

Электромеханические системы:

краткий академический конспект

Повный А. В.

<https://electricalschool.info/>

<https://t.me/electricalschool>

Электромеханическая система (ЭМС) — это совокупность электрических, электромагнитных, механических и информационно-управляющих элементов, предназначенная для преобразования электрической энергии в механическую (или обратно) и управления движением рабочего органа машины. В инженерной практике базовой разновидностью ЭМС является автоматизированный электропривод, который по ГОСТ Р 50369-92 включает преобразователи электроэнергии, электромеханические и механические преобразователи, а также управляющие и информационные устройства.

Введение. Общие сведения об ЭМС

Электромеханические системы лежат в основе большинства технологических машин: металлорежущих станков, конвейеров, подъемно-транспортных механизмов, насосов, вентиляторов, прокатных станов, роботов, лифтов и транспортных средств. Их задача — не просто создать вращающий момент, а обеспечить требуемую скорость, положение, ускорение, момент и траекторию движения исполнительного органа.

Любая ЭМС объединяет три взаимосвязанные подсистемы:

- **Электрическую** — источник питания, преобразователь частоты или выпрямитель, коммутационную аппаратуру, цепи защиты.

- **Электромеханическую** — электрическую машину, в которой электромагнитный момент возникает в результате взаимодействия магнитных полей и токов.

- **Механическую** — вал, муфту, редуктор, передачу, рабочий орган и присоединенные массы.

Электропривод определяется как управляемая электромеханическая система для преобразования электрической энергии в механическую и обратно, а также управления этим процессом.

Современный электропривод: особенности и структура

Современный электропривод отличается не только наличием двигателя, но и развитой цифровой системой управления. Он должен обеспечивать регулируемую скорость, ограничение момента и тока, плавный пуск и торможение, защиту от аварийных режимов, диагностику и обмен данными с АСУ ТП.

Типовая структура ЭП:

Элемент	Назначение
Силовой преобразователь	Изменяет напряжение, частоту, ток или форму питающего напряжения
Электродвигатель	Преобразует электрическую энергию в механическую
Механическая передача	Согласует частоту вращения, момент и вид движения
Рабочий механизм	Выполняет технологическую операцию
Датчики	Измеряют ток, скорость, положение, момент, температуру
Регулятор и контроллер	Формирует управляющие воздействия

Устройства защиты и связи	Обеспечивают безопасность, диагностику и интеграцию в систему управления
---------------------------	--

В функциональной схеме электропривода выделяют регулятор, электрический преобразователь, электромеханический преобразователь, механический преобразователь, исполнительный орган и каналы управляющего воздействия.

Элементы автоматизированных ЭМС

К основным элементам автоматизированной ЭМС относятся:

- **Силовой преобразователь:** тиристорный преобразователь, частотный преобразователь, ШИМ-инвертор, сервопривод.
- **Двигатель:** ДПТ, асинхронный двигатель, синхронный двигатель, шаговый двигатель, серводвигатель.
- **Механизм:** редуктор, ременная или цепная передача, винтовая передача, барабан, кривошипно-шатунный механизм.
- **Информационная часть:** энкодеры, резольверы, тахогенераторы, датчики тока и напряжения, концевые выключатели.
- **Устройства управления:** ПЛК, микроконтроллер, промышленный контроллер движения, частотный преобразователь с встроенным ПИД-регулятором.

Передаточное устройство служит для изменения скорости или преобразования вида движения — например, из вращательного в поступательное. К нему относят редукторы, зубчато-реечные, ременные и кривошипно-шатунные механизмы.

Направления развития ЭМС

Основные направления развития:

- переход от нерегулируемого привода к частотно-регулируемому и сервоприводу;
- применение векторного и прямого управления моментом асинхронных и синхронных машин;
- использование постоянных магнитов и синхронных реактивных двигателей;
- интеграция привода с ПЛК, промышленными сетями и облачными сервисами;
- внедрение предиктивной диагностики на основе токов, вибрации и температуры;
- повышение энергоэффективности за счет рекуперативного торможения;
- применение цифровых двойников и модельно-ориентированного проектирования.

В частности, развитие силовой полупроводниковой техники стало основой современных частотно-регулируемых асинхронных приводов, в том числе в транспортных и промышленных приложениях.

Контрольные задания

1. Дайте определение электромеханической системы и электропривода.
2. Изобразите функциональную схему автоматизированного электропривода и поясните назначение каждого блока.
3. Перечислите основные элементы механической части ЭМС.
4. Какие функции выполняет силовой преобразователь?
5. Назовите не менее пяти направлений развития современных электроприводов.

Механическая часть ЭМС

Механическая часть электромеханической системы передает движение и момент от вала двигателя к исполнительному органу. Она определяет инерционность, жесткость, зазоры, потери и характер нагрузки привода.

Элементы механической части

Основные элементы:

- вал двигателя;
- соединительная муфта;
- редуктор или мультипликатор;
- зубчатая, ременная, цепная, червячная или винтовая передача;
- барабан, звездочка, шкив;
- исполнительный орган: каретка, поворотный стол, роботизированное звено, крыльчатка, барабан лебедки.

Механическая передача обеспечивает согласование скорости и момента двигателя с требованиями рабочего механизма.

Описание механического движения

Для вращательного движения основное уравнение динамики имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

где J — приведенный момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; ω — угловая скорость, рад/с ; M — момент двигателя; M_c — статический момент сопротивления.

При $M > M_c$ происходит разгон, при $M < M_c$ — замедление, при $M = M_c$ — установившееся движение.

Для поступательного движения:

$$m \frac{dv}{dt} = F - F_c$$

где m — масса, кг; v — линейная скорость, м/с; F — сила привода; F_c — сила сопротивления.

Расчетные соотношения

Приведение момента инерции к валу двигателя выполняется по формуле:

$$J_{\text{пр}} = J_{\text{д}} + J_{\text{мех}} \left(\frac{\omega_{\text{мех}}}{\omega_{\text{д}}} \right)^2$$

Приведение статического момента:

$$M_{c,\text{пр}} = M_{c,\text{мех}} \frac{\omega_{\text{мех}}}{\omega_{\text{д}} \eta}$$

где η — КПД передачи.

Связь линейной и угловой скорости:

$$v = \omega r$$

Мощность на валу:

$$P = M \omega$$

Учет жесткости и подвижных элементов

В реальных механизмах вал, муфта, редуктор и длинные кинематические цепи обладают упругостью. Такая система описывается как двухмассовая или многомассовая:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_d - M_{\text{упр}}$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_{\text{упр}} - M_c$$

$$M_{\text{упр}} = c(\varphi_1 - \varphi_2)$$

где c — жесткость связи, Н·м/рад.

Упругость вызывает механические колебания, резонансы, перерегулирование скорости и дополнительные динамические нагрузки. В точных приводах, роботах и станках с ЧПУ это особенно важно.

Типичные статические нагрузки

Тип нагрузки	Зависимость момента от скорости	Примеры
Активная	$M_c \approx const$, направление может сохраняться	Подъем груза, лебедка
Реактивная	$M_c \approx const$, зависит от направления вращения	Трение, конвейер
Вентиляторная	$M_c \sim \omega^2$	Вентилятор, насос
Линейно возрастающая	$M_c \sim \omega$	Вязкое трение, некоторые смесители
Сложная	Нелинейная зависимость	Прокатный стан, пресс

Режимы работы ЭМС

Основные режимы:

- **Пуск** — разгон от нулевой или начальной скорости до заданной.
- **Установившийся режим** — равенство момента двигателя и момента сопротивления.
- **Регулирование скорости** — изменение скорости по технологическому требованию.
- **Реверс** — изменение направления вращения.
- **Торможение** — снижение скорости или остановка.
- **Динамический режим** — переходный процесс при изменении задания, нагрузки или параметров сети.

Контрольные задания

1. Запишите основное уравнение движения электропривода и объясните все величины.
2. Как выполняется приведение момента инерции и статического момента к валу двигателя?
3. Почему в многомассовых механизмах необходимо учитывать жесткость?
4. Приведите примеры активной, реактивной и вентиляторной нагрузки.
5. Чем отличается активная нагрузка от реактивной при реверсе привода?

Характеристики механизмов и двигателей

Механические характеристики механизмов

Механической характеристикой механизма называется зависимость статического момента сопротивления от скорости:

$$M_c = f(\omega)$$

Для вентиляторной нагрузки:

$$M_c = M_0 + k\omega^2$$

Для подъемного механизма:

$$M_c \approx const$$

Характер нагрузки определяет требуемую форму механической характеристики двигателя и закон регулирования скорости.

Механические характеристики двигателей

Механическая характеристика двигателя — зависимость электромагнитного момента от частоты вращения:

$$M = f(\omega)$$

Различают:

- **естественную характеристику** — при номинальных параметрах питания и стандартной схеме включения;
- **искусственные характеристики** — при изменении напряжения, частоты, сопротивления ротора или якорной цепи.

Жесткость характеристики оценивается как:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}$$

Чем больше $|\beta|$, тем меньше изменяется скорость при колебаниях нагрузки.

Контрольные задания

1. Что называется механической характеристикой двигателя и механизма?
2. Чем естественная характеристика отличается от искусственной?
3. Что показывает жесткость механической характеристики?
4. Постройте качественные характеристики для вентилятора, конвейера и подъемного механизма.

ДПТ независимого возбуждения

Характеристики в двигательном режиме

Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) справедливы уравнения:

$$U = E + IR_{\text{я}}$$

$$E = c_e \Phi \omega$$

$$M = c_M \Phi I_{\text{я}}$$

Отсюда механическая характеристика:

$$\omega = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi^2} M$$

Характеристика ДПТ НВ линейна и жесткая. Скорость регулируется изменением напряжения якоря, магнитного потока или сопротивления якорной цепи.

Режимы работы электродвигателей

Для ДПТ возможны режимы:

- двигательный;
- генераторный (рекуперативное торможение);
- противовключение;
- динамическое торможение;
- холостой ход;
- короткое замыкание по моменту при заторможенном роторе.

Рекуперативное торможение

Рекуперативное торможение возникает, когда скорость двигателя превышает скорость идеального холостого хода:

$$\omega > \omega_0$$

Тогда ЭДС становится больше приложенного напряжения, ток меняет направление, машина переходит в генераторный режим и отдает энергию в сеть.

Торможение противовключением

Противовключение создается изменением полярности напряжения на якоре либо реверсом поля. Двигатель развивает момент, направленный против вращения, а кинетическая энергия и энергия сети рассеиваются главным образом в якорной цепи и тормозном резисторе.

Динамическое торможение

При динамическом торможении якорь отключают от источника и замыкают на резистор, а обмотку возбуждения оставляют под напряжением. Машина работает как генератор с независимым возбуждением, а кинетическая энергия рассеивается в резисторе.

Использование электрического торможения

Электрическое торможение применяют для:

- быстрой и точной остановки;
- ограничения скорости при спуске груза;
- рекуперации энергии в транспортных средствах и подъемниках;
- снижения износа механических тормозов;
- обеспечения безопасного реверса.

Контрольные задания

1. Выведите уравнение механической характеристики ДПТ НВ.
2. Какие способы регулирования скорости применимы к ДПТ НВ?
3. При каком условии возможен режим рекуперативного торможения?
4. Сравните рекуперативное, динамическое торможение и противовключение по энергетике.
5. Почему при противовключении требуется ограничение тока?

ДПТ последовательного возбуждения

Двигательный режим

У ДПТ последовательного возбуждения (ДПТ ПВ) обмотка возбуждения включена последовательно с якорем, поэтому магнитный поток зависит от тока якоря:

$$\Phi = f(I_{\text{я}})$$

При малых токах:

$$M \sim I_{\text{я}}^2$$

Это обеспечивает высокий пусковой момент, поэтому ДПТ ПВ применяют в тяговых приводах, подъемниках и механизмах с тяжелым пуском.

Механическая характеристика ДПТ ПВ мягкая: при увеличении нагрузки скорость существенно снижается. Недопустим холостой ход, так как при малом токе поток резко уменьшается и двигатель может идти «вразнос».

Торможение противовключением

Торможение противовключением возможно при изменении полярности напряжения якоря либо при активном статическом моменте, когда механизм заставляет двигатель вращаться против направления создаваемого момента. Ток необходимо ограничивать резистором.

Динамическое торможение

При динамическом торможении якорь отключают от сети и замыкают на резистор. Обмотку возбуждения включают либо последовательно с якорем, либо переводят на независимое питание. Энергия вращающихся масс рассеивается в сопротивлениях.

Контрольные задания

1. Почему у ДПТ ПВ высокий пусковой момент?
2. Почему недопустим холостой ход ДПТ ПВ?
3. Сравните жесткость характеристик ДПТ НВ и ДПТ ПВ.
4. Какие схемы динамического торможения применяют для ДПТ ПВ?

ДПТ смешанного возбуждения

Двигательный режим

ДПТ смешанного возбуждения (ДПТ СВ) имеет две обмотки возбуждения: последовательную и параллельную. Поэтому его характеристика занимает промежуточное положение между характеристиками ДПТ НВ и ДПТ ПВ.

Достоинства:

- наличие устойчивого холостого хода;
- более высокий пусковой момент, чем у ДПТ НВ;
- меньшая склонность к «разносу», чем у ДПТ ПВ;
- возможность работы при переменной нагрузке.

Тормозные режимы

Рекуперативное торможение

Рекуперативное торможение возможно, если скорость превышает скорость идеального холостого хода. Однако из-за последовательной обмотки характеристика и условия рекуперации сложнее, чем у ДПТ НВ.

Противовключение

При изменении полярности якорного напряжения двигатель переходит в режим противовключения. Ток резко возрастает, поэтому последовательно включают добавочное сопротивление.

Динамическое торможение

Якорь отключается от сети и замыкается на резистор. Последовательную обмотку могут отключать либо сохранять в цепи в зависимости от требуемой формы тормозной характеристики.

Контрольные задания

1. Чем ДПТ СВ отличается от ДПТ НВ и ДПТ ПВ?
2. Почему ДПТ СВ не идет «вразнос» на холостом ходу?
3. Какие тормозные режимы возможны для ДПТ СВ?
4. Как влияет последовательная обмотка на форму тормозной характеристики?

Асинхронные двигатели

Характеристики АД

Асинхронный двигатель (АД) — наиболее распространенная электрическая машина в промышленности. Скольжение определяется как:

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$$

где ω_0 — синхронная скорость поля, ω — скорость ротора.

При номинальном режиме скольжение обычно составляет примерно 0,02–0,06.

Схема замещения

Т-образная схема замещения АД включает:

- активное и индуктивное сопротивления статора;
- намагничивающую ветвь;
- приведенные активное и индуктивное сопротивления ротора.

Скольжение в схеме замещения учитывается приведенным сопротивлением ротора:

$$R'_2 = \frac{R'_2}{s}$$

Аналитическое выражение характеристики

Механическая характеристика АД приближенно описывается формулой Клосса:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

где M_{max} — критический (максимальный) момент, s_k — критическое скольжение.

Механическая характеристика АД

Характерные точки:

- $s = 0$: идеальный холостой ход, $M = 0$;
- $s = s_n$: номинальный режим;
- $s = s_k$: максимальный момент;
- $s = 1$: пуск, $n = 0$.

Формула Клосса связывает момент со скольжением и позволяет построить зависимость $M = f(s)$ или $M = f(\omega)$.

Анализ по формуле Клосса

На рабочем участке $0 < s < s_k$ характеристика достаточно жесткая. При увеличении скольжения до s_k момент растет до максимума, а затем уменьшается. Критический момент обычно превышает номинальный примерно в 2–2,5 раза, а пусковой момент составляет ориентировочно 1,2–2,0 номинального.

Включение активного сопротивления в цепь ротора у двигателя с фазным ротором увеличивает критическое скольжение и делает рабочую часть характеристики более мягкой.

Обобщение свойств характеристик АД

Свойства АД:

- простота и надежность конструкции;
- отсутствие щеточного контакта у машин с короткозамкнутым ротором;
- зависимость скорости от частоты питающего напряжения;
- возможность плавного регулирования с помощью преобразователя частоты;
- нелинейная механическая характеристика;
- чувствительность к снижению напряжения сети, поскольку момент пропорционален квадрату напряжения.

Тормозные режимы АД

Рекуперативное торможение

Возникает при скорости ротора выше синхронной:

$$\omega > \omega_0, s < 0$$

Двигатель переходит в генераторный режим и отдает энергию в сеть за вычетом потерь.

Противовключение

Создается изменением порядка чередования фаз: поле начинает вращаться в противоположную сторону, а ротор под действием инерции продолжает прежнее движение. Режим сопровождается большими токами и нагревом, поэтому требуется ограничение тока.

Динамическое торможение

В обмотку статора подают постоянный ток. Он создает неподвижное магнитное поле, в котором вращающийся ротор наводит ЭДС и ток; возникает тормозной момент. Энергия рассеивается в цепях ротора и тормозных резисторах.

Контрольные задания

1. Запишите формулу скольжения и объясните ее физический смысл.
2. Постройте механическую характеристику АД по формуле Клосса.
3. Что происходит при $s < 0$, $s = 1$, $s > s_k$?
4. Почему момент АД зависит от квадрата напряжения?
5. Сравните три электрических способа торможения АД.

Синхронные двигатели

Механические и угловые характеристики

Синхронный двигатель (СД) вращается со скоростью, равной скорости магнитного поля:

$$\omega = \omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$$

где f — частота сети, p — число пар полюсов.

В синхронном режиме скорость не зависит от нагрузки в пределах устойчивой работы. Поэтому механическая характеристика СД в синхронном режиме представляет собой вертикальную линию при $\omega = \omega_0$.

Угловая характеристика

Угловая характеристика выражает зависимость момента от угла нагрузки θ :

$$M = \frac{3UE_0}{\omega_0 X_d} \sin \theta$$

Для явнополюсной машины добавляется реактивная составляющая:

$$M = \frac{3UE_0}{\omega_0 X_d} \sin \theta + \frac{3U^2}{2\omega_0} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\theta$$

Устойчивая работа соответствует возрастающей части характеристики до максимального момента.

Тормозные режимы СД

Возможны:

- рекуперативное торможение при переводе машины в генераторный режим;

- динамическое торможение при отключении статора от сети и замыкании обмоток на резисторы;
- торможение противовключением, применяемое ограниченно из-за больших токов и сложности синхронизации.

Контрольные задания

1. Почему скорость синхронного двигателя не зависит от нагрузки в пределах устойчивой работы?
2. Что такое угол нагрузки и угловая характеристика?
3. При каких условиях наступает выпадение из синхронизма?
4. Какие способы торможения применимы к СД?

Многодвигательный привод

Многодвигательный электропривод содержит два и более двигателей, механически связанных с общим рабочим органом или работающих на общий технологический процесс. Такие системы применяют в прокатных станах, мостовых кранах, конвейерах, бумагоделательных машинах, шахтных подъемниках и тяжелых металлорежущих комплексах.

Основные задачи многодвигательного привода:

- равномерное распределение нагрузки между двигателями;
- согласование скоростей;
- компенсация упругости, зазоров и люфтов;
- обеспечение синхронного движения;

- защита от перегрузки отдельного двигателя.

В сложных многодвигательных системах необходимо учитывать упругость валов, зазоры в передачах, диссипативные силы и взаимное влияние электромеханических подсистем.

Различают:

- **параллельную работу** — двигатели приводят общий механизм;
- **последовательную работу** — каждый двигатель обслуживает свою часть кинематической цепи;
- **электрически связанный привод** — согласование обеспечивается системой управления;
- **механически связанный привод** — согласование обеспечивается общим валом или передачей.

Контрольные задания

1. Какие причины вызывают необходимость многодвигательного привода?
2. Чем отличается механически связанный привод от электрически связанного?
3. Какие проблемы возникают при неравномерном распределении нагрузки?
4. Почему в многодвигательных системах важно учитывать упругость и люфты?
5. Приведите пример промышленной машины с многодвигательным приводом.

Практический пример расчета механической части

Пусть электропривод подъемной лебедки имеет двигатель с частотой вращения $n_d = 1450$ об/мин, редуктор с передаточным числом $i = 20$ и КПД $\eta = 0,9$. Барабан поднимает груз массой $m = 500$ кг при радиусе барабана $r = 0,2$ м.

Сила тяжести груза:

$$F_g = mg = 500 \cdot 9,81 = 4905$$

Статический момент на барабане:

$$M_6 = F_g r = 4905 \cdot 0,2 = 981$$

Приведенный к валу двигателя статический момент:

$$M_{c,пр} = \frac{M_6}{i\eta} = \frac{981}{20 \cdot 0,9} = 54,5$$

Таким образом, двигатель должен развивать момент не менее $54,5$ Н·м только для подъема груза; дополнительно учитываются момент инерции, трение и динамический момент при разгоне.

Расчет времени разгона

Если двигатель развивает постоянный избыточный момент:

$$M_{дин} = M - M_c$$

то время разгона от ω_1 до ω_2 :

$$t = \frac{J_{пр}(\omega_2 - \omega_1)}{M_{дин}}$$

Например, при $J_{пр} = 0,5$ кг·м², разгоне от 0 до 150 рад/с и $M_{дин} = 30$ Н·м:

$$t = \frac{0,5 \cdot 150}{30} = 2,5$$

Этот расчет показывает, почему в приводах с большой инерционностью важно ограничивать ускорение: иначе возникают недопустимые динамические нагрузки, проскальзывание ремней, удары в зубчатых передачах и перегрев двигателя.

Уточнение понятия жесткости

Жесткость механической характеристики определяет, насколько сильно изменяется скорость при изменении момента:

$$\beta = \frac{dM}{d\omega}$$

Для ДПТ НВ характеристика линейна: при увеличении момента сопротивления скорость снижается из-за уменьшения ЭДС и увеличения падения напряжения в якорной цепи.

Сравнение двигателей по характеристикам

Двигатель	Форма характеристики	Регулирование скорости	Пусковой момент	Типичные применения
ДПТ НВ	Линейная, жесткая	Напряжение якоря, поток, сопротивление	Хороший	Станки, прокатные линии, точные приводы
ДПТ ПВ	Мягкая, нелинейная	Напряжение, сопротивление	Очень высокий	Тяговый транспорт, лебедки
ДПТ СВ	Промежуточная	Напряжение, поток	Высокий	Компрессоры, подъемные механизмы
АД с КЗ ротором	Нелинейная	Частота, напряжение	Ограниченный	Насосы, вентиляторы, конвейеры

АД с фаз- ным рото- ром	Регулируе- мая резисто- ром	Сопротивление ротора, частота	Повышен- ный	Краны, мельницы
СД	Абсолютно жесткая	Частота питания	Зависит от системы пуска	Компрессоры, мощные насосы

ДПТ НВ: способы регулирования скорости

Якорное регулирование

При изменении напряжения якоря U при постоянном потоке Φ семейство характеристик остается параллельным:

$$\omega = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e c_M \Phi^2} M$$

Достоинства:

- широкий диапазон регулирования;
- высокая жесткость характеристик;
- плавность;
- экономичность при использовании преобразователя.

Недостаток — необходимость управляемого источника питания.

Полюсное регулирование

При ослаблении магнитного потока скорость идеального холостого хода увеличивается:

$$\omega_0 = \frac{U}{c_e \Phi}$$

Способ экономичен, но при сильном ослаблении поля ухудшается коммутация и снижается перегрузочная способность.

Реостатное регулирование

В якорную цепь вводят добавочное сопротивление. Характеристики становятся более мягкими, а в резисторе теряется энергия. Этот способ прост, но неэкономичен и применяется преимущественно в простых установках.

ДПТ НВ: энергетика торможения

Режим	Источник тормозного момента	Куда уходит энергия	Применение
Рекуперативное	Генераторный момент машины	В сеть	Спуск груза, транспорт, лифты
Динамическое	Генераторный момент на резисторе	В тормозной резистор	Остановка, снижение скорости
Противовключение	Момент при обратном включении	В сеть и резистор	Быстрый реверс

При рекуперативном торможении двигатель работает генератором и отдает энергию в сеть; при динамическом торможении якорная цепь замыкается на резистор, а при противовключении момент направлен против вращения.

АД: подробный анализ формулы Клосса

Формула Клосса:

$$M = \frac{2M_{max}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

Она позволяет определить:

- пусковой момент при $s = 1$;
- максимальный момент при $s = s_k$;
- рабочий момент при номинальном скольжении;
- генераторный участок при $s < 0$.

Характерные точки механической характеристики АД: $s = 0$ — идеальный холостой ход, $s = s_n$ — номинальный режим, $s = s_k$ — критический момент, $s = 1$ — пуск, $s = -s_k$ — максимальный момент генераторного режима.

Влияние напряжения сети

Электромагнитный момент АД пропорционален квадрату напряжения:

$$M \sim U^2$$

Поэтому снижение напряжения сети на 10% уменьшает максимальный момент примерно на 19%. Это опасно при пуске под нагрузкой: двигатель может не развить необходимый момент и остановиться.

Влияние частоты

При частотном управлении обычно поддерживают приблизительно постоянное отношение:

$$\frac{U}{f} \approx const$$

Такой закон сохраняет магнитный поток и обеспечивает устойчивый момент в области рабочих частот. При скоростях выше номинальной переходят к ослаблению поля, аналогично ДПТ.

АД: тормозные режимы

Рекуперативное торможение

Возникает при $\omega > \omega_0$, то есть при отрицательном скольжении $s < 0$. Двигатель отдает энергию в сеть. Режим характерен для спуска груза, рекуперации в транспорте и работы привода при снижении частоты преобразователем.

Торможение противовключением

Достигается изменением порядка чередования фаз. Поле статора меняет направление, а ротор по инерции продолжает прежнее вращение. Скольжение становится больше единицы:

$$s > 1$$

Режим сопровождается большими токами и нагревом, поэтому применяется кратковременно и с ограничением тока.

Динамическое торможение

В статор подают постоянный ток. неподвижное поле взаимодействует с вращающимся ротором, в его обмотках наводится ЭДС и возникает тормозной момент. Кинетическая энергия рассеивается в роторной цепи или внешних резисторах.

Синхронный двигатель: устойчивость

Угловая характеристика неявнополюсного СД:

$$M = M_{max} \sin \theta$$

где θ — угол нагрузки между векторами напряжения и ЭДС. Момент растёт при увеличении θ от 0 до 90° , достигает максимума при $\theta = 90^\circ$, а затем уменьшается.

При превышении максимального момента двигатель выпадает из синхронизма: ротор перестаёт вращаться синхронно с полем статора, возможны остановка или аварийный асинхронный режим.

Для повышения устойчивости применяют:

- увеличение перегрузочной способности машины;
- автоматическое регулирование тока возбуждения;
- ограничение резких набросов нагрузки;
- применение демпферной обмотки;
- частотное управление от преобразователя.

Максимальный момент синхронных двигателей обычно принимают в 2–2,5 раза выше номинального для устойчивой работы при случайных толчках нагрузки.

Многодвигательный привод: уравнение движения

Для двух механически связанных двигателей с общей нагрузкой можно записать:

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 - M_{12}$$

$$J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = M_2 - M_{23}$$

$$J_H \frac{d\omega_H}{dt} = M_{12} + M_{23} - M_c$$

где M_{12}, M_{23} — упругие моменты в соединительных валах.

Если скорости двигателей неодинаковы, в упругих элементах возникают дополнительные моменты. Это приводит к колебаниям, неравномерному распределению нагрузки и повышенному износу передач.

Типовые задачи по теме

Задача 1

Двигатель развивает момент $M = 80$ Н·м, статический момент $M_c = 60$ Н·м, приведенный момент инерции $J = 0,4$ кг·м². Определить ускорение.

$$\varepsilon = \frac{M - M_c}{J} = \frac{80 - 60}{0,4} = 50$$

Задача 2

Механизм имеет момент инерции $J_{\text{мех}} = 8$ кг·м² при скорости 75 рад/с. Двигатель вращается со скоростью 150 рад/с. Определить приведенный момент инерции без учета КПД.

$$J_{\text{мех,пр}} = 8 \left(\frac{75}{150} \right)^2 = 2$$

Задача 3

АД имеет $M_{\text{max}} = 200$ Н·м и $s_k = 0,2$. Определить момент при $s = 0,1$.

$$M = \frac{2 \cdot 200}{\frac{0,1}{0,2} + \frac{0,2}{0,1}} = \frac{400}{0,5 + 2} = 160$$

Задача 4

Синхронный двигатель имеет $M_{max} = 500 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Определить момент при $\theta = 30^\circ$.

$$M = 500 \sin 30^\circ = 250$$

Итоговые контрольные задания

1. Выведите выражение для приведенного момента инерции многомассовой механической системы.
2. Объясните, почему при рекуперативном торможении ДПТ НВ необходимо $\omega > \omega_0$.
3. Сравните энергетику динамического торможения и противовключения.
4. Постройте семейство механических характеристик ДПТ НВ при изменении напряжения якоря.
5. Объясните, почему у ДПТ ПВ недопустим холостой ход.
6. Постройте механическую характеристику АД по формуле Клосса и обозначьте характерные точки.
7. Как влияет снижение напряжения сети на пусковой и максимальный моменты АД?
8. Почему механическая характеристика синхронного двигателя считается абсолютно жесткой?
9. Что происходит с синхронным двигателем при превышении максимального момента?

<https://electricalschool.info/>

<https://t.me/electricalschool>