

Тема 15. ЭЛЕКТРОПРИВОД ОСНОВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1. Общее понятие об электроприводе. (История развития электропривода)
2. Режимы работы электродвигателей
3. Механические характеристики производственных механизмов.
4. Механические характеристики электродвигателя
5. Нагревание и охлаждение электродвигателей

§ 13.1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Электроприводом называется электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов.

Электропривод состоит из преобразующего, электродвигательного, передаточного и управляющего устройств (рис. 13.1). Преобразующее устройство *ПрУ* преобразует напряжение, ток или частоту напряжения.

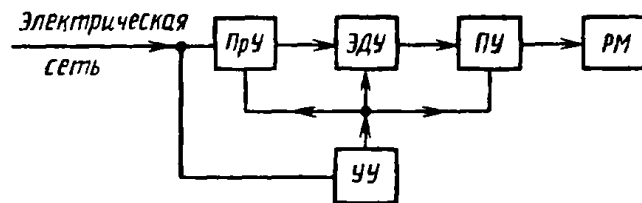


Рис. 13.1. Структурная схема электропривода

Оно может быть выполнено в виде магнитного усилителя, магнитного усилителя с выпрямлением, управляемого выпрямителя на тиристорах и т. д.

В электродвигательном устройстве *ЭДУ* происходит преобразование электрической энергии в механическую. Передаточное устройство *ПУ* служит для изменения скорости до значения, необходимого рабочему механизму *РМ*. Оно может быть выполнено в виде редуктора, т. е. быть неуправляемым. Управляемое *ПУ* представляет собой коробку передач с электромагнитными муфтами, изменяющими ее передаточное число.

Управляющее устройство *УУ* регулирует работу всех блоков электропривода, изменяя мощность на валу рабочего механизма, значение и частоту напряжения, схему включения электродвигателя, передаточное число коробки передач, направление вращения электродвигателя и т. д.

На практике электропривод бывает автоматизированный и неавтоматизированный. В автоматизированном электроприводе человек создает только начальное управляющее воздействие (пуск электропривода).

398

В неавтоматизированном человек периодически управляет работой электропривода в зависимости от отклонений от заданного режима.

Электроприводы делят на три группы: 1) групповые; 2) одиночные; 3) многодвигательные.

В групповых электроприводах электродвигатель с помощью механической передачи (трансмиссии) приводит в действие несколько рабочих механизмов.

В одиночных электроприводах механизм приводится в действие индивидуальным электродвигателем. При этом все элементы рабочего механизма соединяются с приводным двигателем соответствующими передачами.

В многодвигательных электроприводах каждый орган рабочего механизма снабжен своим двигателем. Так, например, на расточном станке вращение фрезы производится с помощью одного двигателя, продольное перемещение детали — другого, поперечное перемещение — третьего.

§ 13.3. РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ. ВЫБОР МОЩНОСТИ

Характер изменения нагрузки рабочего механизма определяет режим работы двигателя. Чтобы учесть эти изменения, рассчитывают и строят нагрузочные диаграммы, представляющие собой зависимость мощности, тока или вращающего момента двигателя от времени.

Различают следующие режимы работы электродвигателей: 1) длительный; 2) кратковременный; 3) повторно-кратковременный.

402

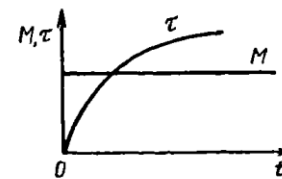


Рис. 13.3. Диаграмма работы двигателя в длительном режиме с постоянной нагрузкой

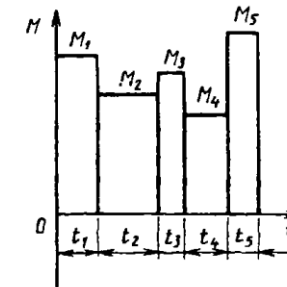


Рис. 13.4. Диаграмма работы двигателя в длительном режиме с переменной нагрузкой

момента сопротивления механизма M_m и частоте вращения ω_m выбирают передаточный механизм и соответствующее передаточное число i этого механизма. Передаточное число i рассчитывается на основании заданной частоты вращения механизма ω_m и предполагаемой номинальной частоты вращения двигателя: $i = \omega_{д ном} / \omega_m$. Для выбранного передаточного механизма с известным КПД η и заданным моментом M_m находят мощность двигателя:

$$P = M_m \omega_m / \eta.$$

При этом необходимо, чтобы номинальная мощность двигателя $P_{ном} \geq P$.

При *переменной нагрузке* (рис. 13.4) температура двигателя колеблется, но приблизительно может считаться неизменной. Частота вращения вала двигателя может также считаться практически постоянной. Мощность двигателя определяют на основании нагрузочной диаграммы, приведенной на рис. 13.4. Из этой диаграммы находят среднеквадратичный (эквивалентный по нагреву) момент:

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + \dots + M_5^2 t_5}{t_1 + \dots + t_5}}$$

Затем определяют требуемую мощность двигателя: $P = M_{\text{эк}} \omega_{\text{д ном}}$. Необходимо также проверить выбранный двигатель по перегрузочной способности. Максимальный момент не должен превышать допустимого для данного двигателя:

$$M_{\text{мах}} \leq M_{\text{ном}} \lambda_{\text{м}}$$

где $M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{д ном}}$ — номинальный момент двигателя; $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{доп}} / M_{\text{ном}}$ — допустимая перегрузочная способность двигателя.

Кратковременный режим. В этом режиме двигатель работает ограниченное время $t_{\text{к}}$ (рис. 13.5), в течение которого температура перегрева τ не успе-

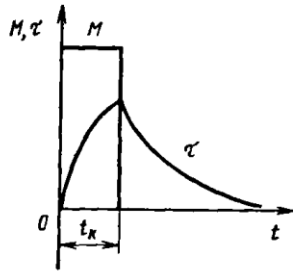


Рис. 13.5. Диаграмма работы двигателя в кратковременном режиме

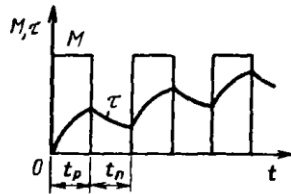


Рис. 13.6. Диаграмма работы двигателя в повторно-кратковременном режиме

вае достигнуть установившегося значения. За время отключенного состояния двигатель охлаждается до температуры окружающей среды. К механизмам, работающим в кратковременном режиме, относятся зажимные устройства металлорежущих станков, разводные мосты, шлюзовые устройства гидротехнических сооружений. Двигатели, работающие в кратковременном режиме, выпускают на стандартное время включения, равное 10, 30, 60 и 90 мин. Необходимо, чтобы энергия потерь, выделяющаяся в двигателе за время его работы, не превосходила энергии потерь, выделяющейся за номинальное (паспортное) время работы $t_{\text{ном}}$:

$$W_{\text{п ном}} = (P_{\text{ном}} / \eta_{\text{ном}} - P_{\text{ном}}) t_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} t_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) / \eta_{\text{ном}}$$

Необходимо, чтобы выбранный двигатель был проверен на перегрузочную способность:

$$M_{\text{мах}} \leq M_{\text{ном}} \lambda_{\text{ном}}$$

Повторно-кратковременный режим. В этом режиме время нагрузки $t_{\text{р}}$ (время работы) чередуется с паузами $t_{\text{н}}$ (рис. 13.6). За время нагрузки температура перегрева не успевает достигнуть установившегося значения, а за время паузы двигатель не успевает полностью охладиться. Через определенное число циклов среднее значение температуры достигает некоторого установившегося значения. Повторно-кратковременный режим характеризуется (в процентах) продолжительностью включения (ПВ), определяемой по формуле

$$\text{ПВ} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{р}} + t_{\text{н}}} 100.$$

Этот режим применяется в электроприводах кранов, подъемников, холодильных установках и т. д.

Для повторно-кратковременного режима работы выбирают специально рассчитанные двигатели с продолжительностью включения, равной 15, 25, 40 и 60%.

Расчет двигателя в этих случаях производится в следующем порядке.

1. По аналогии с имеющимися приводами производят предварительный выбор двигателя.

2. Для выбранного двигателя строят реальную нагрузочную диаграмму (рис. 13.7).

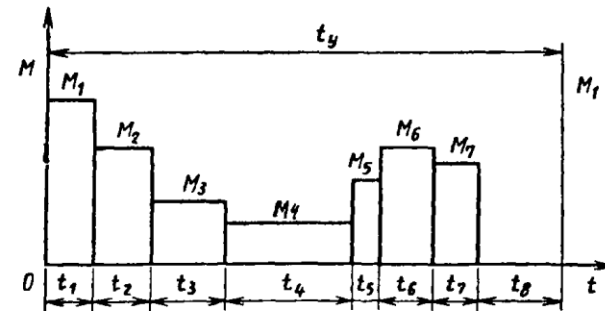


Рис. 13.7. Реальная нагрузочная характеристика двигателя

3. По нагрузочной характеристике определяют фактическую продолжительность включения двигателя:

$$ПВ_{\phi} = \frac{t_1 + \dots + t_7}{t_y} \cdot 100.$$

4. По нагрузочной характеристике находят эквивалентный момент двигателя за время его работы:

$$M_{\text{эк}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + \dots + M_7^2 t_7}{t_1 + \dots + t_7}}.$$

5. Приводят найденный эквивалентный момент к паспортному значению:

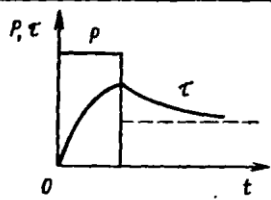
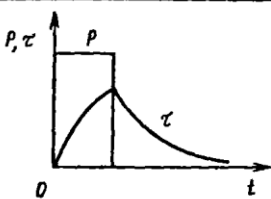
$$M'_{\text{эк}} = M_{\text{эк}} \sqrt{ПВ_{\phi} / ПВ_{\text{пасп}}}.$$

6. Сравнивают полученное значение $M'_{\text{эк}}$ с номинальным моментом двигателя $M_{\text{ном}}$. Должно выполняться условие $M'_{\text{эк}} \leq M_{\text{ном}}$.

7. Проверяют двигатель на перегрузочную способность: $M_{\text{мах}} \leq M_{\text{ном}} \lambda_m$. Если одно или оба условия не выполняются, производят повторный выбор двигателя и повторяют расчет.

Карточка № 13.3 (163)

Режимы работы электродвигателей. Выбор мощности

При каком режиме работы двигателя должен рассчитываться на максимальную мощность?	Повторно-кратковременном	26
	Длительном	1
	Кратковременном	23
Выберите график, правильно отражающий кратковременный режим работы двигателя		45
		42

§ 13.2. НАГРЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Работа электродвигателя, как и любого другого механизма, сопровождается потерями части энергии, которые превращаются в теплоту. При этом мощность потерь ΔP определяется как

$$\Delta P = P (1/\eta - 1), \quad (13.1)$$

где P — мощность на валу двигателя; η — КПД двигателя. Отсюда следует, что с ростом нагрузки температура двигателя и его изоляции возрастает и может достигнуть недопустимых значений.

Температура двигателя определяется не только

400

нагрузкой, она зависит и от температуры окружающей среды. При расчетах температуру окружающей среды принимают равной $+40^\circ \text{C}$. Разность между температурами двигателя и окружающей среды называют температурой перегрева τ . Так, например, для изоляции класса А (пропитанные волокнистые материалы) допустимая температура перегрева 65°C . В процессе нагревания двигателя часть теплоты идет на его нагревание, а часть излучается в окружающее пространство. Когда температура двигателя достигает установившегося значения, процесс нагревания прекращается и вся теплота, выделяющаяся в двигателе, излучается в окружающее пространство. Установившаяся температура перегрева определяется по формуле

$$\tau_{\text{уст}} = \Delta P / A,$$

где A — коэффициент теплоотдачи, Вт/град. Изменение температуры двигателя при его нагревании и охлаждении происходит по закону экспоненты:

при нагревании

$$\tau = \tau_{\text{уст}} (1 - e^{-t/T_n}); \quad (13.2)$$

при охлаждении

$$\tau = \tau_{\text{нач}} e^{-t/T_{\text{охл}}}, \quad (13.3)$$

где $\tau_{\text{нач}}$ — начальная температура перегрева; $T_{\text{охл}} = C/A_{\text{охл}}$ — постоянная времени охлаждения двигателя; C — теплоемкость двигателя, Вт·с/град.

На рис. 13.2 приведены кривые нагревания и охлаждения, соответствующие формулам (13.2) и (13.3).

Практически нагревание двигателя заканчивается через время $t_n = (3 \div 5)T_n$, а охлаждение — через время $t_{\text{охл}} = (3 \div 5)T_{\text{охл}}$. Скорость охлаждения зависит от способа вентиляции и ее интенсивности. В двигателе с самовентиляцией условия охлаждения значительно хуже, чем в двигателе с принудительным охлаждением. Поэтому $T_{\text{охл}}$ в двигателях с самовентиляцией в 2—3 раза больше T_n .

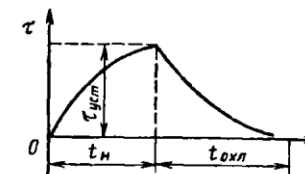


Рис. 13.2. Кривые нагревания и охлаждения двигателя

9.3. Нагрев и охлаждение двигателя. Классификация режимов работы электроприводов

Потери энергии в двигателе вызывают нагрев его отдельных частей. Допустимый нагрев двигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов. Чем больше нагревостойкость, тем при той же мощности меньше размеры двигателя или при тех же размерах можно увеличить его мощность. Лучшему использованию двигателя способствует также более совершенная система его охлаждения.

Изоляционные материалы, применяемые в электрических машинах, делятся на следующие основные классы нагревостойкости.

Изоляция класса А. К этому классу относятся хлопчатобумажные ткани, пряжа, бумага, волокнистые материалы из целлюлозы и шелка, пропитанные или погруженные в жидкий диэлектрик. Допустимая предельная

348

температура 105 °С. В настоящее время электрические двигатели с изоляцией класса А практически не изготавливают. Такую изоляцию имеют двигатели постоянного тока серии П мощностью до 2,2 кВт и асинхронные двигатели серий А, АО до 6-го габарита включительно, АК.

Изоляция класса Е. Этот класс включает синтетические эмали (для изоляции проводов) на основе полиэфирных эпоксидных и подобных им смол, синтетические органические пленки и т. п., синтетические материалы. Допустимая предельная температура нагрева 120 °С. Эта изоляция имеет небольшое применение в двигателях малой мощности. В основном двигатели изготавливают с изоляцией классов В и F.

Изоляция класса В. К этому классу относятся слюда, асбест, стеклянное волокно и другие неорганические материалы со связывающими материалами органического происхождения. Допустимая предельная температура нагрева 130 °С. Эти материалы применяются в двигателях серий 2П с высотой оси вращения до 120 мм включительно; 4А с высотой оси вращения до 132 мм. Применялись в старых сериях П мощностью от 3,2 до 14 кВт и в компенсированных двигателях мощностью 100—400 кВт; АО свыше 6-го габарита; А2 и АК2 мощностью от 400 до 1250 кВт.

Изоляция класса F. Этот класс включает те же материалы, что и для класса В, но сочетающиеся с синтетическими связующими и пропитывающими составами, модифицированными кремнийорганическими соединениями. Допустимая предельная температура нагрева 155 °С. Такую изоляцию имеют двигатели серий: 4А с высотой оси вращения свыше 132 мм, 2П с высотой оси вращения свыше 225 мм; МТF, МТKF; старых серий П мощностью свыше 14 кВт.

Изоляция класса H. К этому классу относятся те же материалы, что и для класса В, но в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами. Допустимая предельная температура 180 °С. Эта изоляция применяется для двигателей с частыми пусками и реверсами, а также при высокой температуре окружающей среды, например, для двигателей, предназначенных для грузоподъемных машин, в том числе металлургических. Такую изоляцию имеют двигатели серий МТН, МТКН, Д.

Изоляция класса С. Этот класс включает слюду, керамические материалы, стекло, кварц, применяе-

мые с неорганическими связующими составами или без связующих составов. Допустимая предельная температура более 180 °С. Нагревостойкость этих материалов не используется полностью в современном электромашиностроении, поэтому предельная температура нагрева для этого класса не установлена.

Соблюдение установленных ограничений по допустимой температуре нагрева обеспечивает срок службы изоляции электрических машин для новых серий двигателей 15—20 лет (например, двигатели серии 4А — 15 лет, серии Д — 20 лет). Превышение допустимых температур ведет к разрушению изоляции обмоток и к сокращению срока эксплуатации двигателя. Так, для изоляции класса А превышение допустимой температуры нагрева на 8—10 °С сокращает срок службы изоляции вдвое.

Предельные температуры обмоток двигателей с изоляцией различных классов достигаются при номинальной нагрузке и температуре окружающей (охлаждающей) среды 40 °С и при высоте над уровнем моря до 1000 м. При температуре меньше 40 °С двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной нагрузки (для изоляции класса А превышение номинальной нагрузки не допускается). При большей температуре окружающей среды и высоте над уровнем моря выше 1000 м нагрузка двигателя должна быть снижена относительно номинального значения. Степень снижения (или увеличения) нагрузки зависит, кроме температуры окружающей среды и высоты, еще от класса изоляции, режима работы двигателя и соотношения постоянных и переменных потерь. Ориентировочно для высоты до 1000 м при повышении температуры среды до 45 °С рекомендуемое снижение тока нагрузки составляет от 2 до 7 %, при температуре 50 °С — от 4 до 15 %, при 60 °С — от 10 до 30 %. Увеличивать нагрузку сверх номинальной при температуре среды ниже 40 °С (за исключением аварийных случаев) не рекомендуется, так как разница между средней и максимальной температурой (наиболее нагретой части обмотки) возрастает примерно пропорционально квадрату коэффициента нагрузки, что может привести к появлению опасных пиковых температур; кроме того, устанавливаемый срок службы двигателя учитывает естественные колебания температуры окружающей среды, что находит отражение в отказе от нормирования допустимой температуры обмоток двигателя.

Для двигателей нормируется не допустимая температура

обмотки и других частей машины, а допустимое превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды.

Условия нагрева отдельных частей машины различны. Большому нагреву подвергаются части обмоток, расположенные во внутренних областях машины. Так же неодинаково и выделение теплоты в различных режимах работы, и поэтому направление тепловых потоков внутри машины непостоянно. При холостом ходе теплота передается от более нагретой стали двигателя к его обмоткам, а в нагруженном состоянии обмотки более нагреты, чем сталь, и направление теплового потока обратное. Эти обстоятельства весьма усложняют тепловые расчеты, и поэтому без соответствующих упрощений сделать выбор мощности невозможно.

Исследование тепловых процессов в двигателях производится со следующими допущениями: 1) двигатель рассматривается как однородное тело, обладающее бесконечно большой теплопроводностью, с одинаковой температурой во всех точках выделения теплоты и точках, соприкасающихся с охлаждающей средой; 2) теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды; 3) температура охлаждающей среды постоянна; 4) теплоемкость двигателя, мощность тепловых потерь и теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

Уравнение теплового баланса двигателя при неизменной нагрузке имеет вид:

$$Q dt = A \tau dt + C d\tau, \quad (9.61)$$

где Q — количество теплоты (мощность потерь в двигателе), выделяемое двигателем в единицу времени, Дж/с; A — теплоотдача двигателя — количество теплоты, отдаваемой двигателем в охлаждающую среду в единицу времени при разности температур в 1 °С, Дж/(с·°С); τ — превышение температуры двигателя над температурой охлаждающей среды, °С, равно:

$$\tau = \vartheta_d - \vartheta_{o.c.}, \quad (9.62)$$

где ϑ_d , $\vartheta_{o.c.}$ — соответственно температура двигателя и охлаждающей среды, °С; C — теплоемкость двигателя — количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С, Дж/°С.

**ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ.
ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**1.1. Типы электроприводов и движения ,
осуществляемые ими**

Автоматизированным электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

6

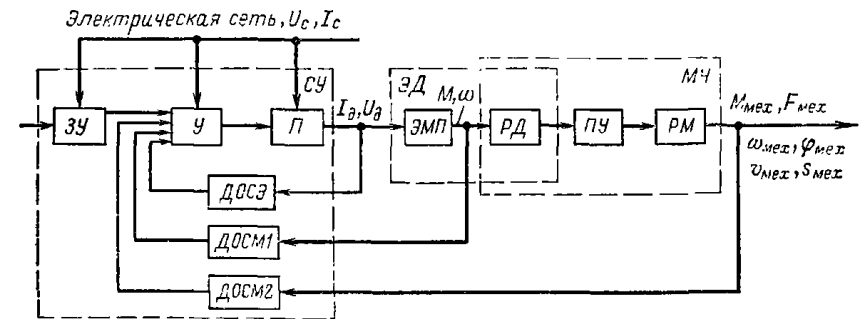


Рис. 1.1. Структурная схема автоматизированного электропривода.

вращательного или поступательного движения, но, главным образом, об обеспечении с помощью автоматизированного электропривода оптимального режима работы машин, при котором достигается наибольшая производительность при высокой точности.

Структурная схема автоматизированного электропривода приведена на рис. 1.1. В ней можно выделить три основных элемента:

1) механическая часть привода МЧ, включающая рабочий механизм РМ, передаточное устройство ПУ, предназначенное для передачи механической энергии от электродвигательного устройства электропривода к исполнительному органу рабочей машины и для изменения вида и скорости движения и усилия (момента вращения);

2) электродвигательное устройство ЭД, предназначенное для преобразования электрической энергии в механическую или механической энергии в электрическую. На схеме электродвигательное устройство (или двигатель) представлено двумя элементами: электромеханическим преобра-

зователем энергии ЭМП (на вход которого подаются электрические сигналы в виде напряжения и тока), преобразующим электрическую мощность в механическую мощность, и массой ротора двигателя РД, на которую воздействует момент М двигателя при угловой скорости ω ;

3) система управления СУ, состоящая из силовой преобразовательной части П (преобразователя), управляющего устройства У, задающего устройства ЗУ и датчиков обратных связей — электрических ДОСЭ и механических ДОСМ1 и ДОСМ2. Преобразователь П предназначен для питания двигателя и создания управляющего воздействия на него. Он преобразует род тока или напряжение, или частоту либо изменяет иные показатели качества электрической энергии, подводимой к двигателю. Устройство У, управляющее преобразователем П, получает командные сигналы от задающего устройства ЗУ, а информацию о текущем состоянии электропривода и технологического процесса — от датчиков обратных связей. С помощью этих датчиков ток, напряжение, мощность двигателя или другие его электрические параметры, скорость, момент или усилие и положение (перемещение) исполнительного органа, преобразуются в пропорциональные этим параметрам электрические сигналы, которые и подаются в управляющее устройство У. В нем текущее состояние электропривода и технологического процесса сравнивается с заданным и при наличии рассогласования вырабатывается управляющий сигнал, воздействующий через преобразователь П на электропривод в направлении устранения возникшего рассогласования с требуемой точностью и быстродействием.

Разнообразные электроприводы с учетом их исторического развития и с точки зрения способов распределения механической энергии можно разделить на три основных типа: групповой электропривод; индивидуальный и взаимосвязанный.

Групповой электропривод обеспечивает движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной рабочей машины. Передача механической энергии от одного двигателя к нескольким рабочим машинам и ее распределение между ними производится с помощью одной или нескольких трансмиссий. Такой групповой привод называют также трансмиссионным (рис. 1.2).

Дальнейшее развитие электропривода было связано с отказом от распределения механической энергии между

рабочими машинами, т. е. от трансмиссий, за счет установки на каждую рабочую машину своего электродвигателя ЭД (рис. 1.3). Однако при таком электроприводе сохраняются системы распределения механической энергии внутри машины, имевшие место и в трансмиссионном приводе. Между отдельными рабочими органами одной и той же машины остаются часто громоздкие механические связи, усложняющие конструкцию самой машины. Этот электропривод по сравнению с рассмотренным выше трансмиссионным является более совершенным, но по существу также может считаться групповым, если на рабочей машине имеется несколько рабочих органов, приводимых в движение от одного двигателя.

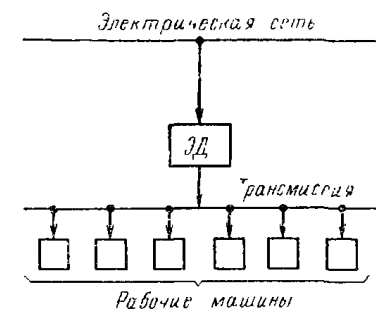


Рис. 1.2. Структурная схема группового трансмиссионного электропривода.

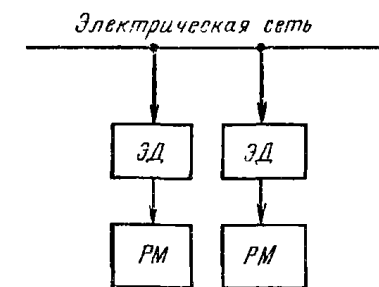


Рис. 1.3. Структурная схема группового электропривода.

Вследствие своего технического несовершенства трансмиссионный электропривод в настоящее время почти не применяется, он уступил место индивидуальному и взаимосвязанному, хотя в ряде случаев еще находит применение и групповой привод по схеме на рис. 1.3.

И н д и в и д у а л ь н ы й привод по сравнению с трансмиссионным и групповым обладает рядом преимуществ: производственные помещения не загромождаются тяжелыми трансмиссиями и передаточными устройствами; улучшаются условия работы и повышается производительность труда вследствие облегчения управления отдельными механизмами, уменьшения запыленности помещений, лучшего освещения рабочих мест; снижается травматизм обслуживающего персонала. Кроме того, индивидуальный электропривод отличается более высокими энергетическими показателями.

В трансмиссионном приводе при выходе из строя или при ремонте электродвигателя выбывает из работы группа машин, тогда как в случае индивидуального привода или группового по схеме на рис. 1.3 остановка одного электродвигателя вызывает остановку лишь одной рабочей машины.

При индивидуальном электроприводе за счет того, что каждый рабочий орган машины приводится в движение самостоятельным электродвигателем, рабочие органы машины оказываются уже не связанными друг с другом и поэтому значительно упрощаются механические передачи. В некоторых случаях в результате полного исключения механических передач удается существенно повысить точность работы машины. Индивидуальный электропривод

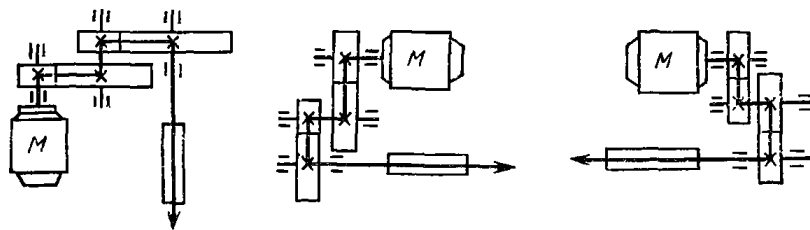


Рис. 1.4. Индивидуальные электроприводы рабочих органов (шпинделей) продольно-фрезерного станка.

позволяет обеспечить оптимальный режим работы машины, при котором достигается максимальная производительность. Наконец, при использовании индивидуального электропривода создаются наиболее благоприятные условия для автоматизации работы машин и технологических процессов.

Индивидуальный электропривод широко применяется в различных современных машинах, например в сложных металлорежущих станках, в прокатных станах металлургического производства, в подъемно-транспортных машинах, экскаваторах, в роботах-манипуляторах и т. п.

Примером использования индивидуального привода может служить продольно-фрезерный станок (рис. 1.4), имеющий отдельные электроприводы главных движений (приводы трех шпиндельных бабок). На том же станке (на рисунке не показаны) обычно еще установлены отдельные приводы для перемещения стола с обрабатываемым изделием, быстрого перемещения траверсы, закрепления

траверсы и приводы других механизмов, обслуживающих необходимые режимы работы станка как для автоматического цикла, так и для палочных операций. Координация работы отдельных рабочих органов и выполнение ими соответствующих рабочих операций достигается не за счет сложных механических передач, а с помощью электрической системы управления.

Взаимосвязанный электропривод содержит два или несколько электрически или механически связанных между собой электродвигательных устройства (или электроприводов), при работе которых поддерживается заданное соотношение или равенство скоростей или нагрузок или положение исполнительных органов рабочих машин. Необходимость в таком приводе часто возникает по конструктивным или технологическим соображениям.

Примером взаимосвязанного электропривода может служить привод цепного конвейера. На рис. 1.5 показана схема такого привода, рабочим органом которого является цепь, приводимая в движение двумя или несколькими двигателями ($M1$, $M2$), расположенными вдоль цепи. Эти двигатели имеют вынужденно одинаковую скорость.

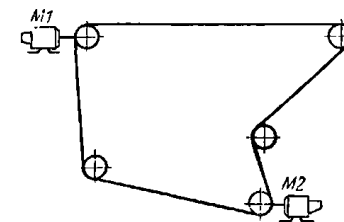


Рис. 1.5. Схема взаимосвязанного привода конвейера.

Взаимосвязанный электропривод широко применяется в различных современных машинах и агрегатах, например в копировальных металлорежущих станках и станках с программным управлением, в бумагоделательных машинах, ротационных машинах полиграфического производства, в текстильных агрегатах, в прокатных станах металлургического производства, в поточных технологических линиях по производству шинного корда, синтетических пленок и т. д.

Одной из разновидностей взаимосвязанного электропривода является многодвигательный электропривод — это электропривод, двигательные устройства которого совместно работают на общий вал. Примером многодвигательного привода может служить привод платформы механизма поворота мощного экскаватора. Здесь благодаря применению многодвигательного электропривода и специальному электрическому соединению двигателей удается

осуществить равномерное распределение статических и динамических нагрузок, возникающих при работе механизма поворота.

Представляет интерес современный многодвигательный электропривод переменного тока, состоящий из четырех

или шести двигателей, приводящих в движение общую шестерню мощного винтового пресса (рис. 1.6). Этот привод работает с большим числом включений в час, что обеспечивает высокую производительность пресса.

12

В том случае, когда во взаимосвязанном электроприводе возникает необходимость в поддержании постоянного соотношения скоростей рабочих органов, не имеющих механических связей, или когда осуществление механических связей затруднено, используется специальная схема электрической связи двух или нескольких электродвигателей, называемая с х е м о й э л е к т р и ч е с к о г о в а л а.

Многообразие производственных процессов обуславливает различные виды и характеры движения рабочих органов машины, а следовательно, и электроприводов.

По виду движения электроприводы могут обеспечить: вращательное однонаправленное движение, вращательное реверсивное и поступательное реверсивное движения.

Вращательное однонаправленное, а также реверсивное движение осуществляется электродвигателями обычного исполнения. Поступательное движение может быть получено путем использования электродвигателя вращательного движения обычного исполнения совместно с преобразовательным механизмом (кулисным, винтовым, реечным и т. п.) либо применения электродвигателя специального исполнения для поступательного движения (так называемые линейные электродвигатели, магнитогидродинамические двигатели и др.).

По степени управляемости электропривод может быть:

1) н е р е г у л и р у е м ы й — для приведения в действие исполнительного органа рабочей машины с одной рабочей скоростью, параметры привода изменяются только в результате возмущающих воздействий;

2) р е г у л и р у е м ы й — для сообщения изменяемой или неизменяемой скорости исполнительному органу машины, параметры привода могут изменяться под воздействием управляющего устройства;

3) п р о г р а м м н о - у п р а в л я е м ы й — управляемый в соответствии с заданной программой;

4) с л е д я щ и й — автоматически обрабатывающий перемещение исполнительного органа рабочей машины с определенной точностью в соответствии с произвольно меняющимся задающим сигналом;

5) а д а п т и в н ы й — автоматически избирающий структуру или параметры системы управления при изменении условий работы машины с целью выработки оптимального режима.

13

Можно классифицировать электроприводы и по роду передаточного устройства. В этом смысле электропривод бывает:

1) **редукторный**, в котором электродвигатель передает вращательное движение передаточному устройству, содержащему редуктор;

2) **безредукторный**, в котором осуществляется передача движения от электродвигателя либо непосредственно рабочему органу, либо через передаточное устройство, не содержащее редуктор.

По уровню автоматизации можно различать:

1) **неавтоматизированный** электропривод, в котором управление ручное; в настоящее время такой привод встречается редко, преимущественно в установках малой мощности бытовой и медицинской техники и т. п.;

2) **автоматизированный** электропривод, управляемый автоматическим регулированием параметров;

3) **автоматический** электропривод, в котором управляющее воздействие вырабатывается автоматическим устройством без участия оператора.

Два последних типа электропривода находят применение в подавляющем большинстве случаев.

Наконец, по роду тока применяются электроприводы **постоянного и переменного тока**.

1.2. Краткий исторический обзор развития электропривода

Развитие промышленных предприятий стало возможным лишь при переходе от ручного привода исполнительных механизмов к механическим приводам. Еще в глубокой древности применялись простейшие способы механизации работ с помощью водяных колес, приводимых в движение силой падающей или текущей воды. Известны водяные колеса, применявшиеся в Китае еще за 3000 лет до нашей эры.

С развитием капитализма в XVIII в. появились многочисленные фабрики, где широко применялись водяные двигатели, а затем и паровые машины. Вплоть до конца прошлого столетия единственным типом привода был чисто трансмиссионный, так как водяной двигатель или паровая машина соединялись с помощью канатов и ремней с главной трансмиссией, а все рабочие машины отдельного цеха или даже целой фабрики приводились в движение от этой трансмиссии.

Переход к более совершенным типам привода — индивидуальному и взаимосвязанному, которые полнее учитывают основные условия работы различных производственных механизмов, стал возможен лишь на базе широкой электрификации промышленности. Строительство электрических станций, передача электрической энергии на большие расстояния и применение электропривода создали новую эпоху в развитии промышленности,

Возможность создания электрического двигателя была обусловлена успехами в области электромагнетизма. Вторая четверть XIX в. характеризуется разработкой разнообразных физических приборов, наглядно демонстрирующих превращение электрической энергии в механическую. Первый электродвигатель, с помощью которого осуществлен электропривод, был построен в 1834—1838 гг. петербургским академиком Б. С. Якоби, в 1838 г. на Неве были проведены испытания этого двигателя, установленного на небольшом катере, вмещавшем 12—14 чел.; это было первое судно, приводившееся в движение электродвигателем. Однако отсутствие экономичных источников электрической энергии не позволило внедрить электропривод в промышленность. Развитие электропривода совершалось в длительной борьбе со старыми, отживавшими способами распределения механической энергии, и прошло более полувека, прежде чем окончательно победило передовое прогрессивное направление. До создания промышленного типа электрического генератора (З. Грамм, 1870 г.) встречались лишь отдельные случаи применения электропривода. Известно, например, что в 50—60-х годах XIX в. некоторое распространение получил электродвигатель французского электротехника Фромана, приводивший в движение типографские и ткацкие станки. Прогрессивную роль в развитии электропривода сыграло изобретение в 1860 г. итальянским ученым А. Пачинотти электродвигателя с кольцевым якорем.

И все же до конца прошлого столетия пар и вода оставались основной силой, приводившей в движение станки и механизмы в промышленности. Несмотря на успехи, достигнутые к 70-м годам XIX в. в области конструирования электродвигателей постоянного тока, электрическая энергия использовалась в основном лишь для освещения. Существовавшая тогда система постоянного тока не давала удовлетворительного решения задач передачи и распределения электроэнергии и тормозила развитие электропривода.

Появление переменного однофазного тока сыграло существенную роль в развитии электротехники вообще, однако попытки решения проблемы централизованного производства и распределения электроэнергии на переменном однофазном токе не привели к заметным сдвигам в области электропривода вследствие того, что электродвигатели однофазного тока не имели пускового вращающего момента.

Открытие явления вращающегося магнитного поля в 80-х годах прошлого века (Г. Феррарис и Н. Тесла) положило начало конструированию многофазных электродвигателей. Наиболее экономичной среди многофазных систем оказалась система трехфазного тока, основы которой были разработаны в 1889—1891 г. русским инженером М. О. Доливо-Добровольским. Система трехфазного тока явилась тем новым техническим средством, с помощью которого разрешался весь комплекс проблемы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Разработкой трехфазной системы были созданы предпосылки для развития электрификации.

Создание М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. трехфазного асинхронного двигателя ознаменовало новый этап в развитии электропривода и открыло широкую дорогу промышленному применению электричества.

Несомненные экономические преимущества централизованного производства электроэнергии и простота ее распределения привели к тому, что электродвигатель, постепенно вытесняя другие виды двигателей, занял первое место во всех отраслях промышленности. Мощ-

2.2. Механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей. Установившиеся режимы

При рассмотрении работы электродвигателя, приводящего в действие производственный механизм, необходимо прежде всего выявить соответствие механических характеристик двигателя характеристике производственного механизма. Поэтому для правильного проектирования и экономичной эксплуатации электропривода необходимо изучить эти характеристики.

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

Различные производственные механизмы обладают различными механическими характеристиками. Однако можно получить некоторые обобщающие выводы, если воспользоваться следующей эмпирической формулой для механической характеристики производственного механизма:

$$M_c = M_0 + (M_{c,ном} - M_0) (\omega/\omega_{ном})^x, \quad (2.16)$$

где M_c — момент сопротивления производственного механизма при скорости ω ; M_0 — момент сопротивления трения в движущихся частях механизма; $M_{c,ном}$ — момент сопротивления при номинальной скорости $\omega_{ном}$; x — показатель степени, характеризующий изменение момента сопротивления при изменении скорости.

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

1. Независимая от скорости механическая характеристика (прямая 1 на рис. 2.4). При этом $x = 0$ и момент сопротивления M_c не зависит от скорости. Такой характеристикой обладают, например, подъемные краны, лебедки, механизмы подачи металлорежущих станков, поршневые насосы при неизменной высоте подачи, конвейеры с постоянной массой передвигаемого материала. Сюда же могут быть отнесены с известным приближением все механизмы, у которых основным моментом сопротивления является момент трения, так как обычно в пределах рабочих скоростей момент трения изменяется мало.

2. Линейно-возрастающая механическая характеристика (прямая 2 на рис. 2.4). В этом случае $x = 1$ и момент сопротивления линейно зависит от скорости ω , увеличиваясь с ее возрастанием (для упрощения принято $M_0 = 0$).

Такая характеристика получится, например, в приводе генератора постоянного тока с независимым возбуждением, если последний будет работать на постоянный внешний резистор.

3. Нелинейно-возрастающая (параболическая) механическая характеристика (кривая 3 на рис. 2.4). Этой характеристике соответствует $x = 2$; момент сопротивления M_c здесь зависит от квадрата скорости. Механизмы, обладающие такой характеристикой, называют иногда механизмами с вентиляторным моментом, поскольку у вентиляторов момент сопротивления зависит от квадрата скорости. К меха-

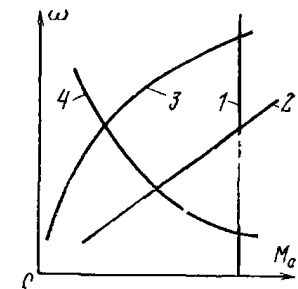


Рис. 2.4. Механические характеристики производственных механизмов.

низмам, обладающим параболической механической характеристикой, относятся также центробежные насосы, гребные винты и т. п.

4. Нелинейно-спадающая механическая характеристика (кривая 4 на рис. 2.4). При этом $x = -1$ и момент сопротивления M_c изменяется обратно пропорционально скорости, а мощность, потребляемая механизмом, остается постоянной. Такой характеристикой обладают, например, некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлорежущие станки, молотки в металлургической промышленности и т. п. Эти характеристики не исчерпывают всех практически возможных случаев, но дают представление о характеристиках некоторых типичных производственных механизмов.

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента, т. е. $\omega = f(M)$. Почти все электродвигатели обладают тем свойством, что скорость их является убывающей функцией момента двигателя.

Это относится почти ко всем обычным электродвигателям, применяемым в промышленности, т. е. к двигателям постоянного тока независимого, последовательного и смешанного возбуждения, а также к асинхронным бесколлекторным и коллекторным двигателям переменного тока. Однако степень изменения скорости с изменением момента у разных двигателей различна и характеризуется так называемой жесткостью их механических характеристик.

Жесткость механической характеристики электропривода — это отношение разности электромагнитных моментов, развиваемых электродвигательным устройством, к соответствующей разности угловых скоростей электропривода, т. е.

$$\beta = (M_2 - M_1) / (\omega_2 - \omega_1) = \Delta M / \Delta \omega. \quad (2.17)$$

Обычно на рабочих участках механические характеристики двигателей имеют отрицательную жесткость $\beta < 0$. Линейные механические характеристики обладают постоянной жесткостью. В случае нелинейных характеристик их жесткость не постоянна и определяется в каждой точке как производная момента по угловой скорости

$$\beta = \partial M / \partial \omega. \quad (2.18)$$

Понятие жесткости может быть применено и к механическим характеристикам производственных механизмов. Эти характеристики можно оценивать жесткостью

$$\beta_c = \partial M_c / \partial \omega. \quad (2.19)$$

Механические характеристики электродвигателей можно разделить на четыре основные категории:

1. Абсолютно жесткая механическая характеристика ($\beta = \infty$) — это характеристика, при которой скорость с изменением момента остается неизменной. Такой характеристикой обладают синхронные двигатели (прямая 1 на рис. 2.5).

2. Жесткая механическая характеристика — это характеристика, при которой скорость с изменением момента хотя и уменьшается, но в малой степени. Жесткой механической характеристикой обладают двигатели постоянного тока независимого возбуждения, а также асинхронные двигатели в пределах рабочей части механической характеристики (кривая 2 на рис. 2.5).

Для асинхронного двигателя жесткость в различных точках механической характеристики различна (рис. 2.6).

Между максимальными (критическими) значениями моментов в двигательном $M_{к,д}$ и генераторном $M_{к,г}$ режимах характеристика асинхронного двигателя имеет сравнительно большую жесткость.

3. Мягкая механическая характеристика — это характеристика, при которой с изменением момента скорость значительно изменяется. Такой характеристикой обладают двигатели постоянного тока последовательного возбуждения, особенно в зоне малых моментов (кривая 3 на рис. 2.5). Для этих двигателей жесткость не остается постоянной для всех точек характеристик.

Двигатели постоянного тока смешанного возбуждения могут быть отнесены ко второй или третьей группе в зави-

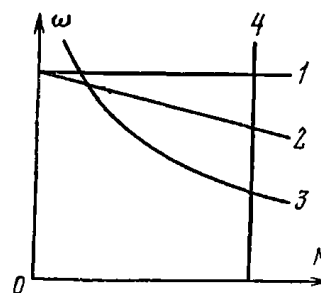


Рис. 2.5. Механические характеристики двигателей

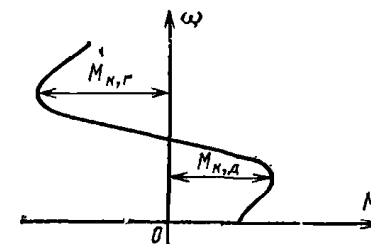


Рис. 2.6. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

симости от значения жесткости механической характеристики.

4. Абсолютно мягкая механическая характеристика ($\beta = 0$) — это характеристика, при которой момент двигателя с изменением угловой скорости остается неизменным. Такой характеристикой обладают, например, двигатели постоянного тока независимого возбуждения при питании их от источника тока или при работе в замкнутых системах электропривода в режиме стабилизации тока якоря (прямая 4 на рис. 2.5).

Работе электрического двигателя и производственного механизма в установившемся режиме соответствует равновесие момента сопротивления механизма и вращающего момента двигателя при определенной скорости, т. е. $M = M_c$.

Изменение момента сопротивления на валу двигателя приводит к тому, что скорость двигателя и момент, который он развивает, могут автоматически изменяться и

привод будет продолжать устойчиво работать при другой скорости с новым значением момента.

Для восстановления равновесия между изменившимся моментом сопротивления и моментом двигателя во всех неэлектрических двигателях требуется участие специальных регуляторов, которые воздействуют на источник энергии, увеличивая или соответственно уменьшая подачу воды, топлива или пара. В электрических двигателях роль автоматического регулятора может выполнять ЭДС двигателя. Эта особенность электродвигателей автоматически поддерживать равновесие системы при изменяющемся моменте сопротивления является весьма ценным свойством, так как во многих случаях момент может изменяться в той или иной степени.

Изложенное иллюстрируется рис. 2.7, где приведены механическая характеристика 3 двигателя постоянного тока независимого возбуждения и две характеристики 1 и 2 производственного механизма, например конвейера, приводимого в движение этим двигателем¹.

Характеристика 1 соответствует моменту сопротивления M_1 при холостом ходе конвейера. Характеристика 2 получается при большом моменте сопротивления M_2 после того, как на конвейер положены транспортируемые им детали. Вначале при холостом ходе конвейера $M = M_1$ двигатель работает со скоростью ω_1 . С увеличением нагрузки двигатель тормозится, скорость его снижается, благодаря чему уменьшается ЭДС. При уменьшении ЭДС возрастают ток в якорной цепи двигателя и момент, развиваемый двигателем. Рост момента двигателя продолжается до тех пор, пока не наступит равновесие моментов $M = M_2$ (точка ω_2). Эта новая точка также является общей для механической характеристики конвейера (2) и механической характеристики электродвигателя (3).

Рассмотренные условия работы электропривода в установившемся режиме характеризуют статическую устойчивость привода, когда изменение во времени скорости и момента происходит относительно медленно в отличие от динамической устойчивости, имеющей место при переходных режимах.

Под статической устойчивостью понимается такое состояние установившегося режима ра-

¹ Механические характеристики производственного механизма для удобства изображаются в первом квадранте, хотя момент сопротивления имеет отрицательный знак.

боты привода, когда при случайно возникшем отклонении скорости от установившегося значения привод возвратится в точку установившегося режима. При неустойчивом движении любое, даже самое малое, отклонение скорости от установившегося значения приводит к изменению состояния привода — он не возвращается в точку установившегося режима.

Привод статически устойчив, если в точке установившегося режима выполняется условие

$$\frac{\partial M}{\partial \omega} - \frac{\partial M_c}{\partial \omega} < 0 \quad (2.20)$$

или

$$\beta - \beta_c < 0. \quad (2.21)$$

Условие (2.20) означает, что привод статически устойчив, если при положительном приращении угловой ско-

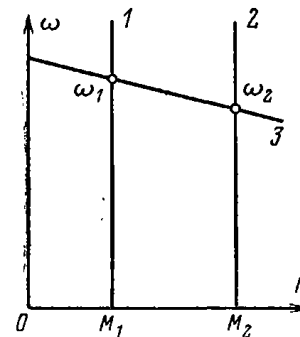


Рис. 2.7. Механические характеристики двигателя постоянного тока независимого возбуждения и приводимого им механизма.

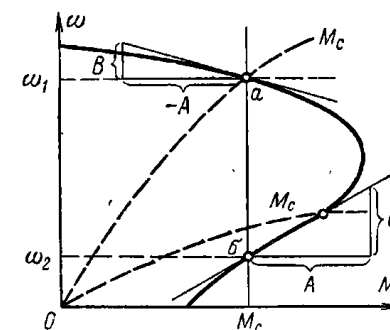


Рис. 2.8. К определению статической устойчивости привода при постоянном моменте сопротивления и вентиляторной нагрузке.

рости момент двигателя окажется меньше статического момента (момента сопротивления) и привод вследствие этого затормозится до прежнего значения скорости. При отрицательном приращении угловой скорости момент двигателя окажется больше момента сопротивления и привод вследствие этого разгонится до прежнего значения скорости.

При постоянном моменте нагрузки (прямая 1 на рис. 2.4) статическая устойчивость будет определяться только жесткостью механической характеристики двигателя, так как $\frac{\partial M_c}{\partial \omega} = 0$. Если она отрицательна, то работа в уста-

новившемся режиме устойчива $\partial M/\partial\omega - \partial M_c/\partial\omega = \partial M/\partial\omega < 0$, как это имело место в рассмотренном случае (рис. 2.7).

Если же использовать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором и нагрузить его постоянным моментом (рис. 2.8), то в точке *a* $\partial M/\partial\omega - \partial M_c/\partial\omega = -A/B - 0 < 0$, т. е. устойчивый режим, а в точке *б* $\partial M/\partial\omega - \partial M_c/\partial\omega = A/C - 0 > 0$, т. е. режим неустойчивый. При работе того же двигателя на механизм с вентиляторной характеристикой (рис. 2.8) легко доказать, что во всех точках работа будет устойчивой.

Обычно при проектировании электропривода механическая характеристика производственного механизма является уже заданной. Поэтому для получения устойчивой работы в установившемся режиме для определенных скоростей и моментов сопротивления производственных механизмов необходимо подбирать механическую характеристику электродвигателя соответствующей формы. Это может быть достигнуто подбором электродвигателя соответствующего типа и изменением электрических параметров его цепей. Иногда для получения требуемых механических характеристик приходится применять специальные схемы включения электрических машин и аппаратов.