

ЭЛЕКТРОПРИВОД

вопросы к экзамену и литература

ЛИТЕРАТУРА

В. В. МОСКАЛЕНКО

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД

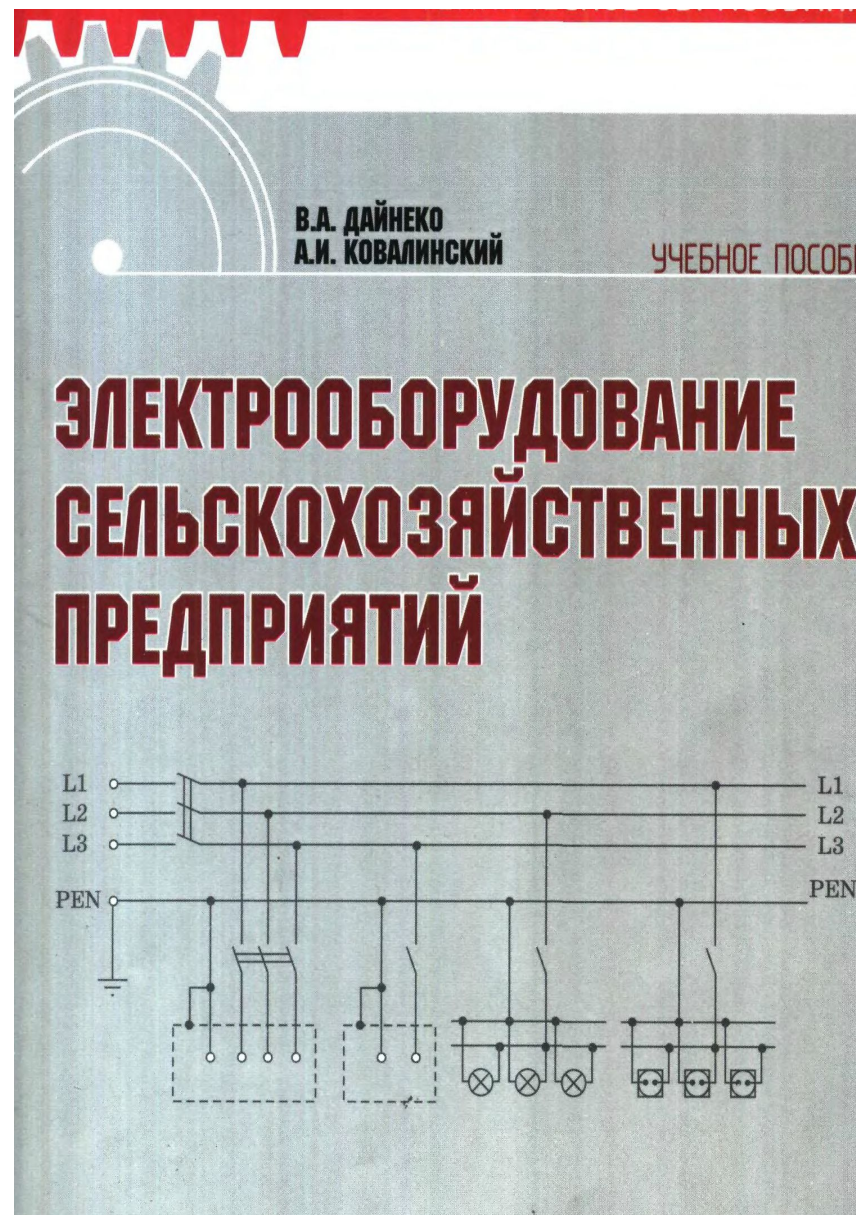
УЧЕБНИК

Допущено

*Министерством образования и науки Российской Федерации
в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Электротехника, электромеханика и электротехнологии»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2007



Литература по электроприводу

- 1. Чиликин М.Г. Общий курс электропривода: учеб. пособие/ М.Г. Чиликин А.С., Сандлер- Москва: Энергоиздат, 1981. - 576 с.
- 2. Москаленко В.В. Электрический привод: Учебник для электротехн. спец. / В. В. Москаленко. - Москва : Высш. шк., 1991. - 430с.
- 3. Дайнеко, В.А. Электрооборудование сельскохозяйственных предприятий / В.А. Дайнеко, А.И. Ковалинский. - Минск : Новое знание, 2008. - 314 с.
- 4. Фоменков А.П. Электропривод сельскохозяйственных машин, агрегатов и поточных линий: учебник для высш. учеб. заведений/ А.П. Фоменков.- Москва: Колос, 1984.-288с.
- 5. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для электротехн. спец. / В. В. Москаленко. - Москва: Энергоатомиздат, 1986.-416 с.
- 6. Ильинский И.Ф. Общий курс электропривода: учебник для вузов / И. Ф. Ильинский, В. Ф. Козаченко. - М.: Энергоатомиздат, 1992. - 544с
- 7. **ЭЛЕКТРОПРИВОД. Часть 1. Проектирование нерегулируемого электропривода рабочей машины .** Гурин В.В., Бабаева Е.В. БГАТУ, 2006 г.
- 8. ГОСТ 16593-79. Электроприводы. Термины и определения. -Москва: Издательство стандартов, 1980- 80 с.

Вопросы к экзамену

- **1. Определение понятия «Электропривод». Структурная схема электропривода.**
- **2. Классификация электроприводов. Преимущества ЭП перед другими видами привода.**
- **3. Механические характеристики рабочих машин.**
- **4. Механические и электромеханические характеристики электродвигателей. Жесткость механических характеристик.**
- **5. Расчет и построение механической характеристики асинхронного электродвигателя по паспортным данным.**

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

- **6. Кинематические и расчетные схемы электропривода. Определение приведенных моментов сопротивления и инерции.**
- **7. Определение времени разбега и торможения электропривода с асинхронным электродвигателем.**
- **8. Выбор электродвигателей по мощности с учетом режима их работы.**
- **9. Энергетика электропривода. Регулирование координат асинхронного электродвигателя.**
- **10. Автоматизированное управление электроприводом. Понятие разомкнутых и замкнутых систем электропривода.**

Вопросы к экзамену

- **11. Замкнутая система ЭП с обратной связью по скорости.**
- **12. Способы пуска АД. Пуск и реверс АД.**
- **13. Регулирование скорости АД.**
- **14. Принцип частотного регулирования скорости АД.**
- **15. Механические характеристики АД при частотном регулировании.**

Вопросы к экзамену

- 16. Преобразователи частоты для регулируемого электропривода.
- Функциональная схема преобразователя частоты со звеном постоянного тока.
- 17. Выбор электродвигателя по мощности для режима S1.
- 18. Выбор электродвигателя по мощности для режима S2.
- 19. Выбор электродвигателя по мощности для режима S3.
- 20. Надежность электроприводов.
Коэффициентный метод расчета надежности ЭП

Вопросы к экзамену

- **21. Пути повышения экономичности и надежности электроприводов сельскохозяйственных машин.**
- **22. Особенности работы электроприводов в условиях сельского хозяйства.**
- **23. Приводные характеристики рабочих машин.**
- **24. Электропривод с однофазным асинхронным электродвигателем.**
- **25. Приводные характеристики электроприводов насосных установок.**

Вопросы к экзамену

- **26. Выбор типа и мощности электродвигателей водоснабжающих установок.**
- **27. Регулирование подачи насосных установок.**
- **28. Приводные характеристики вентиляторов.**
- **29. Регулирование подачи вентиляторов.**
- **30. Выбор мощности электродвигателей для привода вентиляционных установок.**

Вопросы к экзамену

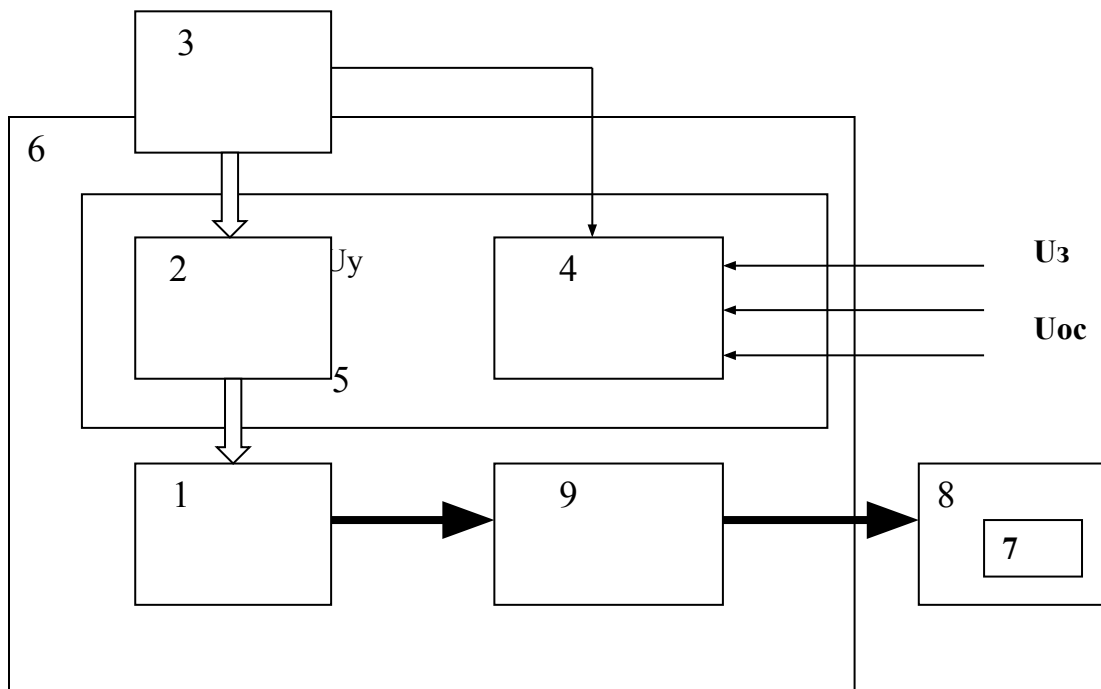
- **32. Особенности электроприводов кормоприготовительных машин. Способы облегчения пуска электродвигателей кормоприготовительных машин.**
- **33. Приводные характеристики измельчителей кормов.**
- **34. Нагрузочные диаграммы дробилок зерна. Определение мощности дробильных машин. Удельная мощность измельчения.**
- **35. Управление электроприводами зерносушилок (электропривод теплогенераторов, выгрузных и загрузочных устройств)**
- **36. Электропривод доильных установок и машин первичной обработки молока. Электропривод вакуумного насоса.**
- **37. Электропривод холодильных машин.**
- **38. Электропривод сепараторов молока**

ЭЛЕКТРОПРИВОД

- **Определение понятия «Электропривод».**
Структурная схема электропривода.
Классификация электроприводов.
- *Электроприводом называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение рабочих органов машин и управления этим движением. (по ГОСТ 16593-79).*

Классификация электроприводов

- Электропривод (ЭП) бывает групповой, индивидуальный и взаимосвязанный.
- В *групповом* приводе один электродвигатель приводит в движение с помощью разветвленной передачи группу механизмов или группу рабочих органов одного механизма. Кинематическая схема такого привода оказывается громоздкой, а сам привод неэкономичен, поэтому находит ограниченное применение.
- В *индивидуальном* приводе электродвигатель приводит в движение только один рабочий орган.
- Кинематическая схема механизма с индивидуальным приводом существенно упрощается, повышается экономичность и снижается металлоемкость механизма. Электродвигатель может встраиваться непосредственно в механизм.
- *Взаимосвязанный* привод обеспечивает работу одного механизма при помощи нескольких электродвигателей.



Структурная схема электропривода.

- 1 – электродвигатель; 2 – силовой преобразователь;
 3 – источник электроэнергии; 4 – блок управления;
 5 – система управления; 6 – электропривод;
 7 – исполнительный орган; 8 – рабочая машина;
 9 – передаточное устройство.

Классификация ЭП

- По характеру движения электроприводы бывают *вращательные и линейные*; по направлению вращения – *реверсивные и нереверсивные*.
- По принципу действия электродвигательного устройства ЭП бывают: *непрерывного действия* (подвижные части ЭД в установившемся режиме находятся в состоянии непрерывного движения) и *дискретного действия* (подвижные части находятся в состоянии дискретного движения).

Классификация ЭП

- По роду тока ЭП разделяются на приводы *постоянного и переменного* тока.
- По характеру изменения параметров ЭП могут быть *регулируемыми* и *нерегулируемыми*; параметры регулируемых электроприводов изменяются под воздействием регулирующего устройства, нерегулируемых – в результате возмущающих воздействий.
- Электропривод может получать питание от сети, а может быть *автономным*, т.е. получать питание от аккумуляторов или от теплового двигателя (*дизель-электрический* или *турбоэлектрический* привод).
- По виду преобразовательного устройства ЭП разделяются на *вентильные, тиристорные, транзисторные* и с преобразователями частоты.

Классификация ЭП

- По выполняемым функциям электроприводы бывают *автоматизированными* и *неавтоматизированными*.
Автоматизированные ЭП делятся на *программно-управляемые, следящие, позиционные* и *адаптивные* (автоматически избирающие структуру или параметры системы регулирования при изменениях условий работы).
- По виду связей с исполнительным органом рабочей машины существуют *безредукторные, редукторные, маховиковые* и *электрогидравлические* ЭП.

Преимущества ЭП

- По сравнению с другими видами привода рабочих машин электропривод имеет следующие преимущества:
- электродвигатели имеют высокий к.п.д. – 75...90% против 28...34% у тепловых двигателей;
- электродвигатели обладают повышенным пусковым моментом;
- электродвигатели проще по устройству, безопаснее и дешевле ДВС;
- электропривод легко автоматизируется и управляется;
- электропривод легко приблизить к рабочему органу или встроить в исполнительный механизм.

Механические характеристики рабочих машины

Большинство механических характеристик машин позволяет описать следующая эмпирическая формула:

$$M = M_0 + (M_{с.ном} - M_0)(\omega/\omega_{ном})^x,$$

где M_0 — начальный момент сопротивления при $\omega = 0$; ω — текущее значение угловой скорости, соответствующее текущему значению момента M ; $M_{с. ном}$ — статический момент сопротивления при $\omega_{ном}$.

Механические характеристики рабочих машин

- Если $x = 0$, то получаем механическую характеристику, не зависящую от скорости, для которой $M = M_{сн}$. Такая характеристика у подъемных кранов, лебедок. К этой группе могут быть отнесены механизмы, у которых основное сопротивление создают силы трения (навозоуборочные транспортеры, кормораздатчики, шнеки, конвейеры, барабаны сушилок, триеры).

Механические характеристики рабочих машин

- При $x=1$ получается линейно-возрастающая характеристика. Ею обладают многие машины, у которых основные сопротивления создаются силами трения совместно с аэродинамическими (молотилки, дробилки кормов, лесопильные рамы, зерноочистительные машины). Иногда такая характеристика называется генераторной, так как она присуща генераторам постоянного тока независимого возбуждения при постоянной нагрузке.

Механические характеристики рабочих машин

- Если $x=2$, то момент сопротивления пропорционален квадрату угловой скорости (рис. 1.5). Такая характеристика называется вентиляторной. Так изменяется момент сопротивления вентиляторов, компрессоров, центробежных насосов, сепараторов, пневматических транспортеров и других механизмов, принцип работы которых основан на законах аэро- и гидродинамики

Механические характеристики рабочих машин

- Если $x = -1$, получается нелинейно спадающая характеристика, для которой момент сопротивления изменяется обратно пропорционально скорости, а мощность остается постоянной (металлорежущие станки, у которых с увеличением подачи скорость вращения деталей уменьшается).

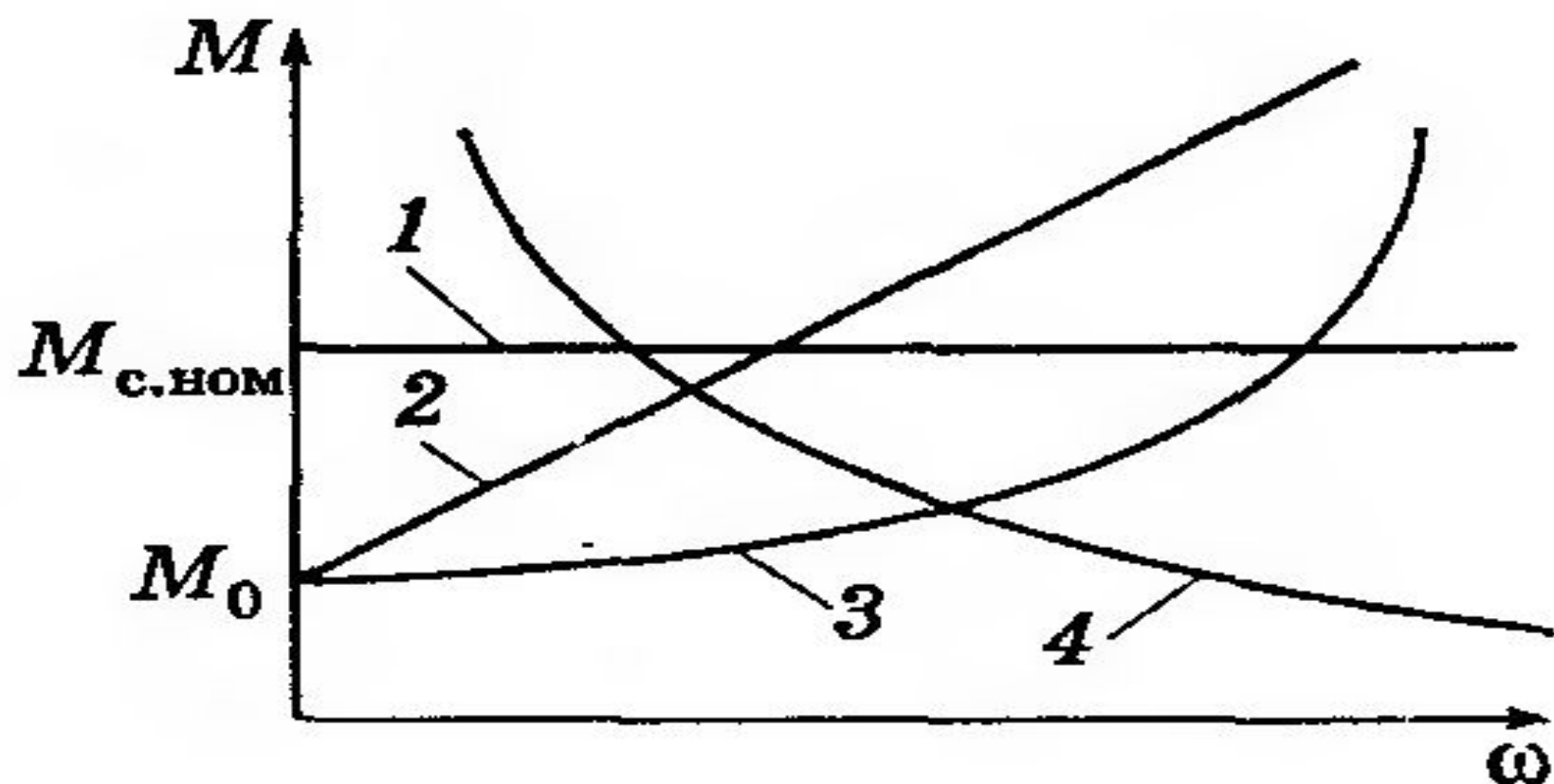


Рис. 1.2. Механическая характеристика рабочих машин:
 1 — при $x = 0$; 2 — при $x = 1$;
 3 — при $x = 2$; 4 — при $x = -1$

Механические и электромеханические характеристики электродвигателей. Жесткость механических характеристик

- Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость скорости от электромагнитного момента, развиваемого электродвигателем в установившемся режиме, то есть $\omega = f(M)$.

Механические характеристики электродвигателей могут быть представлены как $M = f(\omega)$.

Различают естественную и искусственную характеристики электродвигателей. Естественная характеристика соответствует основной схеме включения электродвигателя и номинальным параметрам питающего напряжения.

Если двигатель включен не по основной схеме, или в его электрические цепи включены дополнительные элементы, или же двигатель питается напряжением с неноминальными параметрами, то он будет иметь искусственные характеристики.

Таких характеристик может быть сколь угодно много; иногда они называются регулировочными.

Механические и электромеханические характеристики электродвигателей. Жесткость механических характеристик

- Качественно механические характеристики электродвигателя оцениваются жесткостью β , определяемой как

$$\beta = dM/d\omega \approx \Delta M/\Delta \omega$$

Используя этот показатель, можно оценивать характеристику 1 синхронного электродвигателя на *рис.* как абсолютно жесткую, характеристику асинхронного электродвигателя 3 – как имеющую переменную жесткость, характеристику 2 электродвигателя постоянного тока независимого возбуждения как жесткую, характеристику 4 электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения – как мягкую.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

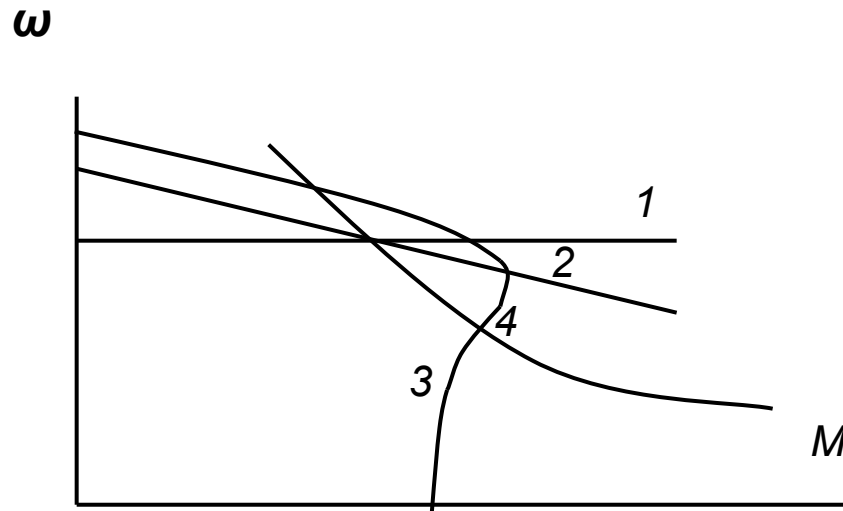


Рис. Механические характеристики электродвигателей. 1- абсолютно жесткая

Используя механические характеристики исполнительных органов и электродвигателей можно выполнять проверку условия установившегося движения электропривода.

Для этого в одном квадранте совмещаются характеристики электродвигателя 1 и исполнительного органа 2

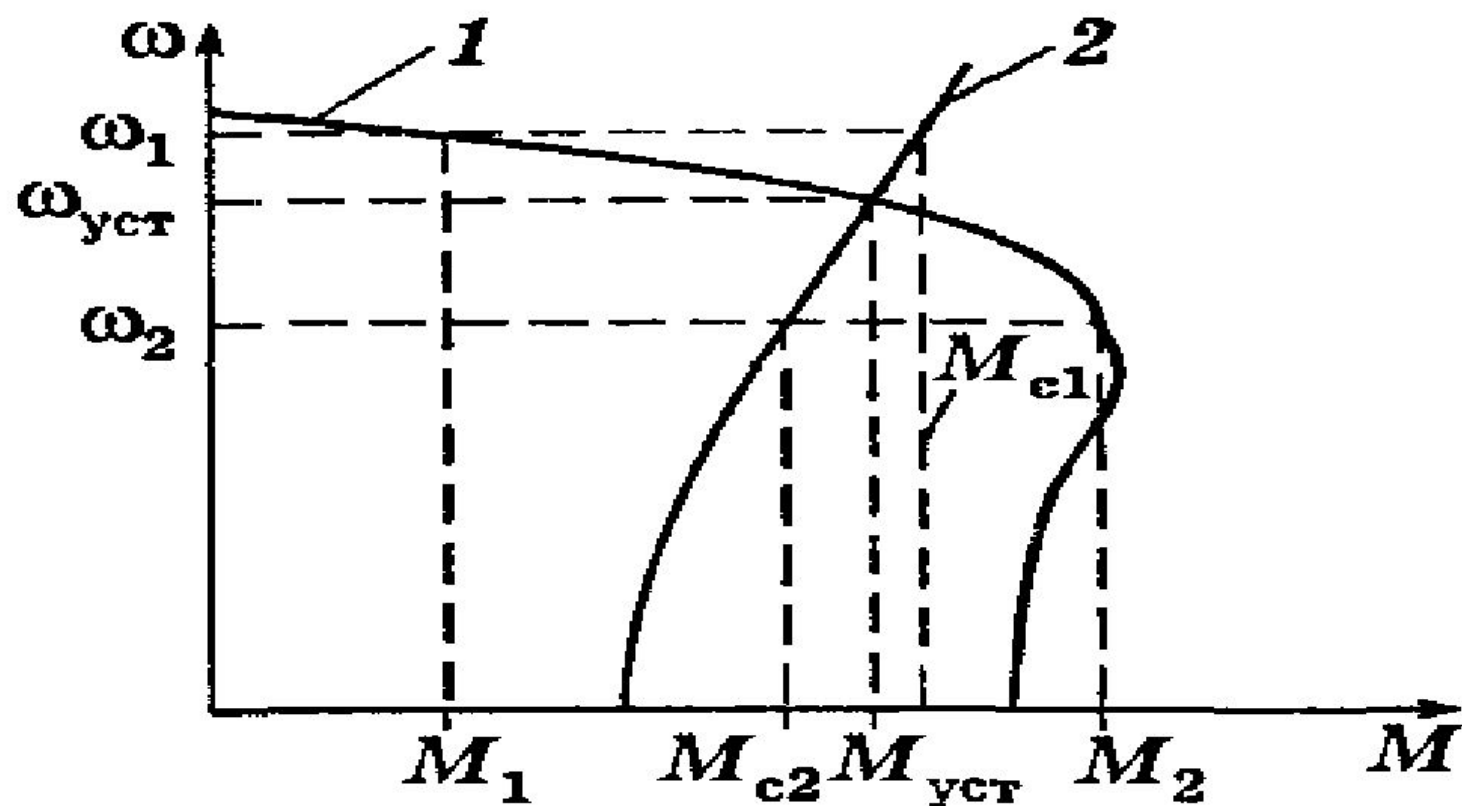


Рис. 1.4. Определение скорости установившегося движения и статической устойчивости работы электропривода:
1, 2 — механические характеристики соответственно электродвигателя и рабочей машины

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

1.7.1. Уравнение движения электропривода

Ранее рассматривались условия работы электропривода в установившемся режиме, когда момент, развиваемый двигателем, равен моменту сопротивления механизма и скорость привода постоянна.

В тех случаях, когда привод ускоряется или замедляется, возникает инерционный момент, который двигатель должен преодолевать в переходном режиме.

Переходным режимом электропривода называют режим при переходе от одного установившегося состояния к другому, когда изменяются скорость, момент и ток.

Причиной возникновения переходных режимов в электроприводе является либо изменение нагрузки, связанное с производственным процессом, либо воздействие на электропривод при управлении им (пуск, торможение, реверс и т.д.). Переходные режимы возникают также при авариях или нарушениях нормальных условий электроснабжения (колебания напряжения, частоты, несимметричные режимы).

Уравнение движения электропривода имеет вид

$$M - M_c = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (1.14)$$

где M — вращающий момент электродвигателя; M_c — момент сопротивления механизма; $J \frac{d\omega}{dt}$ — инерционный, или динамический, момент.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

Уравнение (1.14) получено при условии, что масса тела и его момент инерции постоянны.

При $M > M_c$ $d\omega/dt > 0$, привод ускоряется; при $M < M_c$ $d\omega/dt < 0$, привод замедляется; при $M = M_c$ $d\omega/dt = 0$, привод работает в установившемся режиме. Проверка на устойчивость движения может быть выполнена по условию (1.1).

1.7.2. Расчетные схемы механической части электропривода. Приведение моментов сопротивления и инерции

Элементы, образующие механическую часть электропривода, связаны между собой и оказывают друг на друга воздействие. Поэтому при анализе механического движения того или иного элемента необходимо учитывать влияние на него других элементов кинематической схемы электропривода. Это достигается пересчетом сил, вращающих моментов, масс и моментов инерции к элементу, движение которого рассматривается. Такая процедура в теории электропривода называется *операцией приведения*, а пересчитанные переменные и параметры — *приведенными*.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

Рассмотрим операцию приведения на примере механической части электропривода подъемной лебедки (рис. 1.62, а). Электродвигатель 1 с моментом инерции J_d через одноступенчатый редуктор 3 с парой шестерен 4 и 10 приводит во вращение с угловой скоростью ω_6 барабан 6 подъемной лебедки, который

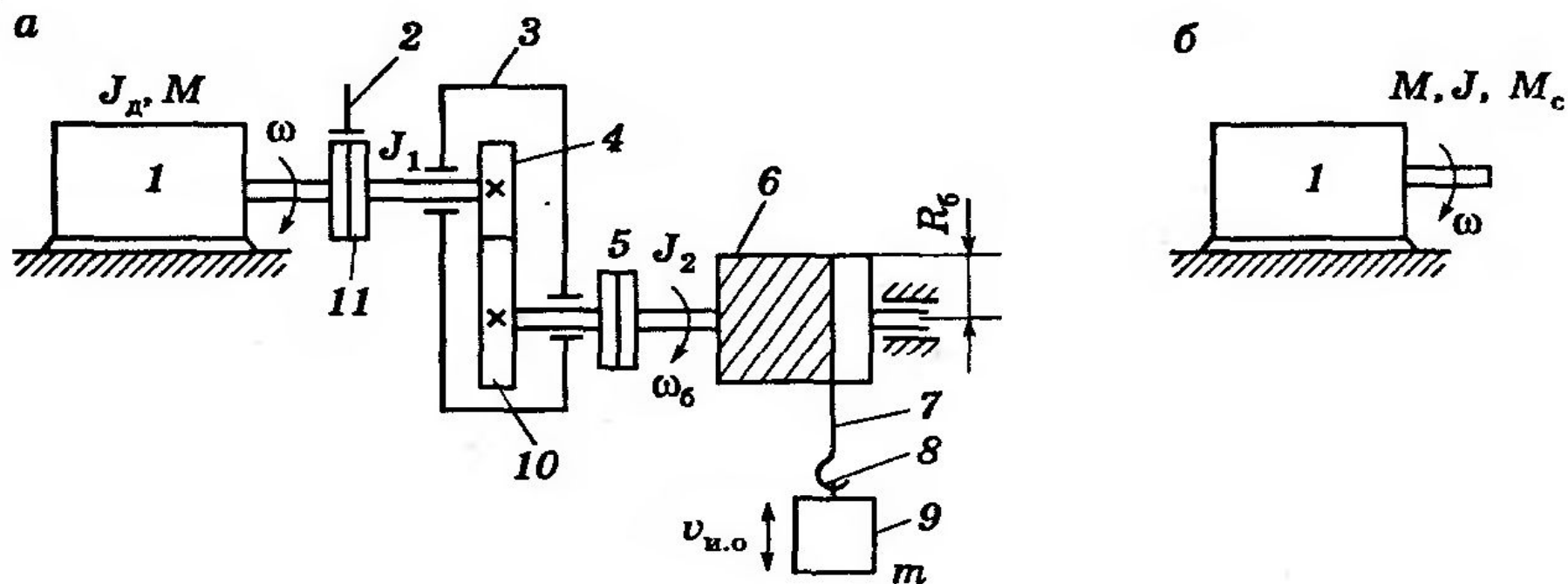


Рис. 1.62. Схемы подъемной лебедки:
а — кинематическая; б — расчетная

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

с помощью троса 7 и крюка 8 поднимает (или опускает) с линейной скоростью исполнительного органа $v_{и.о}$ груз 9 массой m .

На схеме показаны также соединительные механические муфты 5 и 11, первая из которых служит шкивом для механического тормоза 2. Примем допущение, что все элементы кинематической схемы, приведенной на рис. 1.62, а, являются абсолютно жесткими и между ними отсутствуют зазоры.

Операцию приведения можно выполнять относительно любого элемента, движение которого подлежит рассмотрению. Обычно в качестве такого элемента выбирают двигатель, являющийся источником механического движения. В этом случае операция приведения состоит в том, что реальная схема механической части электропривода заменяется некоторой расчетной (эквивалентной) схемой (рис. 1.62, б), основой которой является двигатель, а остальные элементы реальной схемы представлены некоторыми пока неизвестными приведенными моментом нагрузки M_c и моментом инерции J . Схема на рис. 1.62, б получила название *одномассовой системы* или *жесткого приведенного механического звена*.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

Математические соотношения, позволяющие определить M_c и J и тем самым перейти к расчетной схеме, выводятся исходя из закона сохранения энергии.

Чтобы определить приведенный момент инерции J , запишем выражения для кинетической энергии элементов в реальной и расчетной схемах и приравняем их друг другу:

$$J\omega^2/2 = \frac{J_d\omega^2}{2} + \frac{J_1\omega^2}{2} + \frac{J_2\omega_6^2}{2} + \frac{mv_{и.о}^2}{2}, \quad (1.15)$$

где J_1 — суммарный момент инерции элементов, вращающихся со скоростью ω (кроме двигателя); J_2 — момент инерции элемента (барабана), вращающегося со скоростью ω_6 .

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

Умножив обе части выражения (1.15) на $2/\omega_2$, получим:

$$J = J_d + J_1 + J_2 (\omega_6/\omega)^2 + m(v_{н.о}/\omega)^2. \quad (1.16)$$

Отметим, что в формуле (1.10) $\omega/\omega_6 = z_2/z_1 = i$, где z_2, z_1 — число зубьев шестерен 4 и 10 соответственно, является передаточным отношением редуктора, а отношение $v_{н.о}/\omega = \rho = \omega_6 R_6/\omega = R_6/i$ представляет собой так называемый радиус приведения кинематической схемы между исполнительным органом (крюком) и валом двигателя. С учетом этого окончательно получаем:

$$J \approx J_d + J_1 + J_2/i^2 + m\rho^2.$$

Определим приведенный момент сопротивления M_c . При подъеме груза к исполнительному органу должна быть подведена от электропривода механическая мощность

$$P_{н.о} = F_{н.о} v_{н.о} = mg v_{н.о},$$

где $F_{н.о}$ — усилие, развиваемое исполнительным органом; g — ускорение свободного падения.

КИНЕМАТИЧЕСКИЕ И РАСЧЕТНЫЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИВЕДЕННЫХ МОМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИНЕРЦИИ

Учитывая с помощью КПД потери мощности в кинематической цепи, запишем баланс мощности нагрузки электропривода в реальной и расчетной схемах:

$$M_c \omega = mgv_{н.о} / \eta, \quad (1.17)$$

где η — результирующий КПД кинематической схемы электропривода (в рассматриваемом примере $\eta = \eta_p \eta_6$, где η_p , η_6 — КПД соответственно редуктора и барабана).

Разделив обе части выражения (1.17) на ω , получим:

$$M_c = \frac{mgv_{н.о}}{\eta \omega} = \frac{F_{н.о} \rho}{\eta}.$$

Если исполнительный орган совершает не поступательное, а вращательное движение, то

$$M_c \omega = M_{н.о} \omega_{н.о} / \eta,$$

где $M_{н.о}$, $\omega_{н.о}$ — соответственно момент нагрузки и скорость исполнительного органа, а приведенный момент нагрузки

$$M_c = M_{н.о} / (\eta i).$$

Приведенный момент нагрузки называют также *статическим моментом* или *моментом сопротивления*.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАЗБЕГА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Неустановившееся движение электропривода имеет место, когда моменты двигателя и нагрузки отличаются друг от друга, т.е. $M \neq M_c$. В этом случае динамический момент не равен нулю и происходит увеличение или снижение скорости движения.

При рассмотрении неустановившегося движения можно вывести зависимости момента, скорости и угла поворота вала двигателя от времени. Эти зависимости получаются решением основного уравнения электропривода (1.14), а также дифференциального уравнения $\omega = d\varphi/dt$, связывающего угол поворота φ вала двигателя и его угловую скорость ω .

Если динамический момент постоянен и положителен, то решение уравнения (1.14) имеет следующий вид:

$$\omega = \frac{M - M_c}{J} t + C. \quad (1.18)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РАЗБЕГА И ТОРМОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Постоянная интегрирования C находится из начальных условий переходного процесса: $\omega = \omega_{\text{нач}}$ при $t = 0$. Подставляя это условие в уравнение (1.18), находим: $C = \omega_{\text{нач}}$. При этом уравнение (1.18) принимает вид

$$\omega = \frac{M - M_c}{J} t + \omega_{\text{нач}}.$$

Полученная формула показывает, что в рассматриваемом случае скорость $\omega(t)$ линейно зависит от времени: при $M - M_c > 0$ она увеличивается, а при $M - M_c < 0$ — снижается. Момент двигателя от времени не зависит.

Время переходного процесса $t_{\text{п.п}}$, за которое скорость изменится от некоторого начального уровня $\omega_{\text{нач}}$, определяется по формуле

$$t_{\text{п.п}} = J(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}})/(M - M_c).$$

Задача 2.20*. Оценить приближенно время пуска асинхронного двигателя, механическая характеристика которого представлена на рис. 2.14.

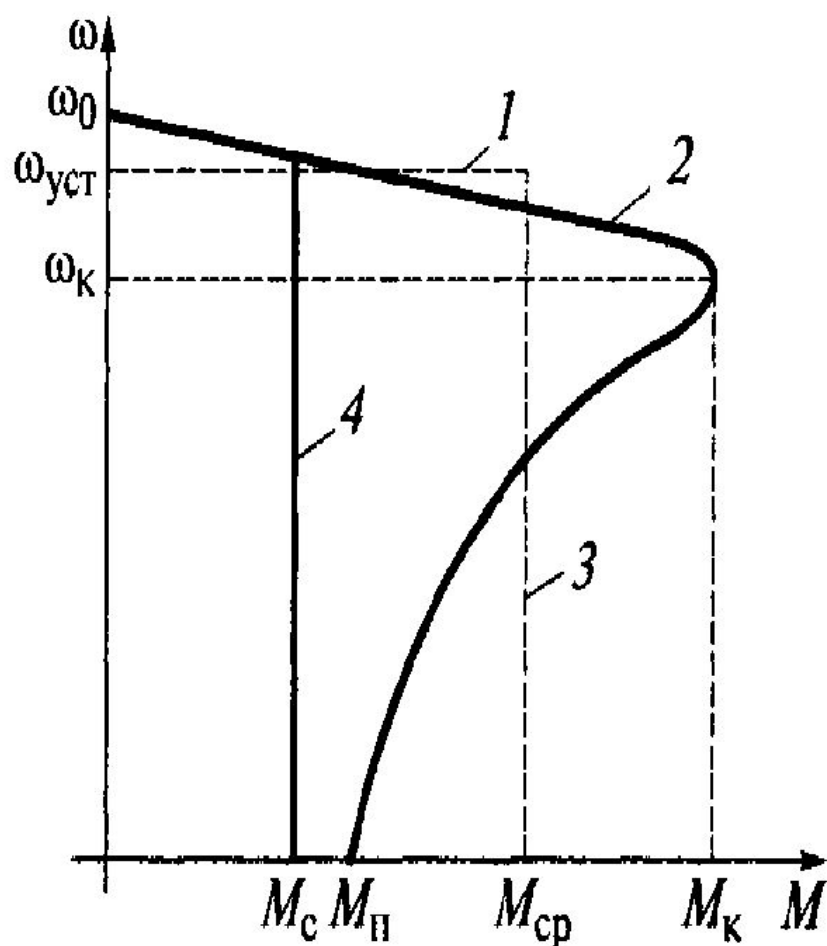


Рис. 2.14. Механические характеристики к задаче 2.20:

1, 3 — горизонтальный и вертикальный участки идеализированной характеристики двигателя; 2 — реальная характеристика двигателя; 4 — характеристика исполнительного органа

Задача 2.20*. Оценить приближенно время пуска асинхронного двигателя, механическая характеристика которого представлена на рис. 2.14.

Исходные данные: $\omega_{уст} = 150$ рад/с; $J = 0,1$ кг·м²; $M_k = 220$ Н·м; $M_n = 180$ Н·м; $M_c = 100$ Н·м.

Поскольку условием допускается приближенное решение, выполним аппроксимацию механической характеристики 2 асинхронного двигателя двумя прямыми: горизонтальной 1, проходящей через точку $\omega_{уст} = 150$ рад/с, и вертикальной 3, проходящей через точку $M_{ср} = (M_n + M_k)/2 = (180 + 220)/2 = 200$ Н·м.

Для полученной расчетной характеристики двигателя теперь можно применить формулу (2.26), поскольку динамический момент при пуске будет постоянным. Тогда время пуска $t_{пуск} = t_{п.п} = J(\omega_{уст} - 0)/(M_{ср} - M_c) = 0,1 \cdot 150/(200 - 100) = 0,15$ с.

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

1.6.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Электромагнитный момент M асинхронного двигателя пропорционален основному магнитному потоку Φ и активной составляющей тока ротора $I_2 \cos \varphi_2$:

$$M = k\Phi I_2 \cos \varphi_2,$$

где k — конструктивный коэффициент; Φ — магнитный поток; I_2 — сила тока ротора.

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

Конструктивный коэффициент k определяется числом фаз, полюсов и витков в обмотках статора и ротора. Основной магнитный поток Φ определяется напряжением питания и практически не зависит от скольжения s . Сила тока ротора I_2 с увеличением скольжения s растет, так как увеличивается частота пересечения проводников ротора магнитным полем статора, а значит, и наводимая в роторе ЭДС:

$$I_2 = \frac{E_{2\text{неп}}}{\sqrt{X_{2\text{неп}}^2 + (R_2/s)^2}},$$

где $E_{2\text{неп}}$, $X_{2\text{неп}}$, R_2 — соответственно фазная ЭДС, индуктивное сопротивление и активное сопротивление неподвижного ротора.

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

Угол сдвига по фазе (φ_2) между ЭДС и током ротора с увеличением s также растет из-за увеличения частоты тока в роторе и индуктивного сопротивления обмоток:

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2\text{неп}})^2}}.$$

Зависимость электромагнитного момента АД от скольжения представлена на рис. 1.37. Критическое скольжение $s_{\text{кр}}$, соответствующее максимальному моменту $M_{\text{мах}}$, определяется выражением

$$s_{\text{кр}} \approx R_2 / X_{\text{экв}},$$

где $X_{\text{экв}}$ — эквивалентное индуктивное сопротивление, учитывающее индуктивность обмоток статора и ротора.

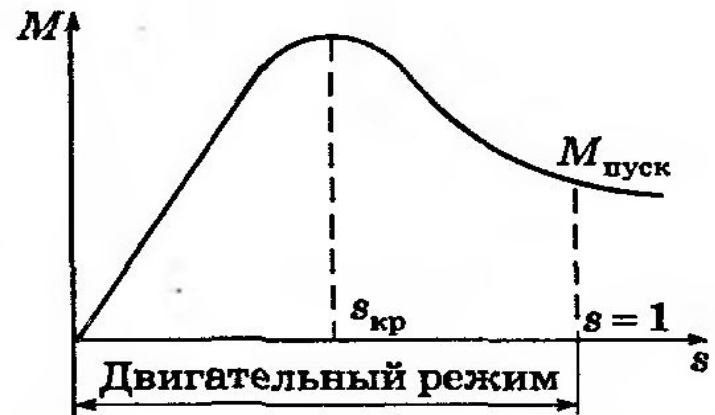


Рис 1.37. Зависимость электромагнитного момента АД от скольжения

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

У трехфазных электродвигателей с короткозамкнутым ротором R_2 невелико и $s_{кр} \approx 0,1$. Начальный пусковой момент $M_{пуск}$ соответствует скольжению $s = 1$.

Если ротор вращается в сторону, противоположную магнитному полю статора, электромагнитный момент M направлен против вращения ротора и является тормозным. При этом $s > 1$.

Потребляемая из сети энергия выделяется в обмотках в виде тепловой, и электродвигатель работает в режиме электромагнитного тормоза (торможение противовключением). При построении механических характеристик АД используется упрощенное уравнение, полученное при условии, что активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 0$:

$$M = \frac{2M_{кр}}{s/s_{кр} + s_{кр}/s},$$

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s},$$

где $M_{\text{кр}}$ — критический (или максимальный) момент, соответствующий критическому скольжению $s_{\text{кр}}$.

Формула (1.13) удобна для практических расчетов, но дает большие погрешности в зоне малых частот вращения. Если в этой формуле вместо текущих значений M и s подставить номинальные и обозначить $M_{\text{кр}}/M_{\text{ном}}$ через $\mu_{\text{кр}}$, то получим:

МЕХАНИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

$$s_{кр} = s_{ном}(\mu_{кр} + \sqrt{\mu_{кр}^2 - 1}) \approx 2\mu_{кр}s_{ном}.$$

Поскольку $n = n_0(1 - s)$, то (1.13) является формулой механической характеристики, и по ней можно строить графики механических характеристик по паспортным данным двигателя.

График механической характеристики трехфазного АД, построенный по уравнению (1.13), представлен на рис. 1.38.

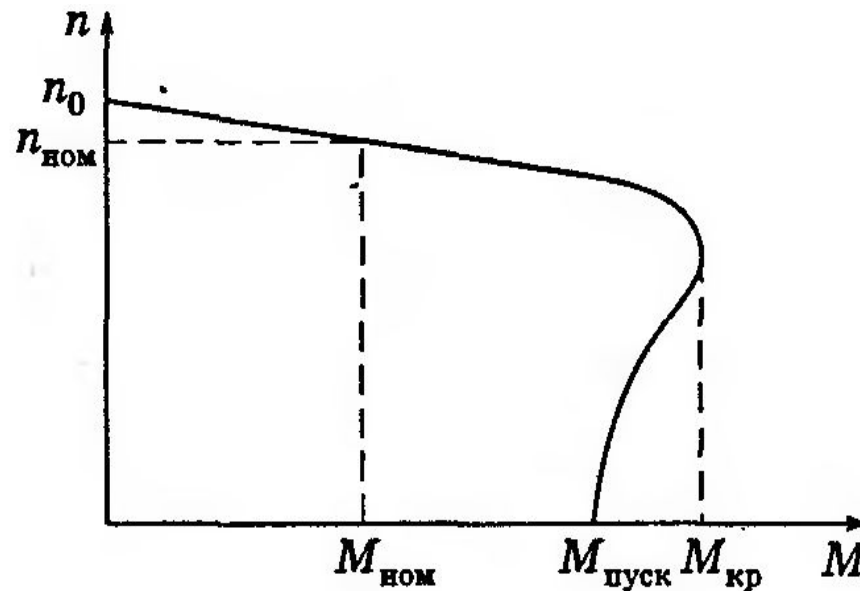


Рис 1.38. Механическая характеристика АД в двигательном режиме

Номинальный и пусковой ток АД

Номинальный ток электродвигателя определяется по формуле

$$I_{\text{ном}} = \frac{1000 P_{\text{ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{ном}} \cos \varphi_{\text{ном}} \eta_{\text{ном}}},$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность электродвигателя, кВт; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение сети, В; $\cos \varphi_{\text{ном}}$ — коэффициент мощности; $\eta_{\text{ном}}$ — номинальный КПД.

Рабочий ток электродвигателя возрастает при увеличении нагрузки на валу. В момент пуска действует пусковой ток

$$I_{\text{пуск}} = k_i I_{\text{ном}},$$

где k_i — кратность пускового тока (указывается в паспорте двигателя); для АД с короткозамкнутым ротором k_i находится в пределах 5...7.

Перегрузочная способность АД. Снижение пускового тока АД

Перегрузочная способность двигателя

$$\mu_{\max} = M_{\max} / M_{\text{ном}}.$$

Большой пусковой ток при пуске мощных электродвигателей приводит к снижению напряжения в сети, что вредно сказывается на работе других, ранее включенных, двигателей. При значительном снижении напряжения запуск двигателя может оказаться невозможным. Для уменьшения пусковых токов применяют пуск двигателя с переключением обмоток статора со звезды на треугольник. В момент пуска обмотки включены в звезду, а когда частота вращения двигателя достигает номинального значения, происходит переключение обмотки статора на треугольник (рис. 1.39). Этот способ снижения пускового тока применим, если электродвигатель предназначен для включения в сеть треугольником.

Снижение пусковых токов АД

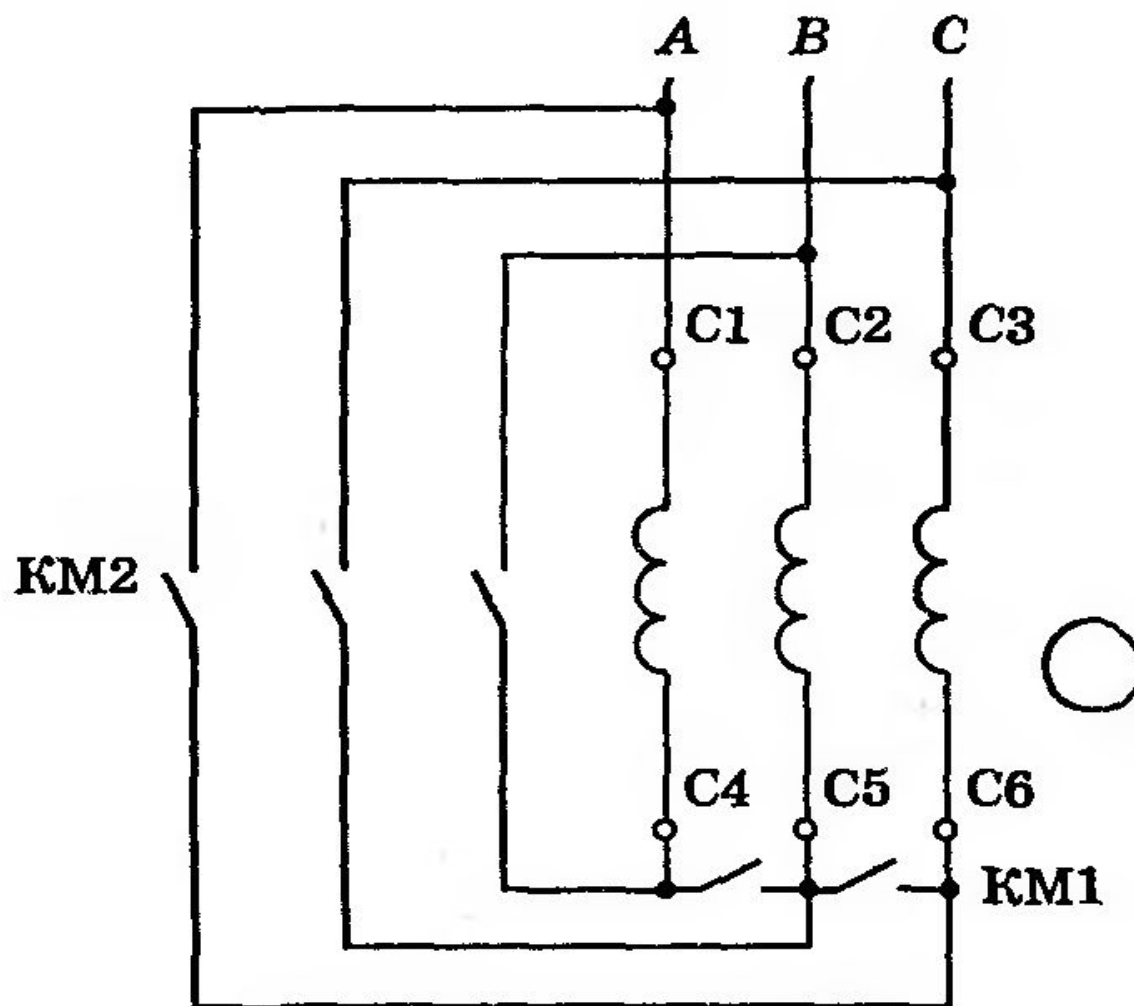


Рис. 1.39. Схема переключения обмоток статора АД со звезды на треугольник при пуске

ПУСК АД

При включении обмоток в звезду напряжение на каждой фазе уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а фазные токи — в три раза. Мощность электродвигателя при пуске также снижается в три раза, что является недостатком данного способа, поскольку электродвигатель может быть пущен при нагрузке не более $1/3$ от номинальной. Если для привода рабочей машины требуется электродвигатель мощностью более 10 кВт и она имеет большие маховые массы (пилорамы, дробилки кормов, мельницы), то рекомендуется применять трехфазные АД с фазным ротором.

ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ АД

Асинхронный двигатель может работать во всех возможных энергетических режимах, которые определяются величиной и знаком скольжения (рис. 1.40), а именно:

$s=0, \omega=\omega_0$ — режим идеального холостого хода;

$s=1, \omega=0$ — режим короткого замыкания;

$0 < s < 1, 0 < \omega < \omega_0$ — двигательный режим;

$s < 0, \omega > \omega_0$ — генераторный режим параллельно с сетью (рекуперативное торможение);

$s > 1, \omega < 0$ — генераторный режим последовательно с сетью (торможение противовключением).

ОСНОВНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ АД

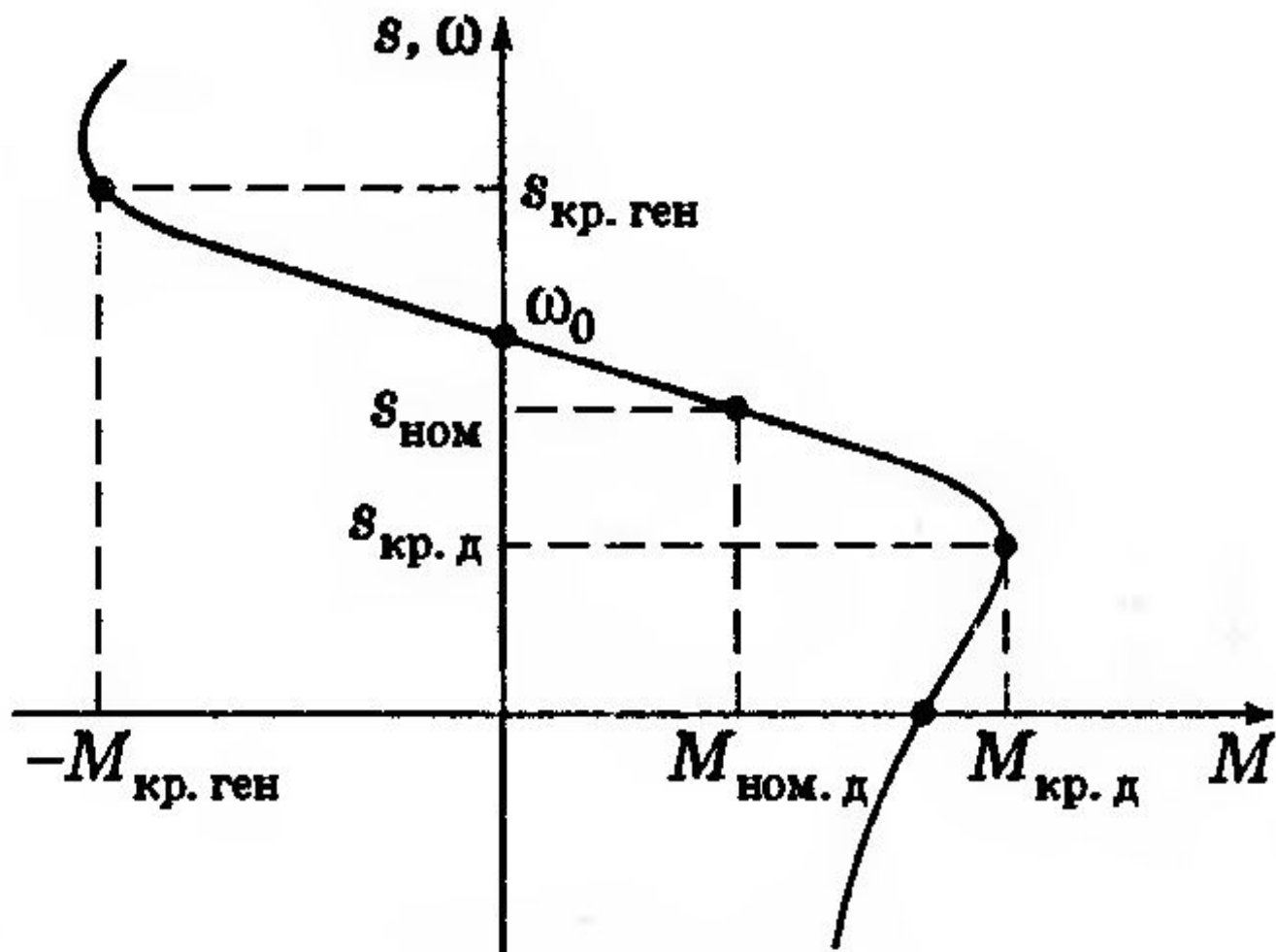


Рис. 1.40. Механическая характеристика АД

Тормозные режимы асинхронного электродвигателя

Как следует из п. 1.6.4, АД могут работать в тормозных режимах. *Рекуперативное торможение* (или генераторное торможение с отдачей энергии в сеть) может быть осуществлено при $n > n_0$. Это возможно при раскручивании вала двигателя приводимым механизмом (например, при опускании груза).

Торможение противовключением осуществляется в том случае, когда магнитное поле статора и ротор вращаются в противоположных направлениях. При этом создается тормозной момент. Для получения такого режима следует на ходу переключить две любые фазы обмотки статора. Ротор по инерции будет вращаться некоторое время в прежнем направлении, уменьшая частоту вращения, а затем остановится. Если в этот момент двигатель не отключить от сети, то произойдет реверс.

Реверс и быстрое торможение до полного останова АД средней и большой мощности осуществляются одновременным включением в цепь ротора дополнительных сопротивлений для ограничения токов. Асинхронный двигатель может быть введен в режим торможения противовключением нагрузкой, момент сопротивления которой больше пускового момента (момента короткого замыкания). В этом случае также необходимо вводить дополнительные сопротивления в цепь ротора или статора электродвигателя.

Динамическое торможение АД

Динамическое торможение осуществляется путем отключения статорной обмотки на ходу от сети переменного тока и присоединения ее к источнику постоянного тока. Постоянный ток, проходя по обмоткам статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле. При вращении ротора в его обмотках наводится ЭДС и возникает ток. Взаимодействие тока ротора и магнитного поля создает тормозной момент. Двигатель работает в режиме генератора независимо от сети переменного тока, преобразовывая механическую энергию движущихся частей электропривода и рабочей машины в электрическую, которая рассеивается в виде теплоты в обмотке ротора.

Динамическое торможение АД

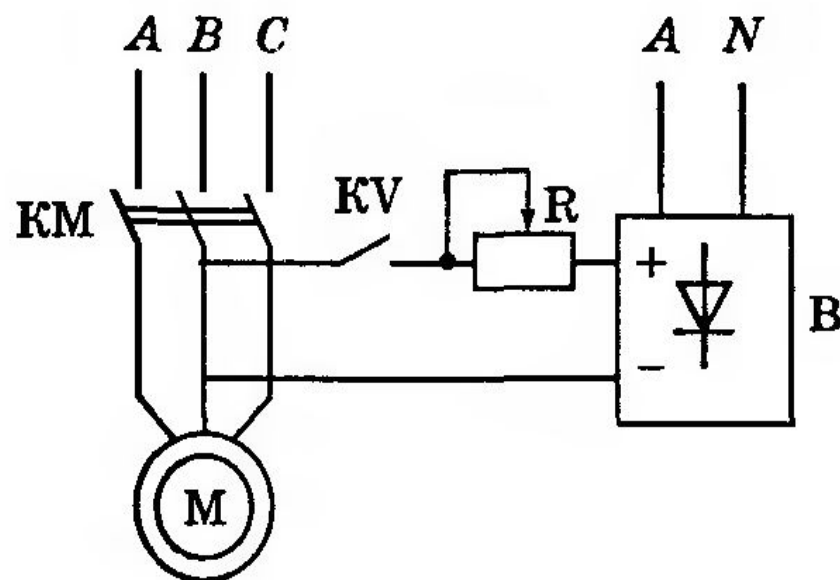


Рис. 1.41. Схема включения АД в режиме динамического торможения:
В — выпрямитель; R — токоограничивающий резистор

Схема включения АД в режиме динамического торможения приведена на рис. 1.41. Для получения режима динамического торможения контакты КМ должны быть разомкнуты, а контакты KV — замкнуты. Режим динамического торможения используют для плавной остановки двигателя.

Расчет и построение механической характеристики АД по паспортным данным

При построении механических характеристик АД используется упрощенное уравнение, полученное при условии, что активное сопротивление обмотки статора $R_1 = 0$:

$$M = \frac{2M_{\text{кр}}}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s}, \quad (1.13)$$

где $M_{\text{кр}}$ — критический (или максимальный) момент, соответствующий критическому скольжению $s_{\text{кр}}$.

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}}(\mu_{\text{кр}} + \sqrt{\mu_{\text{кр}}^2 - 1}) \approx 2\mu_{\text{кр}}s_{\text{ном}}.$$

$$s = (n_0 - n)/n_0,$$

где $n_0 = 60f/p$ — частота вращения магнитного поля статора, мин^{-1} ; f — частота напряжения питания, Гц; p — число пар полюсов статора.

Расчет и построение механической характеристики АД по паспортным данным

Поскольку $n = n_0 (1 - s)$, то (1.13) является формулой механической характеристики, и по ней можно строить графики механических характеристик по паспортным данным двигателя.

График механической характеристики трехфазного АД, построенный по уравнению (1.13), представлен на рис. 1.38.

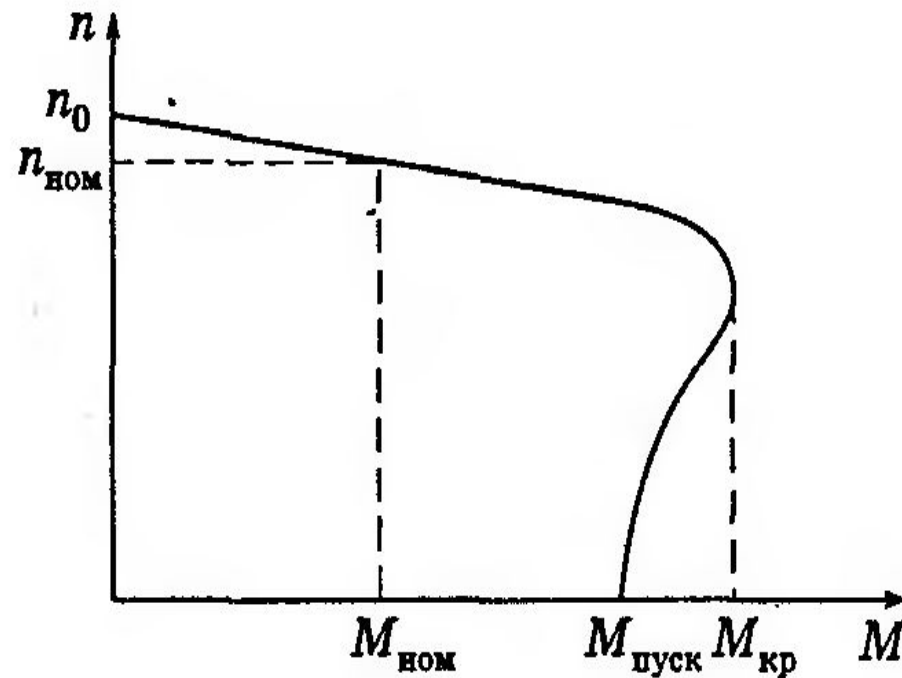


Рис 1.38. Механическая характеристика АД в двигательном режиме

Расчет и построение механической характеристики АД по паспортным данным

Перегрузочная способность двигателя

$$\mu_{\max} = M_{\max} / M_{\text{ном}}$$

График механической характеристики трехфазного АД, построенный по уравнению (1.13), представлен на рис. 1.38.

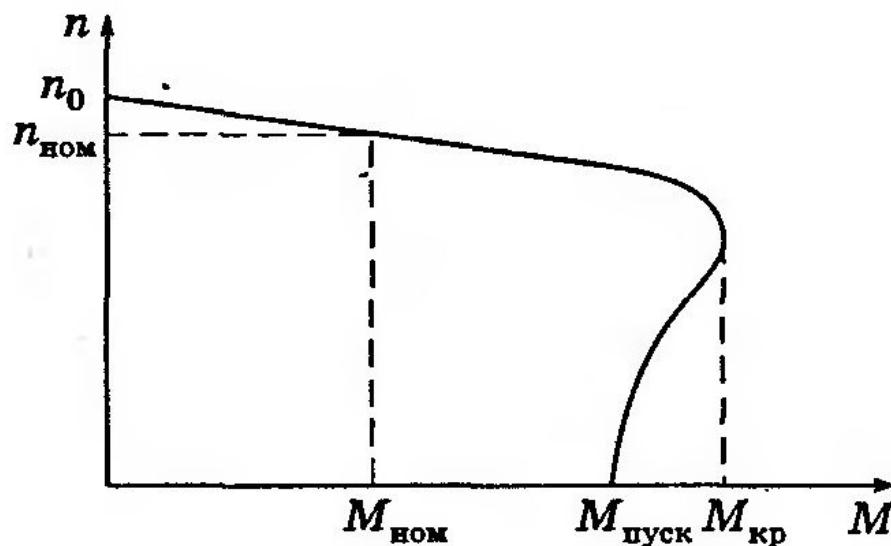


Рис 1.38. Механическая характеристика АД в двигательном режиме

ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

Двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А160S имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}} = 15$ кВт; $n_{\text{ном}} = 1465$ об/мин; $I_{\text{лном}} = 29,3$ А; $\lambda_{\text{м}} = M_{\text{к}}/M_{\text{ном}} = 2,3$; $\lambda_{\text{л}} = I_{\text{лп}}/I_{\text{лном}} = 7$, $p = 2$, $f_{\text{лном}} = 50$ Гц; $U_{\text{лном}} = 380$ В.

Рассчитать естественную механическую характеристику двигателя.

1. Определяем номинальную угловую скорость

$$\omega_{\text{ном}} = 2\pi n_{\text{ном}}/60 = 2 \cdot 3,14 \cdot 1465/60 = 153 \text{ рад/с.}$$

2. Определяем скорость идеального холостого хода, номинальные момент и скольжение:

$$\omega_0 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/2 = 157 \text{ рад/с;}$$

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}/\omega_{\text{ном}} = 15\,000/153 = 98 \text{ Н} \cdot \text{м;}$$

$$s_{\text{ном}} = (\omega_0 - \omega_{\text{ном}})/\omega_0 = (157 - 153)/157 = 0,025.$$

Полученных данных достаточно для приближенного построения рабочего участка механической характеристики двигателя по двум точкам: номинальной $(\omega_{\text{ном}}, M_{\text{ном}})$ и холостого хода $(\omega_0, 0)$.

ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

3. Для получения полной механической характеристики продолжаем расчет. Определяем критический момент двигателя для двигательного режима работы

$$M_k = \lambda_m M_{\text{ном}} = 2,3 \cdot 98 = 225 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. По формуле (5.15) находим критическое скольжение двигателя, принимая в ней знак «+» перед корнем,

$$s_k = s_{\text{ном}} \left(\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1} \right) = 0,025 \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,11.$$

Подставляем найденные значения M_k и s_k в упрощенную формулу (5.12) и получаем

$$M = 2 M_k / (s/s_k + s_k/s) = 2 \cdot 225 / (s/0,11 + 0,11/s).$$

ПРИМЕР РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ АД

5. Задаваясь рядом значений s от 1 до 0 (двигательный режим работы), определяем по этой формуле соответствующие значения момента:

s	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0,11	0
ω , рад/с	0	31,4	62,8	94,2	126	151	157
M , Н · м	48,9	60,7	79,8	115	190	225	0

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ

Электромеханическая характеристика $I'_2(s)$. Эта характеристика описывается выражением, получаемым непосредственно из рассмотрения схемы на рис. 5.2:

$$I'_2 = U_{\Phi} / \sqrt{(R_1 + R'_2/s)^2 + x_k^2}, \quad (5.3)$$

где x_k — индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания, $x_k = x_1 + x'_2$.

В отличие от двигателей постоянного тока электромеханическая характеристика асинхронного двигателя представляется в виде зависимости тока ротора от скольжения, а не скорости. В этом случае аналитическое выражение для характеристики имеет компактную форму записи и удобно для анализа и вычислений. Переход к зависимости вида $\omega(I'_2)$ осуществляется с помощью формулы для скольжения

$$\omega = \omega_0(1 - s). \quad (5.4)$$

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД ПО ПАСПОРТНЫМ ДАННЫМ

Для графического изображения электромеханической характеристики двигателя проанализируем характерные точки этой зависимости и ее асимптоты, придавая скольжению s и скорости ω значения в пределах $\pm\infty$:

$$s = 0, \omega =$$

кода;

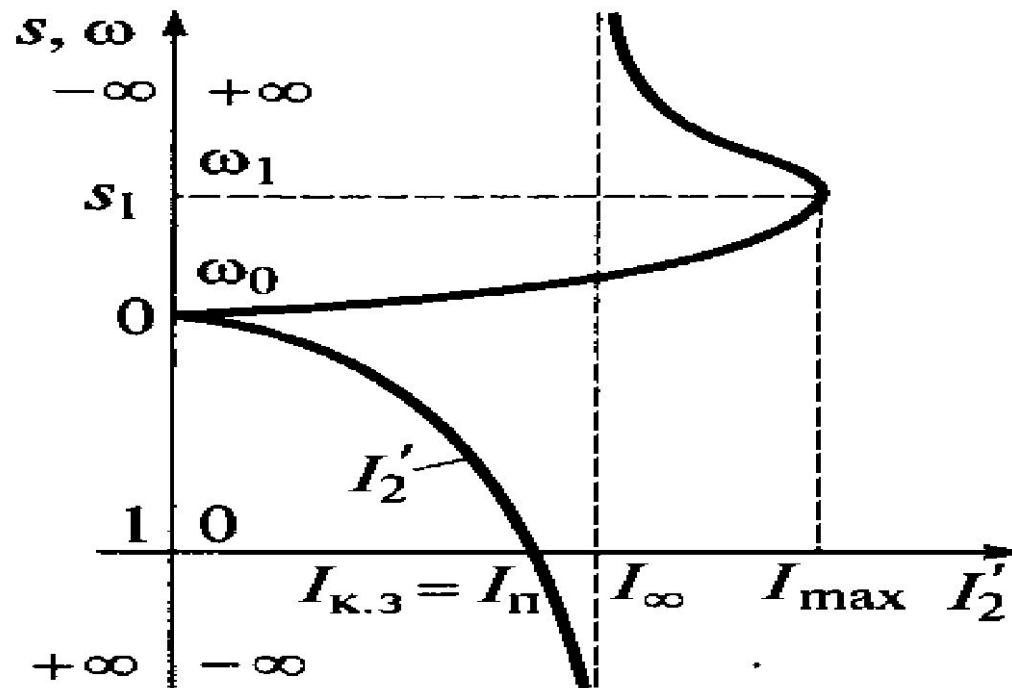


Рис. 5.3. Электромеханическая характеристика асинхронного двигателя

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АД

$s = 1, \omega = 0, I'_2 = I_{к.з} = U_\phi / \sqrt{(R_1 + R'_2)^2 + x_k^2}$ — точка короткого замыкания;

$s_1 = -R'_2/R_1, \omega_1 = \omega_0(1 + s_1), I'_2 = I_{\max} = U_\phi/x_k$ — точка максимального значения тока ротора, лежащего в области отрицательных скольжений;

$s \rightarrow \pm\infty, \omega \rightarrow \mp\infty, I'_2 \rightarrow I_\infty = U_\phi / \sqrt{R_1^2 + x_k^2}$ — асимптотическое значение тока ротора при бесконечно большом увеличении скольжения и скорости.

На рис. 5.3 показана электромеханическая характеристика двигателя, при этом по вертикальной оси указаны соответствующие друг другу скорость и скольжения двигателя, связанные соотношением (5.4).

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД

Задача 5.1*. Двигатель типа МТН—312-6 имеет следующие исходные данные: $P_{\text{ном}} = 17,5$ кВт; $n_{\text{ном}} = 945$ об/мин; $U_{\text{ном}} = 380$ В; $f_1 = 50$ Гц; $I_{1\text{ном}} = 43$ А; $R_c = 0,34$ Ом; $x_1 = 0,43$ Ом; $R_p = 0,12$ Ом; $x_2 = 0,25$ Ом; $k = 2,66$; $\lambda_m = M_k/M_{\text{ном}} = 2,5$.

Рассчитать и построить естественные электромеханическую и механическую характеристики двигателя.

1. Определяем скорость идеального холостого хода

$$\omega_0 = 2\pi f_1/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/3 = 104,8 \text{ рад/с.}$$

2. Рассчитываем приведенные значения сопротивлений обмотки ротора и индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$x'_2 = x_2 k^2 = 0,25 \cdot 7,08 = 1,8 \text{ Ом; } R'_p = R_p k^2 = 0,12 \cdot 7,08 = 0,89 \text{ Ом;}$$

$$x_k = x_1 + x'_2 = 0,43 + 1,8 = 2,23 \text{ Ом.}$$

3. Определяем координаты характерных точек характеристики $I'_2(s)$:

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД

$$\begin{aligned} I_{\text{к.з}} = I_{\text{пуск}} &= U_{\text{лф}} / \sqrt{(R_{\text{с}} + R'_{\text{р}})^2 + x_{\text{к}}^2} = \\ &= 220 / \sqrt{(0,34 + 0,89)^2 + 2,23^2} = 87,1 \text{ А}; \end{aligned}$$

$$s_1 = -R'_{\text{р}} / R_{\text{с}} = -0,89 / 0,34 = -2,6; I_{\text{max}} = U_{\text{лф}} / x_{\text{к}} = 220 / 2,23 = 99,5 \text{ А};$$

$$I_{\infty} = U_{\text{лф}} / \sqrt{R_{\text{с}}^2 + x_{\text{к}}^2} = 220 / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 98,4 \text{ А}.$$

4. Для расчета электромеханической характеристики $I'_2(s)$ используем формулу (5.3), подставляя в нее найденные значения параметров:

$$I'_2 = U_{\text{лф}} / \sqrt{(R_{\text{с}} + R'_{\text{р}}/s)^2 + x_{\text{к}}^2} = 220 / \sqrt{(0,34 + 0,89/s)^2 + 2,23^2}.$$

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД

5. Рассчитываем механическую характеристику по формуле (5.11), определяя вначале координаты точек номинального режима и критического момента:

$$\omega_{\text{НОМ}} = \pi n_{\text{НОМ}} / 30 = 3,14 \cdot 945 / 30 = 99 \text{ рад/с};$$

$$s_{\text{НОМ}} = (\omega_0 - \omega_{\text{НОМ}}) / \omega_0 = (104,8 - 99) / 104,8 = 0,07;$$

$$M_{\text{НОМ}} = P_{\text{НОМ}} / \omega_{\text{НОМ}} = 17\,500 / 99 = 177 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{К}} = \lambda_{\text{М}} M_{\text{НОМ}} = 2,5 \cdot 177 = 442 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_{\text{К}} = R'_p / \sqrt{R_c^2 + x_{\text{К}}^2} = 0,89 / \sqrt{0,34^2 + 2,23^2} = 0,4;$$

$$a = R_c / R'_p = 0,34 / 0,89 = 0,34.$$

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД

6. Расчетная формула принимает вид

$$M = 2M_k(1 + as_k)/(s/s_k + s_k/s + 2as_k) = 1018/(s/0,4 + 0,4/s + 0,3).$$

7. Задаваясь скольжением s , рассчитываем значения тока и момента:

s	-3	-2,6	-0,5	0	0,07	0,4	1	1,5
ω , рад/с	419,2	337	157,2	104,8	99	62,9	0	-52,4
I'_2 , А	99,4	99,5	83,4	0	16,6	64,7	87,1	91,8
M , Н·м	-120	-160	-582	0	177	442	316	234

Используя полученные данные, построим естественные электро-механическую 1 (рис. 5.5, а) и механическую 2 (рис. 5.5, б) характеристики.

ПРИМЕР ПОСТРОЕНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИК АД

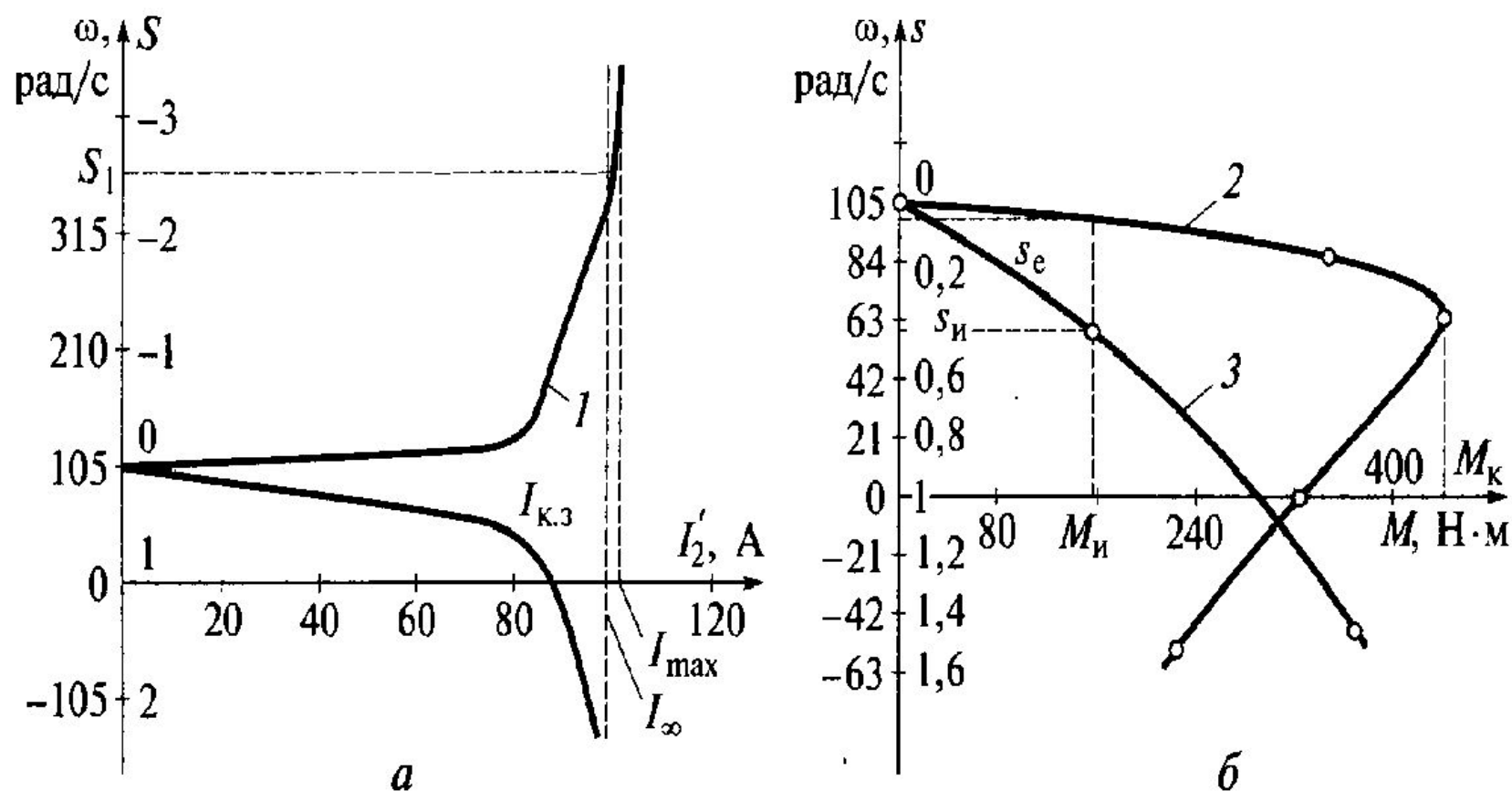


Рис. 5.5. Расчетные электромеханическая (а) и механические (б) характеристики двигателя:

1 — электромеханическая; 2 — естественная механическая; 3 — реостатная механическая

ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА.

1.8.1. Потери мощности

Потери мощности в электроприводе происходят за счет потерь в электродвигателе, передаточном механизме, преобразовательном устройстве, регулировочных резисторах. Потери мощности в электродвигателе при номинальном режиме определяют по формуле

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}}(1 - \eta_{\text{ном}})/\eta_{\text{ном}},$$

где $P_{\text{ном}}$, $\eta_{\text{ном}}$ — номинальные мощность и КПД двигателя.

В справочниках приводятся также графики и таблицы, пользуясь которыми, можно узнать КПД при любой нагрузке и определить соответствующие потери мощности по формуле

$$\Delta P_1 = P_1(1 - \eta_1)/\eta_1,$$

где P_1 , η_1 — соответственно фактическая мощность нагрузки и КПД при этой нагрузке.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Если сведений о КПД при различных нагрузках нет, то потери мощности в двигателе определяют по формуле

$$\Delta P_1 = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{м}},$$

где $\Delta P_{\text{ст}}$ — постоянные потери, к которым относят потери в стали, механические, вентиляционные; $\Delta P_{\text{м}}$ — переменные потери, которые определяются потерями в обмотках двигателя при прохождении по ним тока.

Постоянные потери мощности

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{м.ном}},$$

где $\Delta P_{\text{м.ном}}$ — потери в обмотках при номинальном токе. Для двигателей постоянного тока $\Delta P_{\text{м.ном}} = I_{\text{ном}}^2 R_{\text{я}}$, для асинхронных двигателей $\Delta P_{\text{м.ном}} = 2M_{\text{ном}}\omega_0 s_{\text{ном}}$.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

В регулируемом электроприводе мощность дополнительно теряется в преобразовательных устройствах и регулировочных резисторах. Потери в преобразователях вычисляют с помощью их КПД так же, как потери в двигателях.

Потери механические, в стали, вентиляционные, относящиеся к постоянным, уменьшаются пропорционально снижению скорости.

Потери в передаточных устройствах в номинальном режиме определяются по формуле

$$\Delta P_{п.ном} = P_{ном}(1 - \eta_{п.ном}),$$

где $P_{ном}$, $\eta_{п.ном}$ — номинальные мощность и КПД передаточного устройства.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Когда передаточное устройство состоит из нескольких звеньев с номинальными КПД соответственно $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_n$, то общий КПД передачи $\eta_{п.ном} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \dots \eta_n$.

КПД передаточного устройства зависит от нагрузки, поэтому при любой нагрузке потери

$$\Delta P_{п} = P(1 - \eta_{п}),$$

где $P_{п}$, $\eta_{п}$ — соответственно мощность, подводимая к передаточному устройству, и его КПД при этой нагрузке.

Потери холостого хода передач составляют $(0,3 \dots 0,5) \Delta P_{п.ном}$.

В приближенных расчетах при коэффициенте загрузки более 0,25 КПД двигателей и передач принимают номинальными.

Общие потери мощности в электроприводе равны сумме потерь в электродвигателе, передачах, преобразовательном устройстве, резисторах.

Зная потери мощности, можно вычислить потери энергии.

ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭП

Электродвигатели, подключаемые к сети переменного тока, потребляют из нее активную P_a и реактивную Q мощности. Активная мощность обеспечивает выполнение электроприводом полезной работы, часть ее затрачивается на потери в электроприводе, а реактивная создает магнитное поле двигателя. Работа электродвигателя, трансформатора, любого потребителя активной и реактивной энергии характеризуется коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = P_a / S = P_a / \sqrt{P_a^2 + Q^2},$$

где — S полная потребляемая мощность. Угол φ определяет сдвиг фаз напряжения сети и тока электродвигателя: если потребляется реактивная мощность, то угол φ и $\cos \varphi$ не равны нулю; если реактивная мощность не потребляется, то $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭП

Активная мощность трехфазного двигателя

$$P_a = \sqrt{3} UI_a = \sqrt{3} UI \cos \varphi.$$

Следовательно, полный ток

$$I = \frac{P_a}{\sqrt{3} U \cos \varphi}.$$

Таким образом, увеличение реактивной мощности Q или уменьшение активной мощности P_a при неизменной реактивной приводит к уменьшению $\cos \varphi$; при одной и той же передаваемой мощности полный ток увеличивается. Электродвигатель, потребляя реактивную мощность, дополнительно нагружает систему электроснабжения, вызывая потери мощности на ее элементах. Это приводит к увеличению площади сечения проводов и мощности трансформаторов.

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭП

Коэффициент мощности АД существенно зависит от его нагрузки. При холостом ходе относительно велика доля реактивной мощности по сравнению с активной и коэффициент мощности низкий. Максимального значения $\cos\varphi$ достигает при номинальной нагрузке АД.

Повышение коэффициента мощности электроприводов и других потребителей реактивной энергии является важной технико-экономической задачей, для решения которой рекомендуется:

- увеличение загрузки АД;
- переключение недогруженных электродвигателей с треугольника на звезду;
- ограничение времени работы АД и сварочных трансформаторов на холостом ходу;
- применение технических средств компенсации реактивной мощности.

КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ЭП

Наиболее эффективным способом снижения потребляемой из сети реактивной мощности является применение конденсаторных установок. Их использование позволяет снизить нагрузку линий электропередачи, трансформаторов, распределительных устройств; снизить расходы на оплату электроэнергии; подавить сетевые помехи, уменьшить несимметрию фаз; повысить надежность распределительных сетей. На практике коэффициент мощности после компенсации мощности находится в пределах 0,93...0,99.

Применяется групповая и централизованная компенсация реактивной мощности. *Групповая компенсация* используется для случая, когда рядом расположены и одновременно включаются несколько индуктивных нагрузок, подключенных к одному распределительному устройству. При этом устанавливается одна конденсаторная батарея. *Централизованная компенсация* применяется для потребителей с изменяющейся реактивной нагрузкой. В этом случае конденсаторная установка оснащается специализированным контроллером, который при отклонении коэффициента мощности подключает или отключает батареи конденсаторов, автоматически поддерживая $\cos\varphi$.

При выборе конденсаторной установки требуемая мощность конденсаторов может определяться следующим образом:

$$Q_c = P_a(\operatorname{tg}\varphi_1 - \operatorname{tg}\varphi_2),$$

где $\operatorname{tg}\varphi_1$, $\operatorname{tg}\varphi_2$ — коэффициенты мощности потребителя соответственно до применения компенсирующих устройств и после их установки.

Коэффициент мощности в электроустановке можно определить по показаниям счетчиков активной и реактивной энергии:

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{(W_a/W_p)^2 + 1}},$$

где W_a — показания счетчика активной энергии, кВт · ч; W_p — показания счетчика реактивной энергии, квар · ч.

Срок окупаемости конденсаторных установок можно оценить следующим образом:

$$T = Z_1 / (Z_2 - Z_3),$$

где Z_1 — стоимость конденсаторной установки; Z_2 — затраты на электроэнергию до компенсации; Z_3 — затраты на электроэнергию в результате применения конденсаторных установок.

ЭНЕРГЕТИКА ЭЛЕКТРОПРИВОДА. ПУТИ ЭКОНОМИИ ЭНЕРГИИ В ЭП

Экономия электрической энергии — важнейшая задача. Электроприводы потребляют более половины всей вырабатываемой электроэнергии, поэтому каждый процент экономии в этих установках составляет миллиарды киловатт-часов.

На основании анализа причин потерь мощности в электроприводах определены следующие пути экономии электрической энергии:

- правильная эксплуатация производственных механизмов, своевременная смазка, регулировка, заточка режущих органов и т.д.;
- полная загрузка машин и механизмов;
- исключение или ограничение холостого хода производственных механизмов;
- выбор современных электродвигателей, имеющих большие КПД и $\cos\varphi$;
- использование генераторных тормозных режимов электродвигателей с отдачей энергии в сети;
- контроль качества напряжения на предприятии;
- повышение коэффициента мощности электроприводов и трансформаторов;
- применение регулируемого электропривода в энергоемких производственных процессах.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

1.6.6. Регулирование скорости асинхронного двигателя

Наиболее распространены следующие способы регулирования скорости АД: изменение дополнительного сопротивления цепи ротора, изменение напряжения, подводимого к обмотке статора, изменение частоты питающего напряжения, а также переключение числа пар полюсов.

Введение резисторов в цепь ротора Приводит к увеличению потерь мощности и снижению частоты вращения ротора за счет увеличения скольжения, поскольку $n = n_0 (1 - s)$. Из рис. 1.42 следует, что при увеличении сопротивления в цепи ротора при том же моменте частота вращения вала двигателя уменьшается. Жесткость механических характеристик значительно снижается с уменьшением частоты вращения, что ограничивает диапазон регулирования до $(2...3) : 1$. Недостатком этого способа являются значительные потери энергии, которые пропорциональны скольжению. Такое регулирование возможно только для двигателя с фазным ротором.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

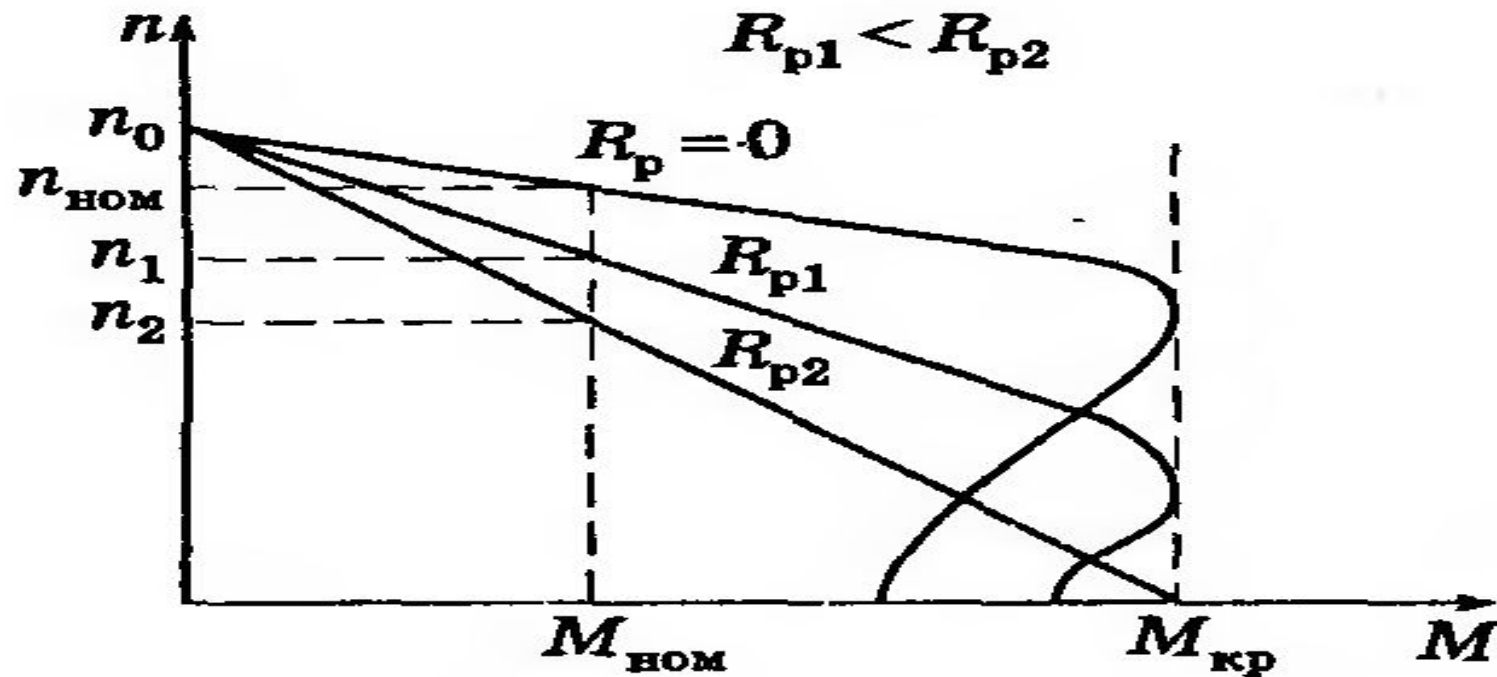


Рис. 1.42. Механические характеристики АД с фазным ротором при различных сопротивлениях резисторов, включенных в цепь ротора

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

Изменение напряжения, подводимого к обмотке статора АД, позволяет регулировать скорость с помощью относительно простых технических средств и схем управления. Для этого между сетью переменного тока со стандартным напряжением $U_{1\text{ном}}$ и статором электродвигателя включается регулятор напряжения (рис. 1.43).

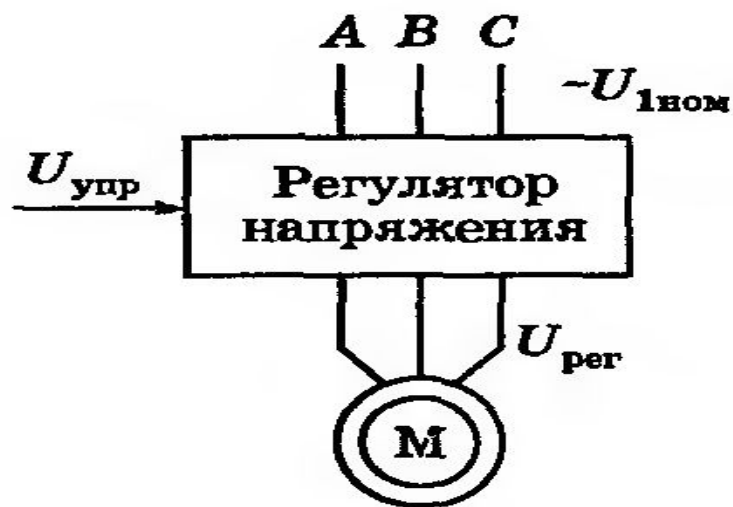


Рис. 1.43. Схема регулирования скорости АД путем изменения напряжения на статоре

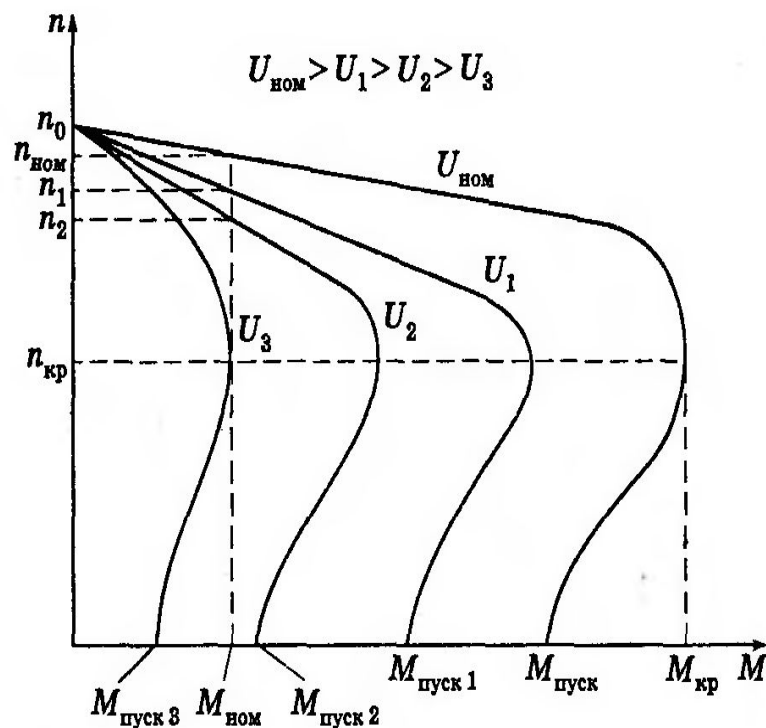


Рис. 1.44. Механические характеристики АД при изменении напряжения, подводимого к обмотке статора

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

При регулировании частоты вращения АД изменением напряжения, подводимого к обмотке статора, критический момент $M_{кр}$ АД изменяется пропорционально квадрату подводимого к двигателю напряжения $U_{рег}$ (рис. 1.44), а скольжение от $U_{рег}$ не зависит.

Если момент сопротивления рабочей машины больше пускового момента электродвигателя ($M_c > M_{пуск}$), то двигатель не будет вращаться, поэтому необходимо запустить его при номинальном напряжении $U_{ном}$ или на холостом ходу. Регулировать частоту вращения короткозамкнутых АД таким способом можно только при вентиляторном характере нагрузки. Кроме того, должны использоваться специальные электродвигатели с повышенным скольжением. Диапазон регулирования небольшой, до $n_{кр}$.

Для изменения напряжения применяют трехфазные автотрансформаторы и тиристорные регуляторы напряжения.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

Так как частота вращения магнитного поля статора $n_0 = 60f/p$, то регулирование частоты вращения АД можно производить *изменением частоты питающего напряжения f_c* . Для эффективного использования электродвигателя при частотном регулировании необходимо, чтобы с изменением частоты одновременно изменялось напряжение.

Схема частотного электропривода приведена на рис. 1.45, а механические характеристики АД при частотном регулировании — на рис. 1.46.

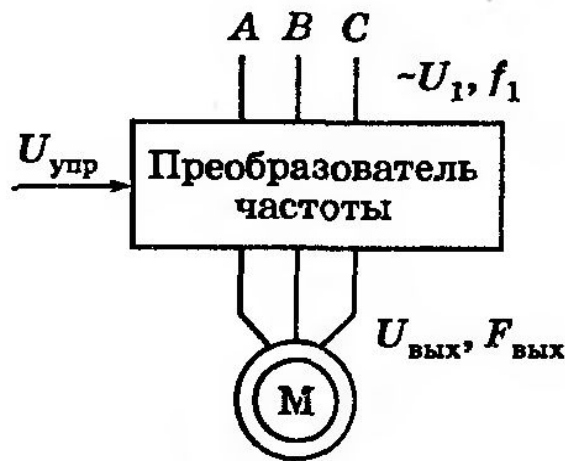


Рис. 1.45. Схема частотного электропривода

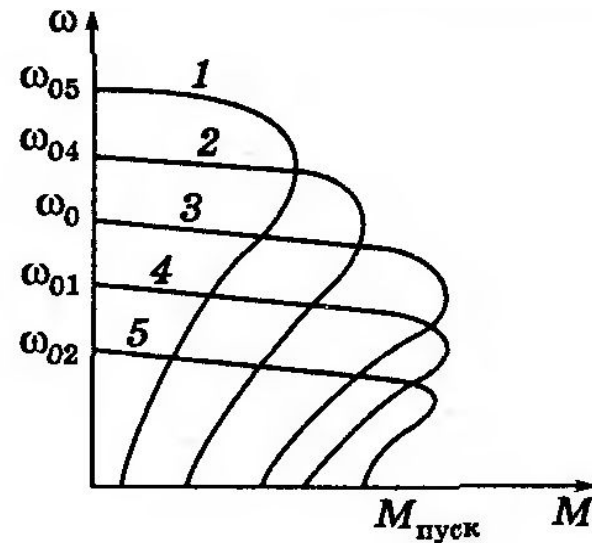


Рис. 1.46. Механические характеристики АД при частотном регулировании

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

С уменьшением частоты f критический момент несколько уменьшается в области малых частот вращения. Это объясняется возрастанием влияния активного сопротивления обмотки статора при одновременном снижении частоты и напряжения. Частотное регулирование позволяет изменять частоту вращения в диапазоне $(20...30) : 1$. Частотный способ является наиболее перспективным для регулирования АД с короткозамкнутым ротором. Потери мощности при таком регулировании невелики, поскольку минимальны потери скольжения.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

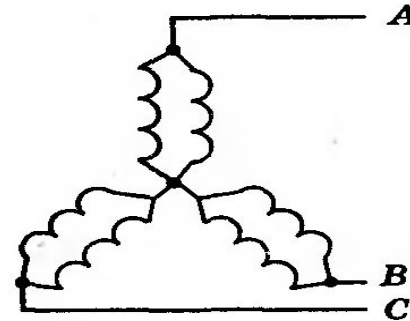
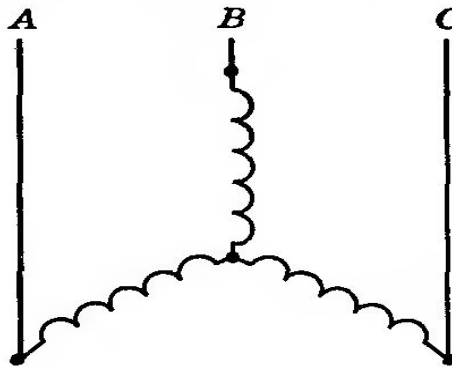
Ступенчатое регулирование скорости можно осуществить, используя специальные многоскоростные АД с короткозамкнутым ротором.

Из выражения $n_0 = 60f/p$ следует, что при изменении числа пар полюсов p получаются механические характеристики с разной частотой вращения n_0 магнитного поля статора. Так как значение p определяется целыми числами, то переход от одной характеристики к другой в процессе регулирования носит ступенчатый характер. Существует два способа изменения числа пар полюсов. В первом случае в пазы статора укладывают две обмотки с разным числом полюсов. При изменении скорости к сети подключается одна из обмоток. Во втором случае обмотку каждой фазы составляют из двух частей, которые соединяют параллельно или последовательно. При этом число пар полюсов изменяется в два раза.

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

На рис. 1.47, а, б приведены схемы переключения с одинарной звезды на двойную и с треугольника на двойную звезду.

а



б

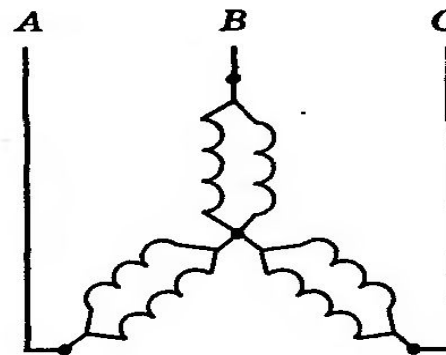
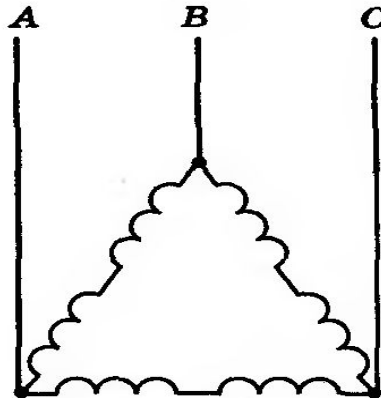


Рис. 1.47. Схемы переключения обмоток:
а — с одинарной звезды на двойную;
б — с треугольника на двойную звезду

РЕГУЛИРОВАНИЕ КООРДИНАТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ (регулирование скорости)

Регулирование скорости путем *изменения числа пар полюсов* экономично, а механические характеристики сохраняют жесткость. Недостатком этого способа является ступенчатый характер изменения частоты вращения АД с короткозамкнутым ротором. Выпускаются двухскоростные двигатели с числом полюсов 4/2; 8/4; 12/6. Четырехскоростной электродвигатель с полюсами 12/8/6/4 имеет две переключаемые обмотки.

Регулирование скорости АД. Принцип частотного регулирования скорости.

Принцип частотного метода регулирования скорости АД заключается в том, что, изменяя частоту f_1 питающего напряжения, можно в соответствии с выражением $\omega_0 = 2\pi f_1/p$ при неизменном числе пар полюсов p изменять угловую скорость ω_0 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 АД, поэтому потери мощности при регулировании невелики.

Для получения высоких энергетических показателей АД (коэффициентов мощности, полезного действия, перегрузочной способности) необходимо одновременно с частотой изменять и подводимое напряжение. Закон изменения напряжения зависит от характера момента нагрузки M_c . При постоянном моменте

Регулирование скорости АД. Принцип частотного регулирования скорости.

нагрузки ($M_c = \text{const}$) напряжение на статоре должно регулироваться пропорционально частоте ($U_1/f_1 = \text{const}$). Для вентиляторного характера момента нагрузки это состояние имеет вид $U_1/f_1^2 = \text{const}$, а при моменте нагрузки, обратно пропорциональном скорости, — вид $U_1/\sqrt{f_1} = \text{const}$. Таким образом, для плавного бесступенчатого регулирования частоты вращения вала АД преобразователь частоты должен обеспечивать одновременное регулирование частоты и напряжения на статоре АД.

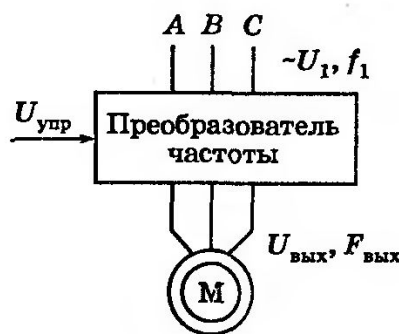


Рис. 1.45. Схема частотного электропривода

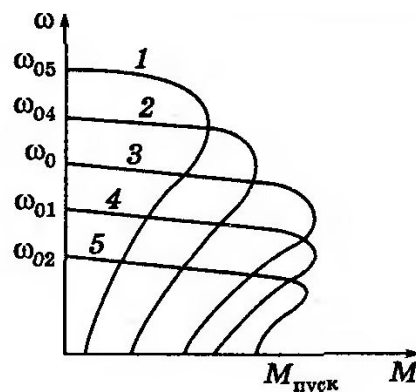


Рис. 1.46. Механические характеристики АД при частотном регулировании

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

Большинство современных преобразователей частоты построено по схеме двойного преобразования. Они состоят из следующих основных частей: 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.

Силовой трехфазный импульсный инвертор содержит шесть 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.

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

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 (ПЧ) состоит из неуправляемого диодного силового выпрямителя (В), автономного инвертора (АИН), системы управления инвертором с широтно-импульсной модуляцией (СУИ ШИМ), системы автоматического регулирования (САР), дросселя $L_{\text{в}}$ и конденсатора фильтра $C_{\text{в}}$ (рис. 1.48).

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

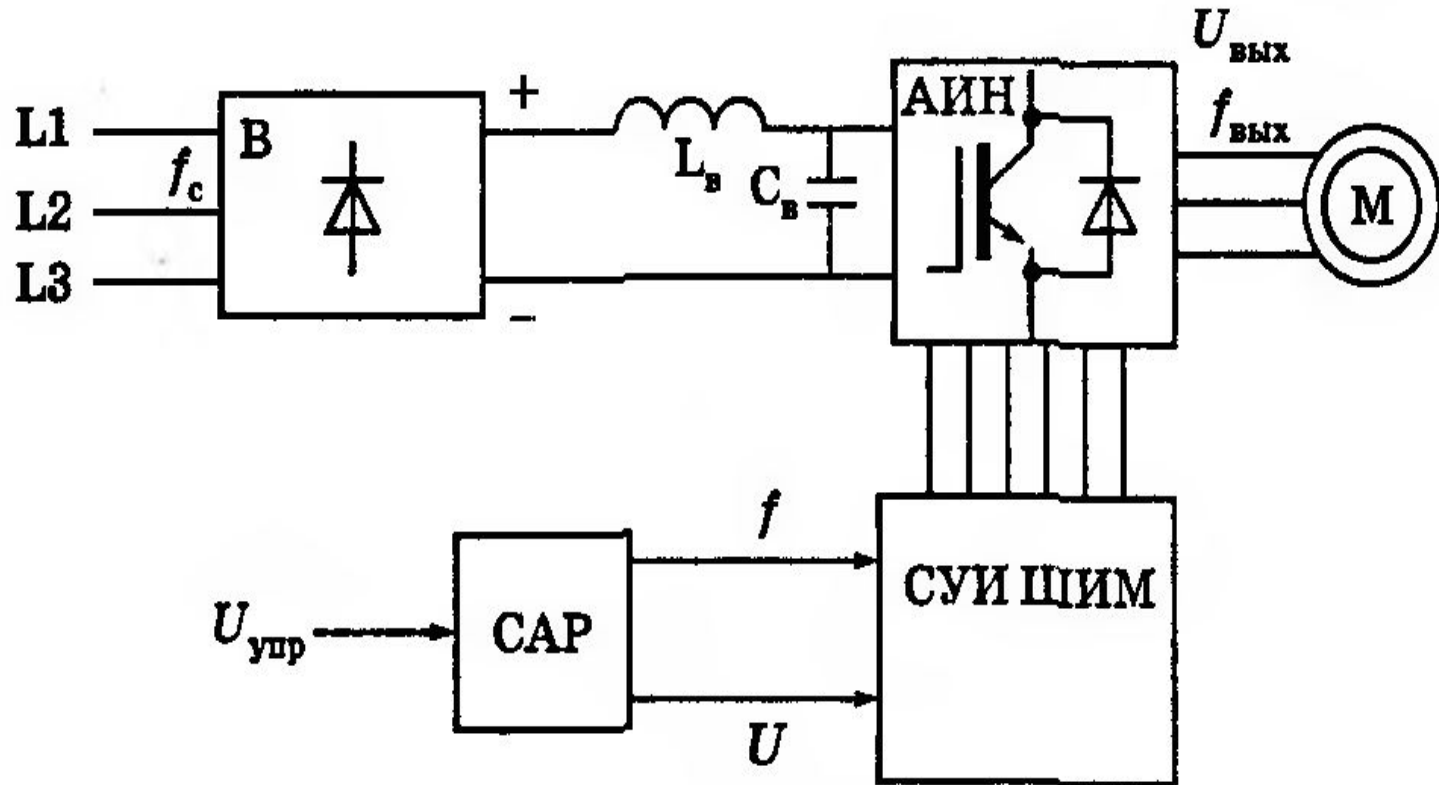


Рис. 1.48. Упрощенная схема автономного инвертора с ШИМ

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

Регулирование выходной частоты $f_{\text{вых}}$ и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ осуществляется в АИН за счет высокочастотной широтно-импульсной модуляции. Она характеризуется периодом, в течение 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 благодаря их фильтрующим свойствам проходят синусоидальные токи.

Таким образом, кривая выходного напряжения представляет собой высокочастотную двухполярную последовательность прямоугольных импульсов (рис. 1.49). 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 АД) практически синусоидальна.

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

Регулирование выходного напряжения АИН можно осуществить двумя способами: амплитудным за счет изменения выходного

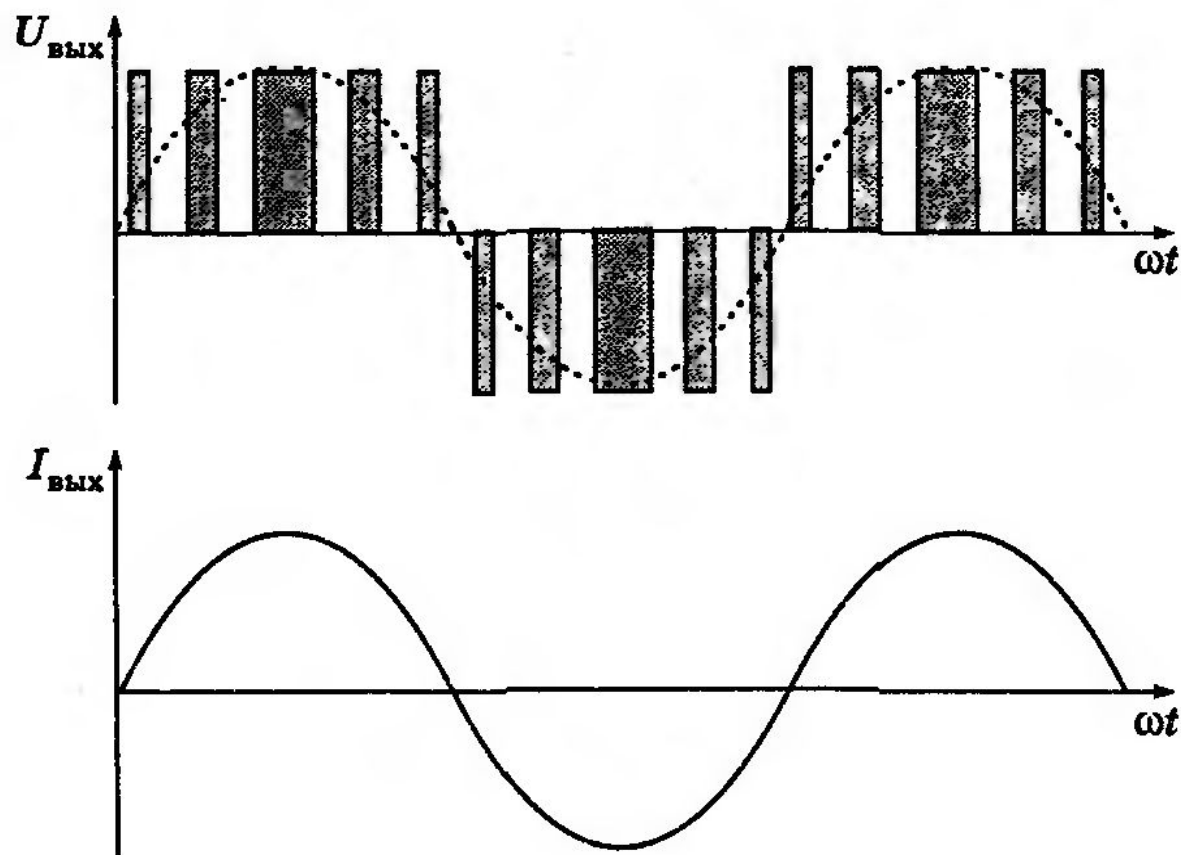


Рис. 1.49. Кривые напряжения и тока на выходе инвертора с ШИМ

напряжения выпрямителя и широтно-импульсным за счет изменения программы переключения вентилей $V1...V6$ при неизменном напряжении выпрямителя. Второй способ получил распространение в современных преобразователях частоты благодаря развитию современной элементной базы (микропроцессоры, *IGBT*-транзисторы). При ШИМ-модуляции форма токов в обмотках статора АД получается близкой к синусоидальной благодаря фильтрующим свойствам самих обмоток. Такое управление позволяет получать высокий КПД преобразователя и эквивалентно аналоговому управлению с помощью частоты и амплитуды напряжения.

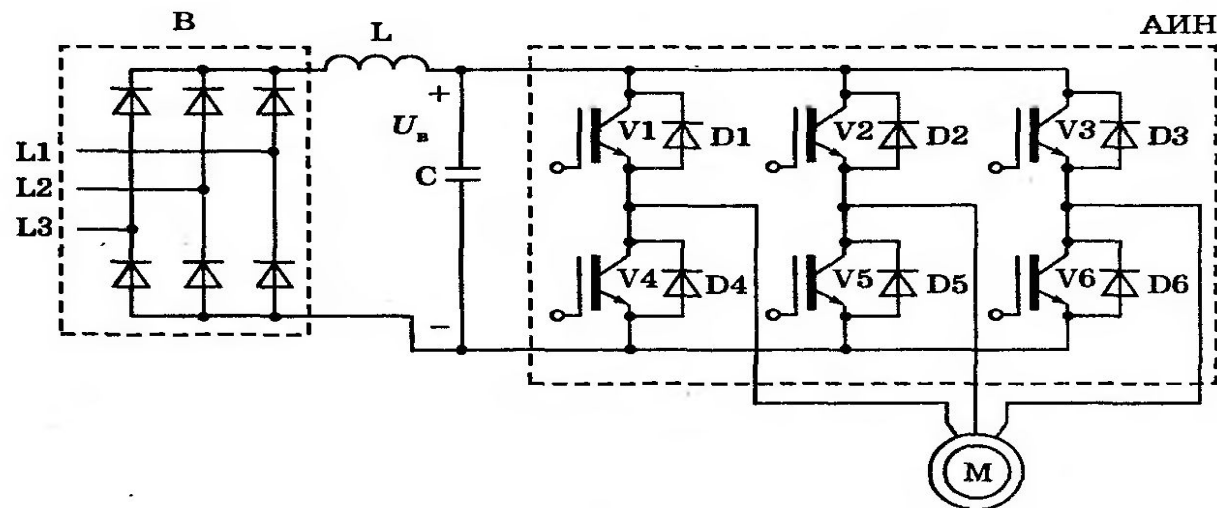


Рис. 1.50. Схема инвертора

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

Современные инверторы выполняются на основе полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов — запираемых *GTO*-тиристоров (биполярных *IGBT*-транзисторов с изолированным затвором). На рис. 1.50 представлена трехфазная мостовая схема автономного инвертора на *IGBT*-транзисторах. Она состоит из входного емкостного фильтра и шести *IGBT*-транзисторов $V1...V6$ с включенными встречно-параллельно диодами обратного тока $D1...D6$. За счет поочередного переключения вентилей $V1...V6$ по алгоритму, заданному системой управления, постоянное напряжение U_B преобразуется в переменное прямоугельно-импульсное выходное напряжение. Через управляемые ключи $V1...V6$ проходит активная составляющая тока АД, через диоды $D1...D6$ — реактивная составляющая тока АД.

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

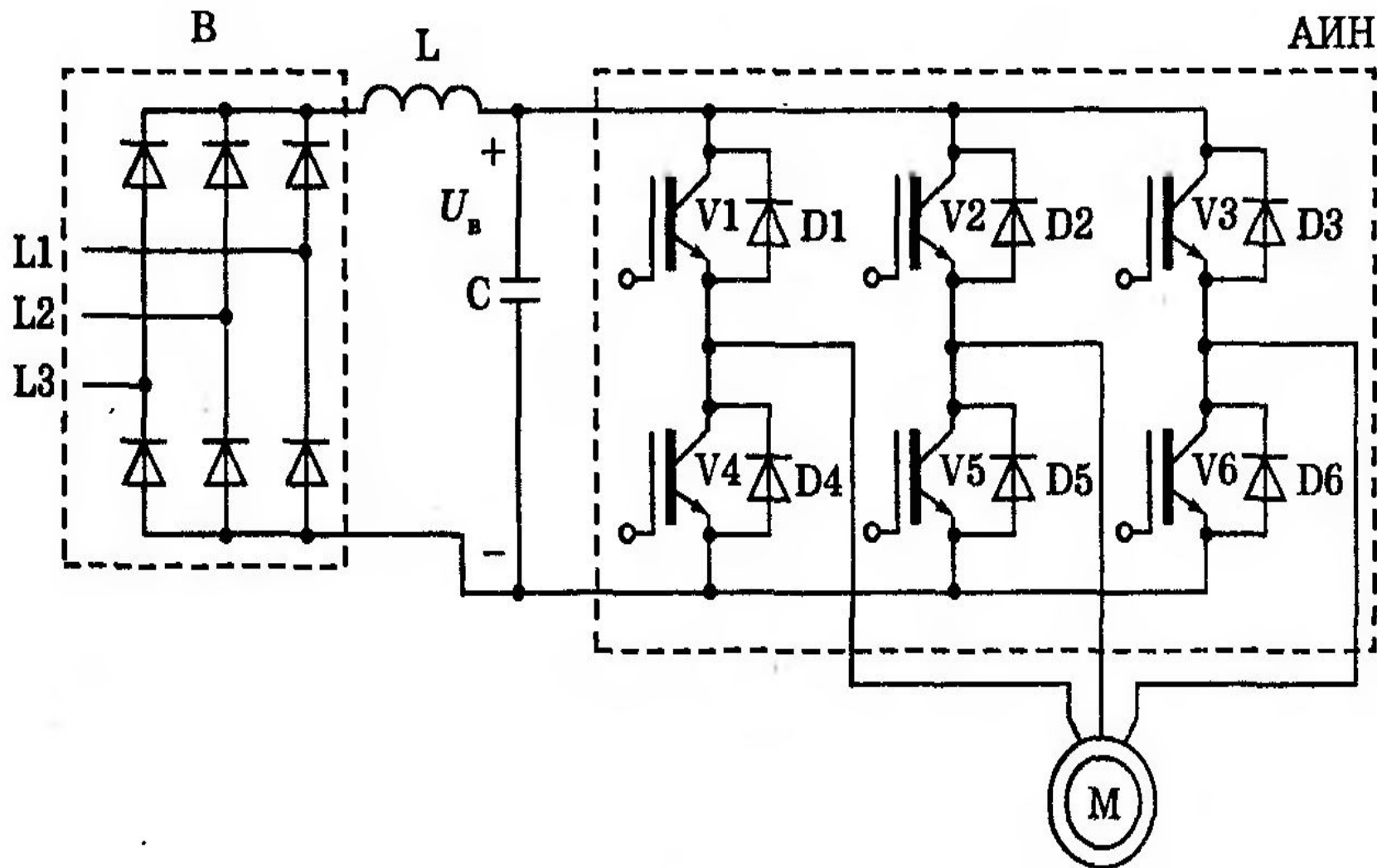


Рис. 1.50. Схема инвертора

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

Применение регулируемого электропривода обеспечивает энергосбережение и позволяет получать новые качества систем и объектов. Значительной экономии электроэнергии добиваются за счет регулирования какого-либо технологического параметра рабочей машины или механизма. Если это транспортер или конвейер, то можно регулировать скорость его движения; если это насос или вентилятор, то 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 распространенным способом регулирования производительности таких объектов является использование задвижек или регулирующих клапанов, но сегодня доступным становится частотное регулирование АД, приводящего в движение, например, рабочее колесо насосного агрегата или вентилятора. Перспективность частотного регулирования наглядно иллюстрирует рис. 1.51, на котором представлены зависимости потребляемой электродвигателем насоса мощности P от относительной подачи $Q/Q_{\max}$.

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

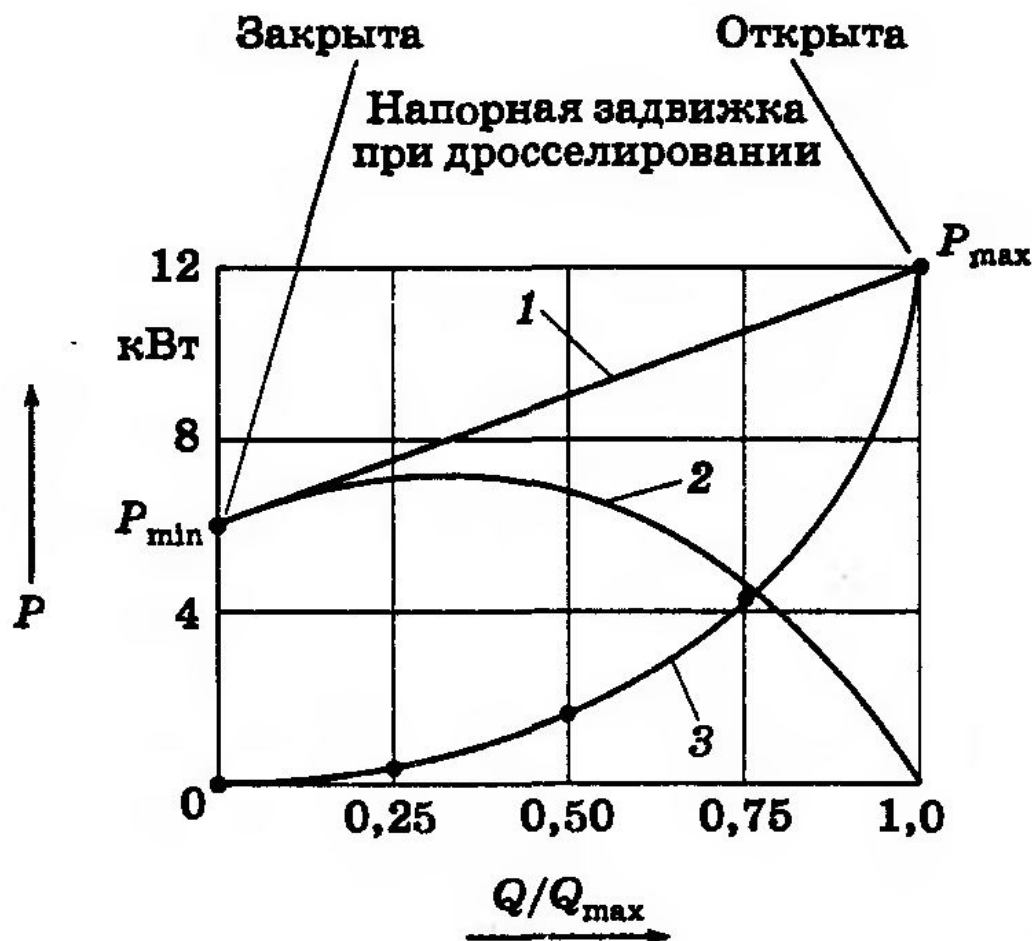


Рис. 1.51. Зависимость потребления мощности от подачи насоса при различных способах регулирования:
1, 2 — мощность, потребляемая соответственно при дросселировании и частотном регулировании; 3 — экономия электроэнергии

Преобразователи частоты для регулируемого электропривода

При дросселировании поток вещества, сдерживаемый задвижкой или клапаном, не совершает полезной работы. При частотном регулировании наибольшая экономия энергии достигается при работе насоса до половины производительности.

Применение регулируемого электропривода насоса или вентилятора позволяет задавать необходимое давление или необходимый расход, что не только обеспечивает экономию электроэнергии, но и снижает потери транспортируемого вещества.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Надежность работы электропривода и его экономичность зависят от правильного выбора мощности двигателя.

Завышение мощности электродвигателя по сравнению с нагрузкой приводит к увеличению капитальных затрат, снижению КПД и коэффициента мощности электропривода. Перегрузка двигателя приводит к перегреву его обмоток и сокращению срока службы. Таким образом, обоснованный выбор мощности электродвигателя во многом определяет технико-экономические показатели комплекса электропривод—рабочая машина.

Выбор электродвигателя производится обычно в такой последовательности: расчет мощности и предварительный выбор двигателя; проверка выбранного двигателя по условиям пуска, перегрузки и перегреву.

Основой для расчета мощности и выбора электродвигателя являются нагрузочная диаграмма и тахограмма (диаграмма скорости) исполнительного органа рабочей машины.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Нагрузочная диаграмма представляет собой график изменения приведенного к валу двигателя статического момента нагрузки во времени: $M_c(t)$. Она рассчитывается на основании технологических данных, характеризующих работу машин и механизмов, и параметров механической передачи.

Тахограмма представляет собой зависимость скорости движения исполнительного органа от времени: $\omega_{и.о}(t)$.

На рис. 1.63 приведен пример нагрузочной диаграммы и тахограммы. Из нагрузочной диаграммы (рис. 1.63, а) видно, что исполнительный орган в момент времени t_1 создает момент нагрузки M_{c1} , а в течение времени t_2 — момент нагрузки M_{c2} . Из тахограммы (рис. 1.63, б) ясно, что его движение состоит из участков разгона, установившегося движения, торможения, паузы, продолжительности которых равны соответственно $t_{раз}$, $t_{уст}$, $t_{тор}$, t_0 , а полное время цикла

$$t_{ц} = t_{раз} + t_{уст} + t_{тор} + t_0 = t_1 + t_2.$$

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

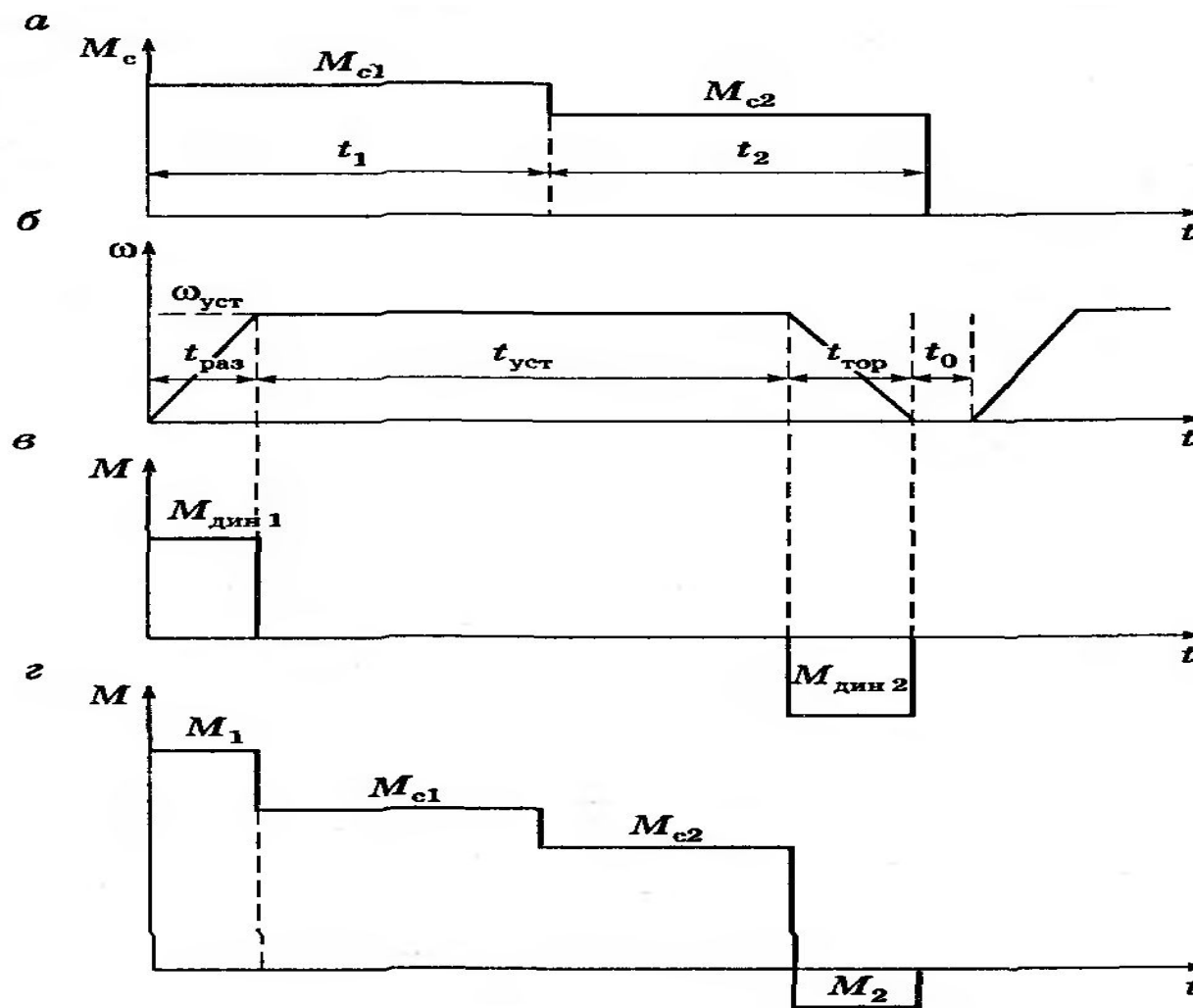


Рис. 1.63. Нагрузочная диаграмма исполнительного органа (а), тахограмма (б), график зависимости динамического момента (в) и момента двигателя (г) от времени

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

1.9.2. Определение расчетной мощности электродвигателя

Расчетный момент электродвигателя определяется следующим образом:

$$M_{\text{расч}} \geq k_{\text{зап}} M_{\text{с.экв}},$$

где $k_{\text{зап}} = 1,1 \dots 1,3$ — коэффициент запаса, учитывающий динамические режимы электродвигателя, когда он работает с повышенными моментами и токами; $M_{\text{с.экв}}$ — эквивалентный момент нагрузки. Если момент нагрузки $M_{\text{с}}$ изменяется во времени и нагрузочная диаграмма имеет несколько участков, то $M_{\text{с.экв}}$ определяется как среднеквадратичная величина:

$$M_{\text{с.экв}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n M_{\text{с}i}^2 t_i / t_{\text{ц}}},$$

где $M_{\text{с}i}, t_i$ — соответственно момент и длительность i -го участка нагрузочной диаграммы.

Расчетная мощность двигателя

$$P_{\text{расч}} = M_{\text{расч}} \omega_{\text{расч}} = k_{\text{зап}} M_{\text{с.экв}} \omega_{\text{уст}}.$$

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

По каталогу выбирают электродвигатель ближайшей большей мощности. Выбранный электродвигатель проверяют по перегрузочной способности. Для этого рассчитывают зависимость момента электродвигателя от времени: $M(t)$, называемую нагрузочной диаграммой двигателя. Она строится по уравнению (1.14), записанному в виде

$$M = M_c + J \frac{d\omega}{dt} = M_c + M_{\text{дин}}. \quad (1.19)$$

Динамический момент $M_{\text{дин}}$ определяется суммарным приведенным моментом инерции J , а также заданными ускорением на участке разгона и замедлением на участке торможения диаграммы, приведенной на рис. 1.63, б. Если считать график $\omega(t)$ на участках разбега и торможения линейным, то на этих участках

$$M_{\text{дин.раз}} = J \Delta\omega / \Delta t_{\text{раз}} = \text{const};$$

$$M_{\text{дин.тор}} = -J \omega_{\text{уст}} / t_{\text{тор}}.$$

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Зная график динамического момента (рис. 1.63, в) при постоянных ускорении и замедлении и зависимость $M(t)$, построенную по уравнению (1.19), сопоставим максимально допустимый момент двигателя $M_{\max}$ с максимальным моментом M_1 (рис. 1.63, г). Если выполняется соотношение $M_{\max} \geq M_1$, то двигатель обеспечит заданное ускорение на участке разгона, а если не выполняется, то график движения на этом участке будет отличаться от заданного и необходимо выбрать другой электродвигатель.

При выборе АД с короткозамкнутым ротором двигатель должен быть проверен также по условию пуска $M_{\text{пуск}} \geq M_c$.

Если выбранный электродвигатель удовлетворяет рассмотренным условиям, то далее осуществляется его проверка по нагреву.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

1.9.3. Проверка электродвигателей по нагреву

В процессе работы электродвигатель нагревается за счет потерь в обмотках и стали магнитопровода при преобразовании электрической энергии в механическую. Потери мощности

$$\Delta P = P_1 - P_2 = P_1(1 - \eta),$$

где P_1 — мощность, подводимая к электродвигателю; P_2 — мощность на валу; η — КПД двигателя.

Допустимая температура нагрева электродвигателя определяется нагревостойкостью применяемых изоляционных материалов, прежде всего изоляции проводов обмоток. Превышение допустимой температуры ведет к сокращению срока службы двигателей.

В современных электродвигателях применяют несколько классов изоляции. Допустимая температура составляет: для класса А — до 105 °С, класса Е — до 120, класса В — до 130, класса F — до 155, класса Н — до 180, класса С — выше 180 °С.

Основные классы изоляции для электрических двигателей — В, F и Н.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Суть *прямого метода* проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для двигателя температуры с той, которую он имеет при работе. Обычно оценивается не абсолютная температура, а так называемый перегрев τ , который равен разности температур двигателя (Θ) и окружающей среды ($\Theta_{o.c}$):

$$\tau = \Theta - \Theta_{o.c}.$$

При тепловых расчетах принимается стандартная температура окружающей среды, равная 40 °С, которой соответствует номинальная мощность электродвигателя, указанная на его щитке.

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{\max} \leq \tau_{\text{доп}}, \quad (1.20)$$

где $\tau_{\max}$ — максимальный перегрев двигателя при работе; $\tau_{\text{доп}}$ — допустимый перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Проверка условия (1.20) может быть выполнена прямым методом, предусматривающим построение кривой перегрева $\tau(t)$ за цикл работы электродвигателя.

В связи с трудностью проведения точного анализа тепловых процессов, происходящих в электродвигателе, принимают следующие допущения:

- двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее одинаковую температуру во всех точках;
- теплопередача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды;
- в процессе нагрева двигателя температура окружающей среды не изменяется;
- теплоемкость и коэффициент теплоотдачи двигателя не зависят от его температуры.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Для принятых допущений изменение перегрева двигателя во времени составляет:

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-t/T_n} + \tau_{\text{уст}}, \quad (1.21)$$

где $\tau_{\text{уст}} = \Delta P / A$ — установившееся превышение температуры двигателя, °С; ΔP — потери мощности в двигателе, Вт; A — теплоотдача двигателя — количество теплоты, отдаваемое двигателем в окружающую среду за 1 с при разности температур двигателя и окружающей среды 1 °С, Дж/(с · °С); $T_n = C / A$ — постоянная времени нагрева двигателя, с; C — теплоемкость двигателя — количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С, Дж/°С.

Физический смысл постоянной времени нагрева T_n состоит в том, что она равна времени нагрева двигателя до установившегося перегрева $\tau_{\text{уст}}$, если бы отсутствовала отдача теплоты окружающей среде.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

На рис. 1.64 приведены кривые нагрева электродвигателя при разных $\tau_{\text{нач}}$ и ΔP . При указанных допущениях нагрев происходит по экспоненциальному закону. Время достижения перегревом своего установившегося значения при экспоненциальном законе его изменения теоретически бесконечно большое. Практически процесс нагрева можно считать установившимся, когда превышение температуры двигателя достигнет $(0,95 \dots 0,98)\tau_{\text{уст}}$ за время $t_{\text{уст}} \approx (3 \dots 4) T_{\text{н}}$.

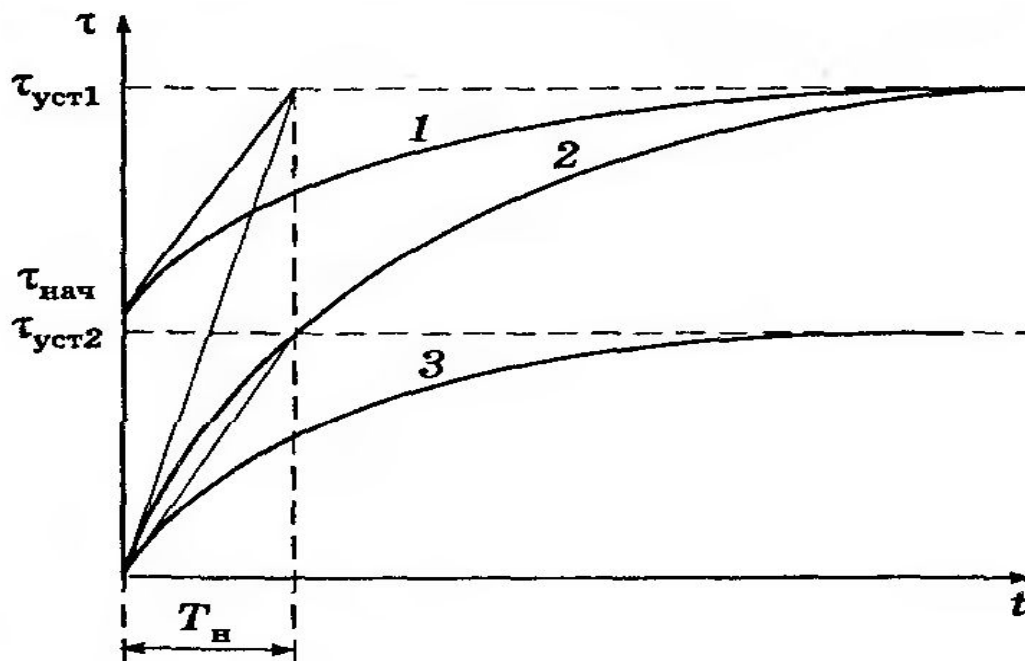


Рис. 1.64. Кривые нагрева двигателя

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

В зависимости от объема двигателей постоянные времени их нагрева находятся в пределах от нескольких минут до нескольких часов. Бóльшим потерям мощности в электродвигателе соответствует большее значение установившегося перегрева (кривые 1 и 2 на рис. 1.64 соответствуют ΔP_1 , а кривая 3 — $\Delta P_2 < \Delta P_1$).

Выражение (1.21) можно использовать для исследования процессов нагрева и охлаждения двигателя при подстановке соответствующих значений $\tau_{\text{наг}}$, $\tau_{\text{уст}}$ и постоянных времени нагрева $T_{\text{н}}$ или охлаждения $T_{\text{о}}$. Следует отметить, что постоянная времени охлаждения одного и того же двигателя больше постоянной времени нагрева из-за ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Охлаждение двигателя сопровождается снижением перегрева по кривой 1 (рис. 1.65) при уменьшении нагрузки и по кривым 2 и 3 при отключении двигателя от сети.

Проверку электродвигателей по нагреву проводят следующим образом. По известному графику нагрузки определяют потери мощности на отдельных участках цикла и находят значения установившегося перегрева на каждом участке по формуле $\tau_{уст} = \Delta P_i / A_i$. Далее для участков работы и паузы двигателя определяют постоянные времени нагрева и охлаждения. Затем по формуле (1.21) для каждого участка цикла строят кривую нагрева. При этом начальным значением $\tau_{нач i}$ на каждом следующем участке является его конечное значение $\tau_{кон(i-1)}$ на предыдущем участке.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

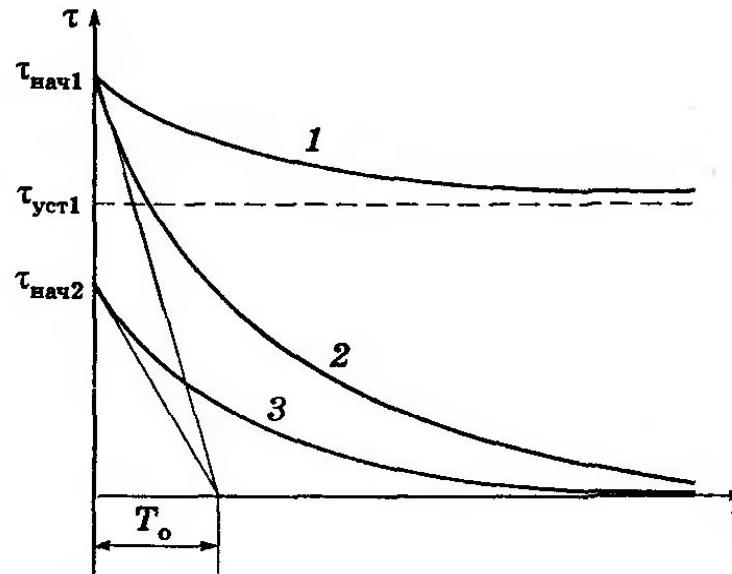


Рис. 1.65. Кривые охлаждения двигателя

Из построенной таким образом кривой перегрева находят его максимальное значение и проверяют выполнение условия (1.20).

Прямой метод проверки двигателей по нагреву требует знания теплоотдачи A и теплоемкости C , что затрудняет его использование; в справочниках такие параметры не указываются. В связи с этим обычно проверка ЭД по нагреву производится *косвенными методами* — средних потерь и эквивалентных величин.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

• МЕТОД СРЕДНИХ ПОТЕРЬ

Метод средних потерь является наиболее точным и универсальным из косвенных методов. Он состоит в том, что в определении средних потерь мощности $\Delta P_{\text{ср}}$ за цикл работы двигателя и сопоставлении их с номинальными потерями мощности $\Delta P_{\text{ном}}$ делается заключение о нагреве электродвигателя. Средний перегрев двигателя за время цикла $t_{\text{ц}}$

$$\tau_{\text{ср}} = \int_0^{t_{\text{ц}}} \Delta P dt / (A t_{\text{ц}}) = \Delta P_{\text{ср}} / A,$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ — средние потери мощности за цикл.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Таким образом, средние потери за цикл определяют средний перегрев двигателя; аналогично номинальные потери мощности в двигателе определяют его допустимый перегрев.

Нагрев двигателя будет допустимым при условии

$$\Delta P_{\text{ср}} \leq \Delta P_{\text{ном}},$$

которое является основным расчетным соотношением метода средних потерь.

Если на отдельных участках цикла нагрузка постоянная, то средние потери определяются по формуле

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3}{t_1 + t_2 + t_3} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum t_{\text{ц}}}.$$

Метод средних потерь дает тем более точную оценку нагрева двигателя, чем больше постоянная времени нагрева двигателя будет превышать значение наиболее продолжительного участка цикла, т.е. $t_{\text{мах}} \ll T_{\text{н}}$.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Методы эквивалентных величин, основанные на методе средних потерь, применяют в тех случаях, когда трудно определить средние потери электродвигателя.

Метод эквивалентного тока целесообразно использовать в том случае, когда известен график изменения тока двигателя во времени $I(t)$, который может быть получен расчетным путем или экспериментально.

Нагрев двигателя не превысит допустимого уровня, если за цикл его работы эквивалентный ток не будет превосходить номинального (паспортного) значения:

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n I_i^2 t_i} = I_{\text{экв}} \leq I_{\text{ном}}.$$

Ток $I_{\text{экв}}$ эквивалентен по условиям нагрева действительному изменяющемуся во времени току двигателя.

Если постоянные потери или сопротивления главных цепей двигателя изменяются в процессе работы, то метод эквивалентного тока даст погрешность в оценке теплового состояния электродвигателя.

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПО МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ РЕЖИМА ИХ РАБОТЫ

Метод эквивалентного момента можно использовать, если известен график изменения момента двигателя во времени: $M(t)$. При этом должно соблюдаться постоянство магнитного потока двигателя во всем цикле работы; в таком случае условие проверки имеет вид

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n M_i^2 t_i} = M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}}, \quad (1.22)$$

где $M_{\text{экв}}$ — эквивалентный по условиям нагрева момент двигателя (или среднеквадратичный момент двигателя за рабочий цикл).

Метод эквивалентной мощности используется, если известен график изменения мощности во времени, а также при выполнении условий применимости метода эквивалентного момента и постоянства скорости двигателя на всех участках рабочего цикла. Умножив обе части выражения (1.22) на $\omega_{\text{ном}}$, получим:

$$\sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \sum_{i=1}^n M_i^2 t_i} = M_{\text{экв}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{экв}} \leq P_{\text{ном}}, \quad (1.23)$$

где $P_{\text{экв}}$ — эквивалентная по условиям нагрева мощность, определяемая как среднеквадратичная мощность двигателя за рабочий цикл.

Если выполняется условие (1.23), то при соблюдении указанных ранее условий нагрев двигателя не превысит допустимого уровня.

