , *I*с , однако при достижении скорости ωп1 происходит закорачивание первого пускового сопротивления *R*п1и двигатель переходит на вторую пусковую характеристику– 2.

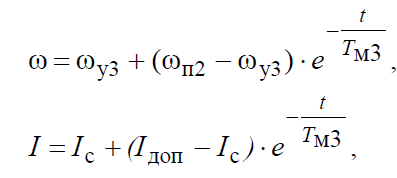
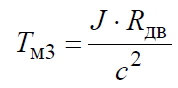
Уравнения для расчета переходных процессов пуска двигателя по второй пусковой характеристике:



электромеханической постоянной времени 

Переходные процессы скорости и тока при пуске двигателя по второй пусковой характеристике стремятся попасть в точку установившейся работы с координатами ωу2 , *I*с , однако при достижении скорости ωп2 происходит закорачивание второго пускового сопротивления *R*п2и двигатель переходит на естественную характеристику– 3.

Уравнения для расчета переходных процессов пуска двигателя по естественной характеристике:

**Слайд 27**

Анализ графиков показывает, что по мере разгона двигателя при переходе с одной ступени на другую электромеханическая постоянная времени *T*м электропривода уменьшается, а переходные процессы протекают быстрее.

**Электроприводы с полупроводниковыми преобразователями**

Мощные полупроводниковые приборы, используемые в силовых преобразовательных устройствах, работают только в ключевых режимах, для которых существуют два устойчивых состояния:

открытое состояние – максимальная электрическая проводимость;

закрытое состояние – минимальная электропроводность.

При работе в ключевом режиме потери активной мощности *P=U\*I* в полупроводниковых приборах малы,так как один из сомножителей этого произведения (ток *I* или напряжение *U*) имеет минимально возможное значение. Это обеспечивает высокий КПД.

* В процессе переключения из закрытого состояния полупроводникового прибора в открытое и наоборот напряжение и ток изменяются по линии нагрузки постоянного тока. Произведение тока и напряжения значительно возрастают. Поэтому важно, чтобы эти переключения протекали за минимально возможное время. Это условие удалось реализовать в настоящее время в двух типах полупроводниковых приборов с внутренней положительной обратной связью, ускоряющей процессы переключения полупроводников –*биполярных* *транзисторах* и *тиристорах.*
* **Система тиристорный преобразователь-двигатель**

**Слайд 28**

* Тиристорный преобразователь работает в выпрямительном режиме при угле управления 0 α 90 эл. град. В пределах угла перекрытия γ два тиристора схемы выпрямления будут открыты одновременно и подключены к одной нагрузке – якорю двигателя. Мгновенное значение выпрямленного напряжения при этом снижается на полуразность мгновенных значений фазных напряжений. Тиристоры открыты и при отрицательных фазных напряжениях вторичной обмотки трансформатора *TV*1. Это возможно только в том случае, когда в цепи выпрямленного тока большая индуктивность и ток в цепи обмотки якоря поддерживается за счет ЭДС самоиндукции. При малой индуктивности якорной цепи двигателя тиристоры при отрицательных напряжениях на вторичной обмотке трансформатора *TV*1 закрываются, а ток в якорной цепи прерывается. Для уменьшения зоны прерывистого тока в якорную цепь электродвигателя включают дополнительную индуктивность *L*.
* При активной нагрузке на валу двигателя тиристорный преобразователь может перейти в инверторный режим работы. Перевод преобразователя из выпрямительного режима работы в инверторный происходит при увеличении угла управления α свыше 90 эл. град. В инверторном режиме работы преобразователя с трехфазной нулевой схемой выпрямления электрическая машина постоянного тока становится генератором, а тиристоры открываются при отрицательных значениях напряжения вторичной обмотки трансформатора *TV*1. При работе тиристорного преобразователя, как в выпрямительном, так и в инверторном режимах ток через тиристоры протекает только в одном направлении.
* **Электроприводы постоянного тока с транзисторными преобразователями**

Наиболее эффективные способы регулирования скорости двигателя постоянного тока связаны с изменением напряжения его обмотки якоря. При питании обмотки якоря от источника постоянного напряжения транзисторные преобразователи, в связи с их полной управляемостью, получили наибольшее распространение. Современную элементную базу преобразователях постоянного напряжения в регулируемое постоянное составляют в настоящее время силовые транзисторы:

MOSFET (униполярный транзистор с индуцированным каналом);

IGBT (биполярный транзистор с изолированным затвором). Такие транзисторы выпускаются на токи до 1000 А, напряжения до 1500 В и способны работать в ключевом режиме на частотах до 30 кГц. Кроме того, для работы в цепях с индуктивностями транзисторы снабжены антипараллельными высокочастотными диодами. **Слайд 29.**

В этой схеме обмотка якоря двигателя *M* периодически подключается транзисторным ключом *VT*1 к источнику постоянного напряжения *U*п. Электролитический конденсатор *C* большой емкости сглаживает пульсации выпрямленного напряжения *U*п.

При открытом транзисторе *VT*1 ток по цепи обмотки якоря двигателя *M* протекает от источника постоянного напряжения *U*п. При закрытом транзисторе *VT*1 ток в цепи обмотки якоря двигателя мгновенно измениться не может, а поддерживается за счет ЭДС самоиндукции, замыкаясь через диод *VD*2.

В большинстве электроприводов для управления транзистором *VT*1 используется широтно-импульсный способ модуляции. В связи этим транзисторный ключ *VT*1 со схемой управления получил название широтно-импульсный преобразователь (ШИП). При широтно-импульсном управлении частота *T* следования импульсов напряжения на обмотку якоря двигателя остается постоянной, изменяется только длительность импульса *t*и . Среднее напряжение *U*ср , прикладываемое к обмотке якоря, зависит от длительности и определяется выражением.



где *U*п – постоянное напряжение; γ – относительная продолжительность включения транзисторного ключа *VT*1. **Слайд 30**

На **слайде 31** приведены электромеханические характеристики электропривода, выполненного по схеме широтно-импульсный преобразователь-двигатель.

При малых нагрузках в электроприводе ШИП-Д наступает режим прерывистого тока. Зона прерывистого тока обозначена на слайде пунктирной линией. В связи с тем, что частота переключений транзисторного ключа *VT*1 может значительно превышать частоту следования импульсов. В электроприводе с тиристорными преобразователями, зона прерывистого тока может быть существенно меньше.

Как следует из графиков, в режиме прерывистого тока все электромеханические характеристики сходятся в одной точке – скорости идеального холостого хода, которая в данном электроприводе определяется выражением: 

**ЭЛЕКТРОПРИВОД С ДВИГАТЕЛЯМИ ПЕРЕМЕННОГО**

**ТОКА**

**Асинхронный двигатель**

Для расчета характеристик асинхронного двигателя, как правило, пользуются его математической моделью, которая в общем случае представляется различными схемами замещения. Наиболее простой и удобной для инженерных расчетов асинхронного двигателя является Т-образная схема замещения.

**Слайд 32**

*U*1 *j* –фазное напряжение обмотки статора.

*R*1–активное сопротивление обмотки статора;

X1σ –индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора;

*I*1–ток обмотки статора;

*E*1–ЭДС обмотки статора;

*R’*2–активное сопротивление обмотки ротора,приведенное к обмоткестатора;

*X’*2σ–индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора,приведенное к обмотке статора;

– скольжение;

–синхронная угловая скорость;

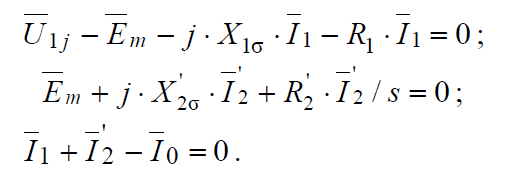
ω– угловая скорость асинхронного двигателя; *zP* –число пар полюсов;

*f*1–значение частоты напряжения переменного тока,подводимого к обмотке статора;

*Em* –ЭДС от главного магнитного потока машины;

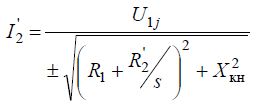
*E* '2–ЭДС обмотки ротора,приведенная к обмотке статора.

Основные уравнения асинхронного двигателя, соответствующие принятой схеме замещения:



На **слайде 33** представлен график векторной диаграммы токов, ЭДС и напряжений.

Ток ротора *I’*2 , приведенный к обмотке статора асинхронного двигателя, определяется зависимостью:



Где – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

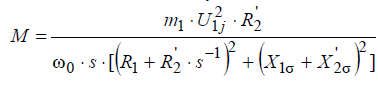
Уравнение *I'*2=*f*(*s*) называется электромеханической характеристикой асинхронного двигателя.

Для короткозамкнутого двигателя, существует другая механическая характеристика *I*1= *f* (*s*) отражающая зависимость тока статора *I*1 от скольжения *s*. Ток статора *I*1 определяется путем сложения вектора тока намагничивания  и вектора тока .

Основной выходной координатой силового привода является электромагнитный момент, значение которого для асинхронного двигателя может быть найдено из уравнения потерь

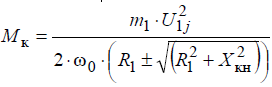


где *m*1 – число фаз статора.

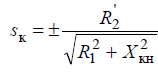


Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет критический момент и критическое скольжение, которые находятся при условии 

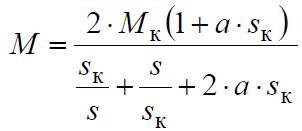
Тогда критический момент равен

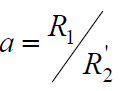


критическое скольжение



Уравнение механической характеристики можно преобразовать к более удобному для пользования выражению – формуле Клосса



Где 

На **слайде 34** показаны механические и электромеханические характеристики асинхронного двигателя.

Механические характеристики имеют в двигательном режиме три характерные точки:

1*. s=*0; *M=*0,при этом скорость двигателя равна синхронной ω0=2·π·*f*1  *zP* ;

2*. s=s*к; *M=M*кд,что соответствует точке с критическим скольжением *s*к и критическим моментом двигательного режима;

3*. s=*1,при этом скорость двигателя будет равна нулю,а моментравен пусковому *M=M*п .

Электромеханические характеристики, имеют две характерные точки в двигательном режиме:

1. *s=*0; *I’*2 *=*0,при этом скорость двигателя равна синхронной

ω0=2·π·*f*1 *zP* ;

1. s=1, при этом скорость двигателя будет равна нулю,а ток ротора –току короткого замыкания *I’*2 = *I’*2кз.

Регулировать скорость асинхронного двигателя можно, изменяя один или несколько параметров:

*U*1*j* –фазное напряжение обмоток статора двигателя;

R'1доб–добавочное активное сопротивление статора;

X'1доб – добавочное индуктивное сопротивление статора;

R'2доб–добавочное активное сопротивление ротора,приведенноек обмотке статора;

X'2доб – добавочное индуктивное сопротивление ротора, приве-

денное к обмотке статора;

ω0=2·π·*f*1*zP* –синхронную угловую скорость изменениемчисло пар полюсов *zP* или частоты *f*1 напряжения переменного тока, подводимого к обмотке статора;

Из всего многообразия способов регулирования характеристик асинхронного двигателя следующие способы регулирования нашли практическое применение:

* регулирование скорости изменением добавочного активного сопротивления в цепи обмотки ротора асинхронного двигателя с фазным ротором;
* регулирование скорости изменением фазного напряжения короткозамкнутого асинхронного двигателя;
* частотное регулирование скорости короткозамкнутого асинхронного двигателя.

Статические механические и электромеханические характеристики асинхронных двигателей благоприятны для пусков двигателей прямым включением в сеть. Поскольку пуск двигателя происходит достаточно быстро, то кратковременная перегрузка по току даже в 6 – 8 раз не опасна для него: ни с точки зрения больших ударных динамических моментов, ни с точки зрения больших пусковых токов, которые много меньше пусковых токов естественной характеристики двигателей постоянного тока независимого возбуждения той же мощности. Ограничения на прямой пуск асинхронных двигателей накладываются не самим двигателем, а питающей сетью.

Если сеть имеет ограниченную мощность или большое внутреннее сопротивление, то пусковые токи двигателя будут вызывать в этой сети большие падения напряжения, что это скажется на режимах работы других потребителей энергии.

**Динамическая механическая характеристика асинхронного двигателя**

*Динамической механической характеристикой* асинхронного двигателя называется зависимость между мгновенными значениями скорости и момента электрической машины для одного и того же момента времени переходного режима работы.

График динамической механической характеристики асинхронного двигателя можно получить из совместного решения системы дифференциальных уравнений электрического равновесия в статорной и роторной цепях двигателя и одного из уравнения его электромагнитного момента, которые приведены на слайде:

**Слайд 35**

Электромеханические процессы в асинхронном электроприводе описываются уравнением движения.



где *M* c – приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки;

* – приведенный к валу двигателя суммарный момент инерции электропривода.

Так как динамическую механическую характеристику асинхронного двигателя можно получить только по результатам расчетов переходных процессов, то вначале строятся графики переходных процессов к примеру, в Matlab **Слайд 36**

Механические характеристики **Слайд 37.**

Анализ динамической механической характеристики асинхронного двигателя показывает, что максимальные ударные моменты при пуске превышают номинальный момент *M* н статической механической характеристики более чем в 4,5 раза и могут достичь недопустимо больших по механической прочности значений. Ударные моменты при пуске и, особенно при реверсе асинхронного двигателя, приводят к выходу из строя кинематики производственных механизмов и самого асинхронного двигателя.

Установлено, что динамическая характеристика определяется не только параметрами схемы замещения асинхронного двигателя, но и параметрами электропривода, такими как эквивалентный момент инерции *J*, момент сопротивления *M* *c* на валу двигателя. Следовательно, асинхронный двигатель при данных параметрах питающей сети и схемы замещения обладает одной статической и множеством динамических механических характеристик.