

**Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области
«Университет «Дубна»
Филиал «Протвино»
Кафедра «Автоматизация технологических процессов и
производств»**

А.П. Леонов

**ВЫБОР ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ
МЕХАНИЗМОВ**

ЭЛЕКТРОННОЕ УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Рекомендовано
кафедрой автоматизации технологических
процессов и производств
филиала «Протвино» государственного
университета «Дубна»
в качестве электронного учебного пособия
для студентов,
обучающихся по направлению
«Автоматизация технологических процессов и производств»

Протвино
2015

Рецензент:

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
ФГБУ Государственный Научный Центр
Российской Федерации «Институт физики высоких энергий»
Е.А. Устинов

Леонов, А.П.

Л47 Выбор исполнительных двигателей для электрических приводов производственных механизмов : электронное учебное пособие / А.П. Леонов. — Протвино, 2015. — 139 с.

Изложена методика выбора исполнительных двигателей электроприводов производственных механизмов. Приведены основные показатели, характеризующие различные способы регулирования скорости электропривода. Определены исходные данные, необходимые для корректного выбора двигателя. Определена последовательность выбора двигателя и проведен анализ каждого из этапов. Рассмотрены особенности выбора двигателей для восьми режимов работы электропривода и выбора преобразователей частоты по электрической совместимости с двигателями. Изложение материала сопровождается много численными примерами, полезными при самостоятельном изучении предмета.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению «Автоматизация технологических процессов и производств».

ББК 31.291

© Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московской области
«Университет «Дубна», филиал «Протвино», 2015
© Леонов А.П., 2015

Оглавление

Введение	6
1 Основные показатели, характеризующие различные способы регулирования скорости электропривода	7
1.1. Диапазон и плавность регулирования угловой скорости	7
1.2. Стабильность угловой скорости и жесткость механической характеристики	8
1.3 Направление регулирования скорости	9
1.4 Допустимая нагрузка двигателя	10
1.4.1 Регулирование скорости при постоянном моменте сопротивления, $M_c = const$	10
1.4.2 Регулирование скорости при постоянной мощности нагрузки, $P_c = const$	12
1.5 Экономичность регулирования	13
2 Исходные данные и последовательность выбора исполнительных двигателей электроприводов	14
3 Выбор типа исполнительного двигателя электропривода по принципу действия	18
3.1 Двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)	18
3.1.1. Пуск ДПТ НВ	19
3.1.2. Динамическое торможение ДПТ НВ	22
3.1.3. Торможение противовключением ДПТ НВ	23
3.2 Трехфазные асинхронные двигатели (АД)	25
3.2.1 Пуск трехфазных АД с кз ротором	27
3.2.2 Динамическое торможение трехфазных АД с кз ротором	27
3.2.3 Торможение противовключением трехфазных АД с кз ротором	31
3.2.4 Рекуперативное торможение трехфазных АД с кз ротором	32
3.3 Синхронные двигатели (СД)	34
3.3.1 Трехфазные СД	34
3.3.2 Вентильные двигатели	35
3.3.3 Шаговые двигатели	37
4 Конструктивные формы исполнения двигателей	38
4.1 Степень защиты электродвигателей	38
4.2 Способы охлаждения электродвигателей	40
4.3 Способы монтажа электродвигателей	41
4.4 Климатические условия эксплуатации электродвигателей	43

4.5 Место размещения электродвигателей при эксплуатации	43
5 Предварительный выбор исполнительного двигателя электропривода по требуемой мощности	44
6 Проверка соответствия номинальной скорости двигателя заданной скорости нагрузки	45
7 Проверка предварительно выбранного двигателя на перегрузочную способность и достаточность пускового момента	45
7.1 Проверка ДПТ НВ на перегрузочную способность	48
7.2 Проверка трехфазного АД с кз ротором и трехфазного СД на достаточность пускового момента и перегрузочную способность	49
8 Проверка выбранного двигателя по нагреву	50
8.1 Прямой метод проверки двигателя по нагреву	51
8.2 Косвенные методы проверки двигателя по нагреву	53
9 Расчет потерь мощности и энергии в исполнительном двигателе в установившемся режиме работы электропривода	57
9.1 Расчет потерь мощности в исполнительном двигателе в установившемся режиме работы нерегулируемого электропривода	59
9.2 Расчет потерь мощности в исполнительном двигателе в установившемся режиме работы регулируемого электропривода	62
9.2.1 Потери мощности в трехфазном АД с кз ротором при управлении от преобразователя частоты	62
9.2.2 Потери мощности в ДПТ НВ при управлении от преобразователя напряжения	63
10 Расчет потерь мощности и энергии в двигателе в переходных режимах работы электропривода	64
10.1 Потери энергии в двигателе при скачкообразном изменении фактора, вызывающего переходный процесс	65
10.1.1 Переменные потери при пуске под нагрузкой	67
10.1.2 Переменные потери при динамическом торможении под нагрузкой	69
10.1.3 Переменные потери при торможении противовключением	72
10.2 Потери энергии в двигателе при «медленном» изменении фактора, вызывающего переходный процесс	73
11 Выбор типа двигателя для заданного режима работы электропривода	80
11.1 Выбор типа двигателя при продолжительном номинальном режиме работы S1	80

11.1.1 Выбор двигателя, работающего в режиме S1 при неизменной нагрузке	80
11.1.2 Выбор двигателя, работающего в режиме S1 при переменной нагрузке	83
11.2 Выбор типа двигателя для кратковременного номинального режима работы S2	93
11.3 Выбор типа двигателя для повторно-кратковременного номинального режима работы S3	99
11.4 Выбор типа двигателя для повторно-кратковременного номинального режима работы с частыми пусками S4	106
11.5 Выбор типа двигателя для повторно-кратковременного номинального режима работы с частыми пусками и электрическим торможением S5	113
11.6 Выбор типа двигателя для перемежающегося номинального режима работы S6	116
11.6.1. Выбор двигателя для режима S6 в случае ударной нагрузки	117
11.7 Выбор типа двигателя для перемежающегося номинального режима работы с частыми реверсами S7	121
11.8 Выбор типа двигателя для перемежающегося номинального режима работы с двумя или более угловыми скоростями S8	123
12 Выбор шагового двигателя	126
13 Выбор преобразователя частоты	127
13.1 Выбор ПЧ по электрической совместимости с двигателем	129
13.1.1 Выбор ПЧ при работе с одним двигателем	129
13.1.2 Выбор ПЧ при работе с несколькими двигателями	131
13.1.3 Замечания по выбору и эксплуатации ПЧ	132
Библиографический список	135
Приложение А	136
Приложение Б	138

Введение

Высокая динамика развития современных электроприводов (ЭП) обусловлена стремлением к максимальному повышению производительности технологического оборудования и качества производимой продукции. Их применение постоянно расширяется в промышленном оборудовании и оборудовании для научных исследований, транспорте, авиационной и космической технике, медицине, бытовой технике. С целью энергосбережения осуществляется замена нерегулируемых ЭП на регулируемые в энерго-емком оборудовании (компрессоры, вентиляторы, насосы и др.). Дальнейшее развитие получают методы подчиненного управления автоматизированными ЭП [1].

Характерным является блочно-модульный принцип построения современных автоматизированных ЭП. Блок «*силовой преобразователь — электрический двигатель*» обеспечивает преобразование электрической энергии в механическую и регулирование скорости перемещения рабочего органа привода.

Выбор исполнительного двигателя является одним из наиболее ответственных этапов в проектировании ЭП. Выбранный двигатель обеспечивает заданный технологический цикл рабочей машины; имеет конструкцию, соответствующую компоновке рабочей машины и условиям эксплуатации; его нагрев в процессе эксплуатации не должен превышать допустимый (нормативный) уровень.

Выбор двигателя недостаточной мощности приводит к его по-вышенному нагреву и преждевременному выходу из строя, нарушению заданного технологического цикла и снижению производительности рабочей машины.

Использование двигателя завышенной мощности также недопустимо, так как двигатель с завышенной первоначальной стоимостью работает с низким КПД и коэффициентом мощности.

Выбор двигателя для автоматизированного ЭП имеет ту особенность, что он работает на искусственных (регулируемых) механических характеристиках [2], то есть в процессе работы имеет место изменение нагрузки двигателя. Его нагрузка при работе на любой скорости по условиям нагрева не должна превышать допустимую при полном использовании двигателя во всем диапазоне регулирования. Выполнение данного условия достигается использованием соответствующего способа регулирования скорости в блоке «силовой преобразователь — электрический двигатель».

1 Основные показатели, характеризующие различные способы регулирования скорости электропривода

Блок «силовой преобразователь — электрический двигатель» обеспечивает механическое перемещение рабочего органа автома-тизируемого оборудования с регулируемой скоростью. Под регу-лированием скорости будем понимать принудительное изменение скорости ЭП в зависимости от требований технологического про-цесса.

При проектировании блока «силовой преобразователь — электрический двигатель» и выборе его элементов следует проанализировать основные показатели, характеризующие различные способы регулирования скорости ЭП [3]: 1) диапазон регулирования; 2) плавность; 3) стабильность скорости; 4) направление регулирования скорости относительно номинальной; 5) допустимая нагрузка при различных скоростях; 6) экономичность.

Рассмотрим эти показатели более подробно.

1.1 Диапазон и плавность регулирования угловой скорости

При заданной точности регулирования для установленных пределов изменения момента нагрузки и других возмущений

диапазон D регулирования угловой скорости ω вала двигателя определяется отношением наибольшей (максимальной) заданной скорости $\omega_{\max}$ к наименьшей (минимальной) заданной скорости $\omega_{\min}$

$$D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$$

Различные производственные машины требуют разных диапазонов регулирования. Например, полный диапазон регулирования скорости в станках фрезерной, расточной и токарной групп составляет от $D = 100 : 1$ до $D = 10000 : 1$, а в карусельных — расширяется до $D = 40000 : 1$ [1]. Бумагоделательная машина работает с диапазоном регулирования $D = 3 : 1$, а некоторые прокатные станы имеют $D = 25 : 1$ [3].

Плавность регулирования ϕ_{nl} характеризует скачок скорости при переходе от данной скорости ω_i к ближайшей возможной ω_{i+1} и определяется из выражения

$$\phi_{nl} = \omega_{i+1} / \omega_i$$

Плавность регулирования во многих случаях определяет качество продукции.

Полупроводниковые преобразователи с широтно-импульсным, фазово-импульсным и частотным управлением обеспечивают плавное регулирование скорости с $\phi_{нл} \rightarrow 1$ при числе скоростей $z \rightarrow \infty$ [3,4].

2.2 Стабильность угловой скорости и жесткость механической характеристики

Этот показатель характеризует изменение угловой скорости при заданном отклонении момента нагрузки. Стабильность угловой скорости зависит от жесткости механической характеристики двигателя $\omega = f(M)$, где ω — угловая скорость вращения вала двигателя, M — вращающий момент на валу двигателя (рис. 1.1).

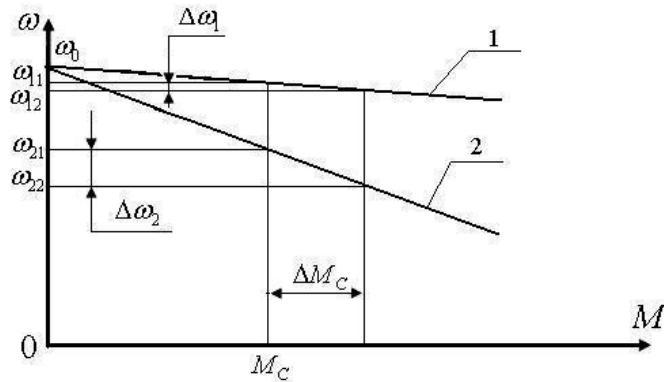


Рис. 1.1 К определению жесткости механической характеристики двигателя

Пусть при моменте нагрузки M_c вал первого двигателя вращается со скоростью ω_{11} , а второго — со скоростью ω_{21} . При изменении момента нагрузки на величину ΔM_c скорость вала первого двигателя станет равной ω_{12} , а второго — ω_{22} .

Жесткостью β механической характеристики называется отношение изменения момента нагрузки ΔM_c к соответствующему изменению угловой скорости $\Delta \omega$.

Так жесткость $\beta_1 = \Delta M_c / \Delta \omega_1$ характеристики 1 больше жесткости $\beta_2 = \Delta M_c / \Delta \omega_2$ характеристики 2, скорость вращения вала

Замкнутые электроприводы с управляемыми полупроводниковыми преобразователями имеют жесткие механические характеристики в широком диапазоне регулирования скорости, то есть обеспечивают высокую стабильность скорости при изменении нагрузки.

1.3 Направление регулирования скорости

Различают однозонное регулирование вниз от номинальной скорости двигателя; однозонное регулирование вверх от номинальной скорости; двухзонное регулирование (например, в приводах металлорежущих станков), когда в зависимости от технологических требований обеспечивается получение скорости как ниже, так и выше номинальной.

Например, двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ) может иметь двухзонное регулирование. Если напряжение на обмотке возбуждения $U_{ов}$ поддерживается номинальным ($U_{ов} = U_{овном} = const$), а напряжение на обмотке якоря $U_{я}$ изменяется от номинального до нуля ($0 \leq U_{я} \leq U_{яном}$), то осуществляется

однозонное регулирование скорости ω вниз от номинальной

$$\omega = (U_{я} - I_{я} R_{я.ц.}) c_e, \quad (1.1)$$

где $I_{я}$ — ток в обмотке якоря, А; $R_{я.ц.}$ — полное активное сопротивление якорной цепи, включая выходное сопротивление управляемого полупроводникового преобразователя, сопротивление соединительных проводов, коллекторно-щеточного узла и обмотки якоря, Ом; $c_e = k\Phi$ — конструктивная постоянная двигателя, В/рад;

Φ — магнитный поток двигателя, Вб.

Диапазон регулирования скорости $D = \omega_{ном} / \omega_{min}$ в этом случае может быть, теоретически, сколь угодно большим.

Если $U_{я}$ поддерживается номинальным ($U_{я} = U_{яном} = const$), а напряжение $U_{ов}$ изменяется вниз от номинального ($U_{ов} < U_{овном}$ и магнитный поток $\Phi < \Phi_{ном}$), то осуществляется однозонное регулирование скорости вверх от номинальной (регулирование по обмотке возбуждения). Следует учитывать, что при данном способе регулирования уменьшается расчетный срок службы подшипников, в которых вращается якорь двигателя, поскольку при проектировании электрической машины подшипники рассчитываются на номинальную скорость вращения. Поэтому, как правило, при однозонном регулировании скорости вверх от номинальной диапазон $D = \omega_{max} / \omega_{ном} \leq 3 \div 4$.

1.4 Допустимая нагрузка двигателя

Допустимая нагрузка определяется нагревом двигателя при длительной работе на искусственных (регулируемых) характеристиках и для разных способов регулирования будет различной. Степень нагрева двигателя зависит от потерь энергии в нем, которые определяются током, потребляемым двигателем. Следовательно, если при работе на всех искусственных характеристиках обеспечивается ток двигателя равный номинальному, то это означает, что:

- двигатель загружен полностью на всех угловых скоростях;
- его нагрев при длительной работе не превышает

допустимой величины.

Предполагается, что условия охлаждения двигателя остаются неизменными как при больших, так и при малых угловых скоростях.

Отсюда делаем важный вывод о том, что допустимой нагрузкой двигателя следует считать такую, при которой ток двигателя в его силовых цепях равен номинальному.

Рассмотрим особенности выбора мощности двигателя при заданных зависимостях нагрузки от скорости и при учете способа регулирования скорости [2].

1.4.1 Регулирование скорости при постоянном моменте сопротивления, $M_c = \text{const}$

Оценим целесообразность различных способах регулирования скорости.

1.4.1.1 Регулирование скорости при постоянном моменте двигателя.

Этот способ обеспечивает однозонное регулирование скорости вниз от номинальной (например, уменьшением напряжения вниз от номинального на обмотке якоря ДПТ НВ). Максимальная скорость двигателя соответствует номинальной $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\text{max}}$. Номинальный момент двигателя принимаем равным моменту нагрузки, то есть $M_{\text{ном}} = M_c$. Тогда, ток в якоре двигателя на всех скоростях неизменен и равен номинальному

$$I_a = I_{a \text{ ном}} = M_{\text{ном}} / c_M = \text{const}, \quad (1.2)$$

где $c_M = M_{\text{ном}} / I_{a \text{ ном}}$ — конструктивная постоянная двигателя, Нм / А.

Номинальная мощность двигателя должна быть равна

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = M_c \omega_{\text{max}} = P_{c \text{ max}}, \quad (1.3)$$

где $P_{c \text{ max}}$ — максимально возможная мощность нагрузки.

Итак, при $M_c = \text{const}$ регулирование при постоянном моменте двигателя является *рациональным*, так как:

- при всех скоростях двигатель загружен полностью ($M_{\text{ном}} = M_c$);
- номинальная мощность двигателя равна максимально возможной мощности нагрузки ($P_{\text{ном}} = P_{c \text{ max}}$);
- двигатель работает в нормальном тепловом режиме ($I_a = I_{a \text{ ном}} = \text{const}$).

1.4.1.2 Регулирование скорости при постоянной мощности двигателя.

Этот способ обеспечивает однозонное регулирование скорости вверх от номинальной, номинальная скорость двигателя равна минимальной скорости в диапазоне регулирования, то есть $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\text{min}}$ (реализуется, например, уменьшением напряжения вниз от номинального на обмотке возбуждения ДПТ НВ). В этом случае номинальная мощность $P_{\text{ном}}$ двигателя должна быть равна максимальной мощности $P_{c \text{ max}}$ нагрузки, то есть $P_{\text{ном}} = P_{c \text{ max}} = M_c \omega_{\text{max}}$. Номинальный момент двигателя определяется из выражения

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \omega_{\text{ном}} = M_c \omega_{\text{max}} / \omega_{\text{ном}} = M_c D \quad (1.4)$$

Из выражения (1.4) следует, что номинальный момент двигателя должен в D раз превышать момент нагрузки. Габарит двигателя оказывается завышенным, поскольку он определяется, как это показано в теории электрических машин, номинальным моментом. Двигатель полностью загружен только на максимальной скорости ω_{max} , когда по обмотке якоря протекает номинальный ток $I_a = I_{a \text{ ном}}$ при минимальном магнитном потоке Φ . При меньших скоростях магнитный поток двигателя увеличивается, а ток в якоре становится меньше номинального, и двигатель недоиспользуется по нагреву.

Таким образом, при $M_c = \text{const}$ регулирование скорости при постоянной мощности двигателя оказывается *нерациональным* (нецелесообразным).

1.4.2 Регулирование скорости при постоянной мощности нагрузки, $P_c = \text{const}$

Оценим целесообразность различных способов регулирования скорости при данном типе нагрузки..

1.4.2.1 Регулирование скорости при постоянном моменте двигателя

Поскольку этот способ обеспечивает регулирование скорости вниз от номинальной, то номинальная скорость двигателя должна равняться максимальной скорости нагрузки, то есть $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\text{max}}$. Номинальный момент двигателя $M_{\text{ном}}$ равняется максимальному $M_{\text{с max}}$ моменту нагрузки, который при $P = \text{const}$ определяется при минимальной скорости

$$M_{\text{ном}} = M_{\text{с max}} = P / \omega_{\text{min}} \quad (1.5)$$

Номинальная мощность двигателя определится из выражения

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{с max}} / \omega_{\text{min}} = P_{\text{с}} D \quad (1.6)$$

Следовательно, номинальная мощность двигателя должна быть в D раз больше мощности нагрузки. Это означает, что при работе на всех скоростях, кроме минимальной, двигатель будет недогружен и недоиспользован по нагреву. Таким образом, при нагрузке типа $P_c = \text{const}$ регулирование скорости при постоянном моменте двигателя является *нерациональным (нецелесообразным)*.

1.4.2.2 Регулирование скорости при постоянной мощности двигателя

Поскольку этот способ обеспечивает регулирование скорости вверх от номинальной, то номинальная скорость двигателя выбирается из условия $\omega_{\text{ном}} = \omega_{\text{min}}$, а номинальный момент двигателя определяется из выражения

$$M_{\text{ном}} = M_{\text{с max}} = P_{\text{с}} / \omega_{\text{min}} = P_{\text{с}} \omega_{\text{ном}} \quad (1.7)$$

Тогда номинальная мощность двигателя

$$P_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{с}} \omega_{\text{ном}} \omega_{\text{ном}} = P_{\text{с}} \omega_{\text{ном}}^2 \quad (1.8)$$

Таким образом, номинальная мощность двигателя равна мощности нагрузки. Двигатель будет полностью загружен на всех скоростях и будет работать в нормальном тепловом режиме.

Таким образом, при нагрузке типа $P_c = \text{const}$ регулирование скорости при постоянной мощности двигателя является *рациональным (целесообразным)*.

Выводы

Проведенный анализ позволяет сделать следующее *важное заключение* — для выбора минимального по габариту двигателя и обеспечения его полного использования по нагреву необходимо, чтобы способ его регулирования по показателю допустимой нагрузки соответствовал типу нагрузки (зависимости нагрузки от скорости).

При нагрузке типа $M_c = \text{const}$ целесообразно использование способов регулирования при постоянном моменте двигателя, при нагрузке типа $P_c = \text{const}$ — при постоянной мощности двигателя.

1.5 Экономичность регулирования

Экономичность характеризуется затратами на сооружение и эксплуатацию ЭП.

При анализе затрат на сооружение ЭП учитывается дефицитность материалов и оборудования, используемых при его создании.

При оценке эксплуатационных затрат во внимание принимают надежность ЭП и потери энергии при регулировании. Потери мощности ΔP при регулировании скорости определяют коэффициент полезного действия η привода

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P), \quad (1.9)$$

где P_2 — мощность на валу двигателя.

При работе двигателя на m разных угловых скоростях подсчитывается средневзвешенный КПД за регулировочный цикл из выражения

$$\eta_p = \sum_{q=1}^m P_{2q} t_q / \sum_{q=1}^m (P_{2q} + \Delta P_q) t_q \quad (1.10)$$

где P_{2q} и ΔP_q — соответственно полезная мощность и потери на q -ой ступени регулирования; t_q — время работы двигателя на q -ой ступени.

Следует учитывать, что управляемые полупроводниковые преобразователи в некоторых режимах работы ЭП, например, при рекуперативном торможении, позволяют возвращать энергию в сеть.

Важным экономическим показателем ЭП является коэффициент мощности $\cos\phi$. В случае двигателя переменного тока сдвиг фаз ϕ между током и напряжением сети обуславливается потреблением реактивной мощности, затрачиваемой на создание магнитного потока. Зная потребляемые двигателем активную P_a и реактивную P_p мощности, можно определить текущее значение коэффициента мощности

$$\cos\phi = P_a / \sqrt{P_a^2 + P_p^2} \quad (1.11)$$

При работе на разных угловых скоростях с разным временем и с различными нагрузками в течение цикла регулирования определяется средневзвешенный $\cos\phi_p$

$$\cos\phi_p = \sum_{q=1}^m P_{aq} t_q / \sum_{q=1}^m t_q \sqrt{P_{aq}^2 + P_{pq}^2} \quad (1.12)$$

Номинальный коэффициент мощности для большинства двигателей составляет $\cos\phi_{ном} = 0.8 \div 0.9$ и зависит от мощности двигателя. С ростом мощности и номинальной угловой скорости двигателя повышается номинальный коэффициент мощности.

При использовании управляемых полупроводниковых преобразователей для регулирования угловой скорости двигателя коэффициент мощности определяется из выражения [2]

$$\cos\phi \approx \omega_\alpha / \omega_0 \quad (1.13)$$

где ω_α — угловая скорость идеального холостого хода при наибольшем угле регулирования α ; ω_0 — угловая скорость идеального холостого хода при угле регулирования $\alpha = 0$.

Экономически выгодным оказывается такой ЭП, который обеспечивает заданную производительность оборудования при требуемом качестве технологического процесса и наиболее быстро окупается.

2 Исходные данные и последовательность выбора исполнительных двигателей электроприводов

Процедура выбора электродвигателей состоит в удовлетворении ряда требований потребителя и заключается в переборе воз-

можных вариантов, в том числе: по роду тока и напряжению, конструктивному исполнению, мощности и режиму работы [2,3,4].

Выбор исполнительного двигателя для ЭП в большинстве случаев представляет собой не простую задачу. Для ее корректного решения должны быть заданы следующие исходные данные.

1) Нагрузочная диаграмма исполнительного механизма $M_c [H\cdot m] = f(t)$ при вращательном движении нагрузки (рис. 2.1) или $F_c [H] = f(t)$ при ее поступательном движении.

По нагрузочной диаграмме определяются:

- наибольшее значение момента нагрузки $M_{c\max}$ (на рис.2.1 $M_{c\max} = M_{c2}$);

- время цикла работы исполнительного механизма t_u ; величины интервалов времени t_1, t_2, t_3, t_n , соответствующие работе привода с нагрузочными моментами M_{c1}, M_{c2}, M_{c3} и паузе.

2) Диаграмма скорости исполнительного механизма (тахограмма) $\omega_n [rad/c] = f(t)$ (рис. 2.1) при вращательном движении нагрузки или $v_n [m/c] = f(t)$ при ее поступательном движении.

Из тахограммы определяются:

- наибольшая скорость нагрузки $\omega_{n\max}$ или $v_{n\max}$ (на рис. 2.1 $\omega_{n\max} = \omega_{n2}$);

- величины интервалов времени: t_{p1} — разгона до скорости ω_{n1} ; t_4 — движения с установившейся скоростью ω_{n1} ; t_{p2} — разгона до скорости ω_{n2} ; t_5 — движения с установившейся скоростью ω_{n2} ; t_m — торможения до скорости $\omega_n = 0$; $\varepsilon = \omega t$, значения ускорений при разгоне $\varepsilon_{p1}, \varepsilon_{p2}$ и торможении $\varepsilon_m = \omega_{n2}/t_m$; выбирается наибольшее из них значение ускорения $\varepsilon_{n\max}$;

- диапазон регулирования скорости $D = \omega_{n\max} / \omega_{n\min}$

3) Момент инерции $J_n [kg\cdot m^2]$ нагрузки при ее вращательном движении или масса $m_n [kg]$ нагрузки при ее поступательном движении.

4) Режим работы двигателя в ЭП.

Работа двигателя в ЭП по характеру изменения нагрузки на его валу подразделяется на восемь режимов с условными обозначениями S1÷ S8 (табл. 2.1).

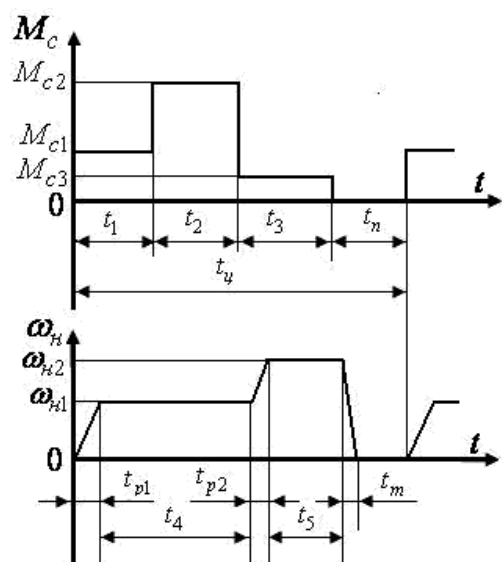


Рис. 2.1 Нагрузочная диаграмма и диаграмма скорости исполнительного механизма

Таблица 2.1

Режимы работы двигателей в электроприводах

Условное обозначение	Наименование режима работы двигателя
S1	Продолжительный номинальный с неизменной нагрузкой
	Продолжительный номинальный с переменной циклической нагрузкой
S2	Кратковременный номинальный
S3	Повторно-кратковременный номинальный
S4	Повторно-кратковременный номинальный с частыми пусками
S5	Повторно-кратковременный номинальный с частыми пусками и электрическим торможением
S6	Перемежающийся номинальный
S7	Перемежающийся номинальный с частыми реверсами
S8	Перемежающийся номинальный с двумя или более угловыми скоростями

Под режимом работы двигателя будем понимать установленный порядок чередования периодов, характеризуемых:

- величиной и продолжительностью нагрузки на валу двигателя в течение цикла работы;
- величиной ускорения при пуске и продолжительностью пуска относительно длительности цикла работы;
- продолжительностью работы с данной установившейся скоростью относительно длительности цикла работы;
- наличием реверсов во время цикла работы двигателя;
- величиной ускорения при торможении и продолжительностью торможения относительно длительности цикла работы;
- продолжительностью отключений в течение заданного цикла работы двигателя.

5) Способ исполнения ЭП — разомкнутый / замкнутый, наличие / отсутствие регулируемого полупроводникового преобразователя напряжения или частоты в системе управления двигателем.

Опыт проектирования и эксплуатации ЭП позволяет выработать следующие рекомендации по порядку выбора двигателей.

Выбор серийных электродвигателей рекомендуется производить в следующей последовательности:

1. Выбор типа двигателя по принципу действия (постоянного тока независимого возбуждения, трехфазный асинхронный с короткозамкнутым ротором, трехфазный синхронный, шаговый и т.д.).

2. Выбор конструктивного исполнения двигателя (способ монтажа, степень защиты, способ охлаждения и т. д.).

3. Расчет мощности двигателя для заданного режима работы и его *предварительный* выбор с учетом пунктов 1, 2.

4. Проверка соответствия *номинальной скорости двигателя* $\omega_{ном}$ ($n_{ном}$) заданной скорости нагрузки.

5. Проверка выбранного двигателя на достаточность пускового момента и перегрузочную способность.

6. Проверка выбранного двигателя по нагреву.

Если предварительно выбранный в пункте 3 двигатель удовлетворяет условиям проверки по пунктам 4, 5 и 6, то на этом выбор двигателя заканчивается.

Если предварительно выбранный двигатель не удовлетворяет условиям проверки хотя бы по одному из пунктов 4, 5 или 6, то выбирается другой двигатель, как правило, большей мощности и его проверка повторяется.

Рассмотрим каждый из указанных пунктов более подробно.

3 Выбор типа исполнительного двигателя электропривода по принципу действия

В электрических приводах используются исполнительные двигатели общего и специального назначения.

Двигатели общего назначения — это серийные двигатели, конструкция и характеристики которых позволяют эксплуатировать их в *обычных условиях* без специальных ограничений. Серия представляет собой ряд двигателей возрастающей мощности, имеющих однотипную конструкцию.

Двигатели специального назначения — это двигатели, имеющие специальную конструкцию и (или) специальные характеристики, которые позволяют применять их в *особых условиях*, то есть условиях, не попадающих под определение «*обычные условия*». Эти двигатели могут быть как серийными (взрывозащищенные, погружные, судовые, краново-металлургические, тяговые и др.), так и единичными, разработанными для конкретного ЭП с *особыми условиями*.

В современных ЭП используются двигатели как постоянного тока, так и переменного (асинхронные и синхронные).

При выборе типа исполнительного двигателя руководствуются характером работы ЭП (нагрузочной диаграммой и тахограммой), номинальной частотой вращения и требуемым диапазоном ее регулирования, требуемыми механическими характеристиками [2,3,4,5].

3.1 Двигатели постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ)

Особенностью ДПТ НВ является независимость цепи обмотки возбуждения от цепи якоря. Поэтому изменение тока в обмотке якоря не влияет на ток в обмотке возбуждения. Влиянием реакции якоря на магнитное поле возбуждения пренебрегаем, поскольку это влияние невелико.

ДПТ НВ обладают линейными механическими характеристиками (рис. 3.1а), момент двигателя прямо пропорционален току в якоря. Совместно с управляемыми полупроводниковыми преобразователями напряжения ДПТ НВ широко используются в замкнутых ЭП с *широким диапазоном* регулирования частоты вращения двигателя. В этом случае их механические характеристики обладают большой жесткостью и располагаются в 4-х квадрантах (рис. 3.1б), то есть ДПТ НВ может работать как в двигательном режиме в 1-ом и 3-ем квадрантах, так и в генераторном (тормозном)

во 2-м и 4-м квадрантах, что позволяет реализовать эффективное управление приводом.

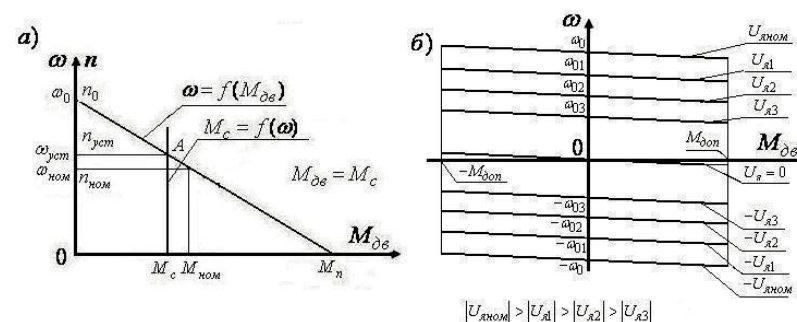


Рис. 3.1 Механические характеристики $\omega = f(M)$ ДПТ НВ

а) естественная механическая характеристика ДПТ НВ; ω [рад/с], n [об/мин] — соответственно угловая скорость и частота вращения вала двигателя; ω_0 и n_0 — соответственно угловая скорость и частота вращения на холостом ходу; $\omega_{ном}$ и $n_{ном}$ — соответственно номинальные угловая скорость и частота вращения; $M_{δв}$ [Нм] — момент на валу двигателя; $M_{ном}$ — номинальный момент; $M_n = M_{кз}$ — пусковой момент двигателя;

б) механические характеристики ДПТ НВ в замкнутом электроприводе при управлении по цепи якоря (изменением напряжения питания обмотки якоря); $M_{доп}$ — наибольшая допустимая величина момента двигателя; $U_{яном}$ — номинальное напряжение питания обмотки якоря.

3.1.1 Пуск ДПТ НВ

При пуске ДПТ НВ момент двигателя $M_{δв}$ будет изменяться от M_n до $M_{δв} = M_c$, а угловая скорость ω — от нуля до $\omega_{уст}$ (точка А на рис. 3.1).

Ток $I_{я}$ в обмотке якоря

$$I_{я} = (U_{яном} - c_e \phi) R_{яц}, \quad (3.1)$$

где $c_e \omega$ — противоЭДС вращения; c_e [Вс/рад] = $(U_{яном} - I_{яном} R_{я}) / \omega_{ном}$ — конструктивная постоянная двигателя, определяемая через его номинальные значения; $R_{яц}$ — активное сопротивление якорной цепи.

Из выражения (3.1) следует, что наибольшее значение ток $I_{я}$ имеет в начальный момент пуска, когда скорость $\omega = 0$ и

$$I_{я} = I_{я \max} = U_{я \text{ ном}} / R_{я} \quad (3.2)$$

Поскольку сопротивление обмотки якоря $R_{я}$ очень мало (доли Ома), то ток $I_{я \max}$ значительно превышает допустимую величину $I_{я \text{ доп}}$, которая может быть кратковременно допущена в этом двигателе, не вызывая необратимых процессов в коллекторно-щеточном узле.

Поэтому при прямом пуске ДПТ НВ на время пуска в его якорную цепь необходимо включать добавочный резистор R_n , чтобы соблюдалось условие

$$I_{я \max} = U_{я} / (R_{я} + R_n) \leq I_{я \text{ доп}}$$

Из полученного выражения определим величину пускового резистора R_n

$$R_n \geq (U_{я} / I_{я \text{ доп}}) - R_{я} \quad (3.3)$$

Для пускового момента M_n двигателя должно выполняться условие

$$M_n \leq I_{я \text{ доп}} \cdot c_M \leq \frac{U_{я \text{ ном}}}{R_{я} + R_n} \cdot c_M \leq M_{\text{доп}} \quad (3.4)$$

где $c_M [H \cdot м / A] = M_{\text{ном}} / I_{я \text{ ном}}$ — конструктивная постоянная двига-

теля. При линейных механических характеристиках двигателя изменение скорости во времени описывается линейным неоднородным дифференциальным уравнением первого порядка

$$T_M d\omega/dt + \omega = \omega_{уст}, \quad (3.5)$$

где механическая постоянная времени привода

$$T_M = J (R_{я} + R_n) / c_e c_M \quad (3.6)$$

Решение уравнения (3.5)

$$\omega = \omega_{нач} + \omega_{уст} (1 - e^{-t/T_M}) \quad (3.7)$$

Построенный в соответствии с (3.7) график изменения скорости при пуске двигателя ($\omega_{нач} = 0$) представлен на рис. 3.2а. Теоретически ω достигает установившегося значения при $t \rightarrow \infty$. На практике полагают пуск законченным, когда скорость $\omega = 0.95\omega_{уст}$, то есть время пуска

$$t_n \approx 3T_M \quad (3.6)$$

На рис. 3.2б представлены графики изменения тока $I_{я}$ и момента двигателя $M_{\text{доп}}$ при пуске, соответствующие зависимостям

$$I_{я} = (M_c / c_M) + [I_{я \text{ доп}} - (M_c / c_M)] e^{-t/T_M} \quad (3.7)$$

$$M_{\text{доп}} = M_c + (M_{\text{доп}} - M_c) e^{-t/T_M} \quad (3.8)$$

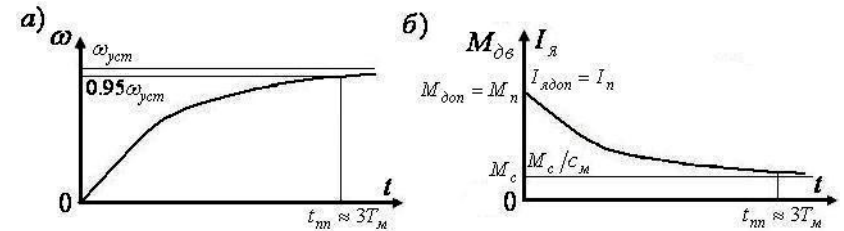


Рис. 3.2 Изменение угловой скорости (а), тока в якорь (момента двигателя) (б) при пуске ДПТ НВ

Величина $I_{я \text{ доп}}$ для конкретного типа двигателя определяется в соответствии с ГОСТ и зависит от времени пуска (табл. 3.1). Анализ данных, приведенных в табл. 3.1, показывает, что для серийно выпускаемых ДПТ НВ:

- величина допустимого тока в якорь

$$I_{я \text{ доп}} = \frac{(3 \div 4) I_{я \text{ ном}}}{\text{при } t_n = t_M \leq 10 \text{ с}} \quad (3.9)$$

или величина допустимого момента двигателя $M_{\text{доп}} = (3 \div 4) M_{\text{ном}}$, если время пуска не превышает 10 с;

- величина допустимого тока в якорь

$$I_{я \text{ доп}} = \frac{(2 \div 2.5) I_{я \text{ ном}}}{\text{при } 10 \text{ с} < t_n = t_M \leq 1 \text{ мин}} \quad (3.10)$$

или величина допустимого момента двигателя $M_{доп} = (2 \div 2.5)M_{ном}$, если время пуска $10с < t_n = t_M \leq 1мин.$

Таблица 3.1

Серия двигателя	Предельно допустимая перегрузка
Общего назначения постоянного тока серий 2ПФ; 2ПО; 2ПБ	$I = 2I_{я\text{ном}}$ в течение $t_M = 60с$; $I = 3I_{я\text{ном}}$ в течение $t_M = 10с$ (для 2ПФ и 2ПО); $I = 4I_{я\text{ном}}$ в течение $t_M = 10с$ (для 2ПБ)
Двигатели постоянного тока серии Д	$I_{я\text{доп}}$ до $2.5I_{я\text{ном}}$ в течение $t_M = 1мин$ при независимом возбуждении; $I_{я\text{доп}}$ до $3.0I_{я\text{ном}}$ в течение $t_M = 1мин$ при смешанном возбуждении; $I_{я\text{доп}}$ до $3.5I_{я\text{ном}}$ в течение $t_M = 1мин$ при последовательном возбуждении

Как только якорь начнет вращение, появится противоЭДС $c_e\omega$, которая уменьшит величину тока якоря (3.1) и соответственно величину пускового момента. Чтобы поддержать пусковой момент на прежнем уровне, необходимо уменьшить величину R_n . Для этого при пуске в цепь якоря включают пусковой реостат со ступенчатой регулировкой сопротивления.

Методика определения числа ступеней и расчета значений сопротивления для каждой из ступеней приводится в литературе [2].

При пуске ДПТ НВ с использованием управляемого преобразователя напряжения величина тока в обмотке якоря $I_{я} \leq I_{я\text{доп}}$ поддерживается без включения дополнительного резистора R_n .

3.1.2 Динамическое торможение ДПТ НВ

При динамическом торможении ДПТ НВ обмотка якоря отключается от источника питания $U_{я}$ и на время торможения параллельно ей включается резистор $R_{дт}$ (рис. 3.3а), что создает цепь для тормозного тока $I_{дт} = c_e\omega / (R_{я} + R_{дт})$, протекающего под действием противоЭДС $c_e\omega$. Поскольку при динамическом торможении необходимо соблюдать условие $I_{дт} \leq I_{я\text{доп}}$, то сопротивление резистора $R_{дт}$ определяется из условия

$$R_{дт} \geq (c_e\omega - I_{я\text{доп}} R_{я}) / I_{я\text{доп}} = (c_e\omega / I_{я\text{доп}}) - R_{я} \quad (3.11)$$

На практике для расчета величины $R_{дт}$ обычно используется формула

$$R_{дт} \geq (U_{яном} / I_{ядоп}) - R_{я}, \quad (3.12)$$

где не требуется знание текущей величины ω , а используется наибольшее возможное значение противоЭДС $c_e\omega_0 \approx U_{яном}$.

Для сохранения величины тормозного момента по мере уменьшения $c_e\omega$, как и при пуске, используются реостаты со ступенчатой регулировкой сопротивления.

Механические характеристики ДПТ НВ, характеризующие режим динамического торможения, приведены на рис. 3.3б. Точка А соответствует установившемуся режиму работы двигателя. При переходе к режиму динамического торможения рабочая точка перемещается в точку В с координатами $M_{дт\text{нач}} = -c_e\omega_{уст} c_M / (R_{я} + R_{дт})$; $\omega_{уст}$.

Поскольку в процессе торможения скорость ω уменьшается до нуля, то и величина противоЭДС уменьшается от $c_e\omega_{уст}$ до нуля. Соответственно тормозной момент изменяется от начального значения $M_{дт\text{нач}}$ до конечного $M_{дт\text{кон}} = 0$ (рис. 3.3б).

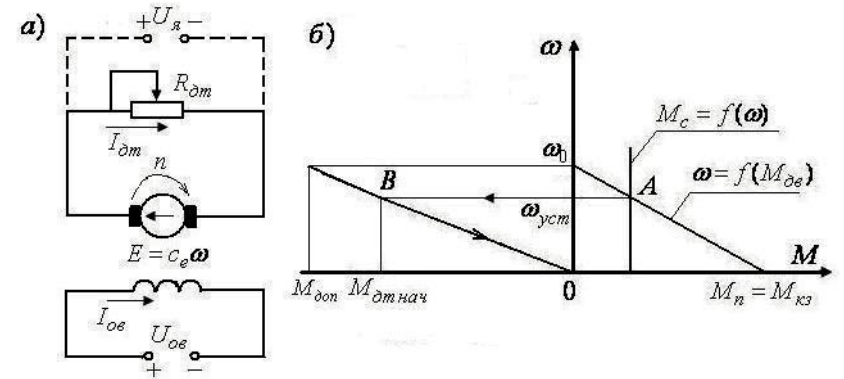


Рис. 3.3 Режим динамического торможения ДПТ НВ;
а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

3.1.3 Торможение противовключением ДПТ НВ

Торможение противовключением ДПТ НВ применяют при необходимости быстрой остановки ЭП, поскольку при его реализации возникают большие тормозные моменты.

Для этого изменяют полярность напряжения на обмотке якоря (полярность в скобках на рис. 3.4а). Поскольку при торможении направление вращения вала двигателя сохраняется, то противо-ЭДС и напряжение питания будут включены согласно, создавая тормозной ток $I_{ят}$. Из условия $I_{ят} \leq I_{я доп}$ определяется величина дополнительного сопротивления $R_{ят}$

$$R_{ят} \geq [(U_{я} + c_e \omega) / I_{я доп}] - R_{я} \quad (3.13)$$

На практике для расчета величины $R_{ят}$ обычно используется формула

$$R_{ят} \geq (2U_{я ном} / I_{я доп}) - R_{я} \quad (3.14)$$

где используется наибольшее возможное значение противоЭДС $c_e \omega \approx U_{я ном}$.

Для сохранения величины тормозного момента по мере уменьшения $c_e \omega$ используются реостаты со ступенчатой регулировкой сопротивления.

Если двигательному режиму соответствовала рабочая точка А на рис. 3.4б, то при переходе в режим торможения противовключением момент становится отрицательным и работа ДПТ НВ определяется режимом точки С на характеристике 2 с координатами $-M_m \leq -M_c$; $n_{уст}$.

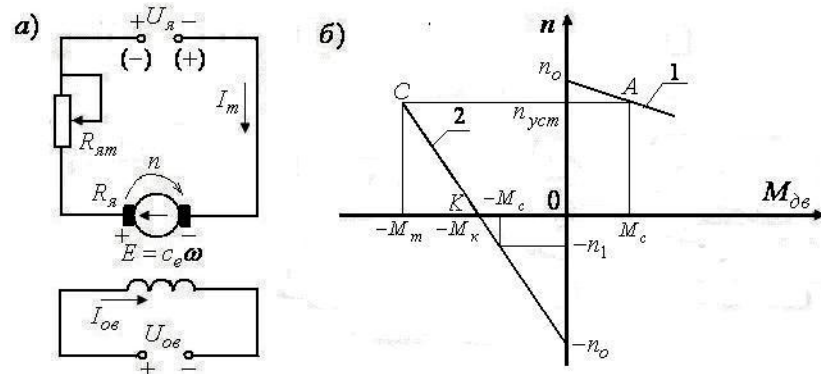


Рис. 3.4 Режим торможения противовключением ДПТ НВ;
а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

Под действием тормозящего момента $-M_m$ частота вращения якоря n уменьшается до нуля (точка К). Если в этот момент цепь якоря не отключить от сети, то произойдет *реверсирование* двигателя и под действием момента M_c якорь начнет вращение в противоположную сторону, перейдя в двигательный режим. Работы двигателя будет происходить на участке характеристики 2, расположенном в третьем квадранте. При реактивном M_c наступит установившийся режим с частотой вращения $-n_1$.

Выводы

1. К достоинствам электроприводов на базе ДПТ НВ следует отнести:

- линейность механических характеристик и относительно простое управление ДПТ НВ;
- широкий диапазон регулирования скорости и хорошие динамические свойства привода при управлении двигателем от регулируемых полупроводниковых преобразователей напряжения;
- относительно малую стоимость и высокую надежность регулируемых полупроводниковых преобразователей напряжения.

2. К недостаткам электроприводов на базе ДПТ НВ следует отнести:

- наличие коллекторно-щеточного узла, значительно понижающего надежность привода, делающего недопустимым его применение во взрыво- и пожароопасных зонах;
- повышенная стоимость по сравнению с асинхронными двигателями той же мощности.

3. Поэтому с освоением промышленностью выпуска полупроводниковых преобразователей частоты происходит постепенное вытеснение из электроприводов ДПТ НВ двигателями переменного тока, обладающими большей надежностью.

3.2 Трехфазные асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым (кз) ротором

Нелинейная естественная механическая характеристика трехфазного АД с кз ротором представлена на рис. 3.5а, где рабочим является линейный участок характеристики, соответствующий изменению угловой скорости $\omega_0 \leq \omega \leq \omega_{кр}$ или скольжения $0 \leq s \leq s_{кр}$. С освоением промышленностью полупроводниковых преобразователей частоты трехфазные АД с кз ротором находят все более широкое применение в замкнутых электроприводах с *широким диапазоном* регулирования частоты вращения вала двигателя.

В этом случае, как и у ДПТ НВ, механические характеристики АД обладают большой жесткостью и располагаются в 4-х квадрантах (рис. 3.5б). При постоянном моменте сопротивления M_c в области частот $f_{11} < f_{12} < f_{1ном}$ между амплитудой напряжения U_1 на обмотке статора и его частотой f_1 выполняется условие $U_1 / f_1 = const$ и момент M_{max} постоянен, то есть АД имеет постоянную перегрузочную способность. В области частот $f_1 > f_{1ном}$ (f_{13} на рис.3.5б) регулирование скорости ведется при номинальном напряжении $U_1 = U_{1ном} = const$ и момент M_{max} уменьшается при увеличении частоты.

В каталогах для каждого типа трехфазного АД с кз ротором указаны значения:

- кратности пускового тока $\lambda_i = I_n / I_{ном}$;
- кратности пускового момента $\lambda_n = M_n / M_{ном}$;
- кратности максимального момента $\lambda_m = M_{max} / M_{ном}$.

Для трехфазных АД с кз ротором общего назначения характерные значения $\lambda_i = 5 \div 7$; $\lambda_n = 1.3 \div 1.6$; $\lambda_m = 1.8 \div 3.0$ [4].

Как следует из этих данных, одним из основных недостатков трехфазных АД с кз ротором является малый пусковой момент при большом пусковом токе.

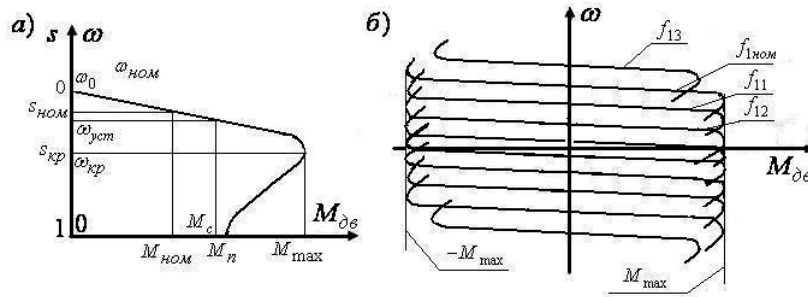


Рис. 3.5 Механические характеристики трехфазного АД с кз ротором

Для определения s_{kp} по паспортным данным используется формула

$$s_{kp} = s_{ном} (\lambda_m \sqrt{\lambda_m^2 - 1}) \quad (3.15)$$

При построении механической характеристики используют приближенную формулу

$$M_{\partial\partial} \approx 2M_{max} / (s/s_{kp} + s_{kp}/s) \approx 2M_{ном} \lambda_m / (s/s_{kp} + s_{kp}/s) \quad (3.16)$$

а) естественная механическая характеристика трехфазного АД с кз ротором; $M_{ном}$, M_n , M_{max} — соответственно номинальный, пусковой и наибольший моменты АД; s — скольжение АД; $s_{ном}$ и s_{kp} — соответственно номинальное и критическое скольжение, соответствующее M_{max} ;

б) механические характеристики трехфазного АД с кз ротором в замкнутом ЭП при частотном управлении АД; $f_{1ном}$, f_{11} , f_{12} , f_{13} — соответственно номинальная и регулируемые частоты напряжения питания обмотки статора

3.2.1 Пуск трехфазных АД с кз ротором

При пуске трехфазных АД с кз ротором момент двигателя изменяется от $M_{\partial\partial} = M_n$ до $M_{\partial\partial} = M_c$, а угловая скорость — от нуля до $\omega_{уст}$ (рис. 3.4а).

Пуск трехфазных АД с кз ротором небольшой и средней

мощности (до ≈ 250 кВт) обычно осуществляется при полном напряжении (прямой пуск) [3]. При пуске трехфазных АД большей мощности возникает необходимость ограничения пусковых токов, что достигается использованием автотрансформаторов, дополнительных реакторов (индуктивностей) или резисторов, включаемых последовательно в цепь статора на время пуска. Расчет величин дополнительных резисторов или реакторов приведен в литературе [5].

При пуске трехфазных АД с кз ротором с использованием преобразователей частоты возможно задание такого темпа увеличения скорости, при котором нет надобности в дополнительных реакторах или резисторах.

В общем случае предельная мощность АД для прямого включения в сеть определяется в каждом конкретном случае, в зависимости от допустимого тока сети $I_{сдоп}$. Начальный пусковой ток $I_n = I_{ном} \lambda_i$ при прямом включении двигателя в сеть не должен превышать $I_{сдоп}$ с учетом токов других силовых и осветительных устройств, питаемых от этой сети.

3.2.2 Динамическое торможение трехфазных АД с кз ротором

При динамическом торможении трехфазного АД с кз ротором обмотка статора отключается от сети трехфазного переменного

напряжения U_c и подключается к источнику постоянного напряжения U_n (рис. 3.6а). В виду относительной простоты технической реализации наибольшее распространение получил несимметричный вариант, когда постоянное напряжение подключается к двум последовательно включенным фазам статора. Постоянный ток I_n , протекая по обмотке статора, создает неподвижное в пространстве магнитное поле, которое наводит ЭДС и ток в обмотке вращающегося ротора. Ток обмотки ротора создает свое магнитное поле, взаимодействие которого с магнитным потоком статора приводит к появлению тормозного момента.

Расчет режима динамического торможения заключается в определении величины постоянного тока I_n , обеспечивающей заданное время торможения $t_{\text{от}}$.

Если точка A соответствует установившемуся режиму работы при моменте двигателя $M_{\text{де}} = M_{\text{сн}}$ и при скорости $\omega = \omega_{\text{нп}}$ (рис. 3.6б), то при переходе к режиму динамического торможения рабочая точка из A перемещается в B и в процессе торможения скорость уменьшается по механической кривой динамического торможения от начальной $\omega_{\text{нач}} = \omega_{\text{нп}}$ до конечной $\omega_{\text{кон}} = 0$ под действием тормозного момента двигателя $M_{\text{от}}$ и момента сопротивления $M_{\text{сн}}$. Механическая характеристика двигателя в режиме динамического торможения располагается во втором квадранте и величина критического момента $M_{\text{кдт}}$ определяется величиной тока I_n [3, 4].

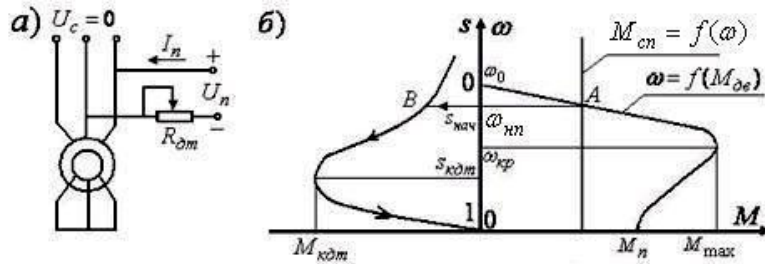


Рис. 3.6 Режим динамического торможения трехфазного АД с кз ротором; а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

При построении механических характеристик в режиме динамического торможения постоянный ток I_n заменяют переменным

током $I_{1\text{экв}}$, который равнозначен ему по создаваемой магнитодвижущей силе. При соединении обмоток статора в звезду

$$I_{1\text{экв}} = I_n \sqrt{2/3} \approx 0.816 I_n \quad (3.17)$$

Предлагается следующая методика определения требуемой величины тока I_n . В литературе [6] получено выражение, позволяющее с достаточно высокой степенью точности определить значение $M_{\text{кдт}}$

$$M_{\text{кдт}} = \frac{2.53(I_{1\text{экв}}^*)^2}{1 + 0.505 I_{1\text{экв}}^*} \cdot \frac{U_{1\phi}}{\omega_0}, \quad (3.18)$$

где $U_{1\phi}$ — номинальное напряжение обмотки статора; I_0 — ток намагничивания (холостого хода) двигателя; ω_0 — скорость холостого хода двигателя;

$$I_{1\text{экв}}^* = I_{1\text{экв}} / I_0 \approx 0.816 I_n / I_0 \quad (3.19)$$

Из выражения (2) получаем квадратное уравнение относительно тока $I_{1\text{экв}}^*$

$$2.53 U_{1\phi} I_0 (I_{1\text{экв}}^*)^2 - 0.505 M_{\text{кдт}} \omega_0 I_{1\text{экв}}^* - M_{\text{кдт}} \omega_0 = 0 \quad (3.20)$$

Величина тока I_0 определяется по формуле

$$I_0 \approx I_{1\text{ном}} (\sin \phi - \cos \phi), \quad (3.21)$$

где $I_{1\text{ном}}$ — номинальная величина тока обмотки статора; λ_m — паспортная величина коэффициента механической перегрузки.

Для определения величины $M_{\text{кдт}}$ введем понятие среднего момента двигателя при динамическом торможении $M_{\text{ср}}^{\text{от}}$. Это постоянный в течение времени торможения момент, обеспечивающий то же время торможения, что и реальный момент двигателя

$$M_{\text{ср}}^{\text{от}} = M_{\text{сн}} - J_n \omega_{\text{нп}} / t_{\text{от}} \approx M_{\text{кдт}} / 2, \quad (3.22)$$

где $M_{\text{сн}}$, J_n , $\omega_{\text{нп}}$ — соответственно приведенные к валу двигателя момент сопротивления, полный момент инерции и угловая скорость нагрузки.

Из выражения (3.22) определяем значение $M_{\text{кдт}}$ и вставляем его в уравнение (3.20)

$$M_{\kappa\partial\tau} \approx 2 M_{\text{ср}}^{\partial\tau} \approx 2 \cdot (M_{\text{сн}} - J_n \omega_{\text{н}} / t_{\partial\tau})$$

Решив уравнение (3.20), определяем требуемое значение

$$I_{1\text{ экв}}^* = \frac{0.505 M_{\kappa\partial\tau} \omega_o \pm \sqrt{(0.505 M_{\kappa\partial\tau} \omega_o)^2 + 10.12 U_{1\phi} I M_{\kappa\partial\tau} \omega}}{5.06 M_{\kappa\partial\tau} \omega_o} \quad (3.23)$$

Из выражения (3.19) определяем требуемое значение постоянного тока, обеспечивающее заданную величину $M_{\kappa\partial\tau}$

$$I_n = I_{1\text{ экв}}^* / 0.816 \quad (3.24)$$

В реальной схеме (рис. 1а) величина постоянного тока I_n ограничивается только активным сопротивлением 2-х фаз обмотки статора ($2R_{1\phi}$) и сопротивлением настроенного резистора $R_{\partial\tau}$ и не должна превышать номинального значения тока в обмотке статора $I_{1\text{ ном}}$.

Однако, поскольку у трехфазных АД с кз ротором начальные тормозные моменты малы для их увеличения (обеспечения заданного времени торможения) в обмотку статора подают постоянный ток, равный 4–5-кратному значению тока холостого хода

$$I_n \leq (4 \div 5) I_0 \quad (3.25)$$

Если полученное значение I_n превышает $I_{1\text{ ном}}$, то необходимо осуществить проверку двигателя на нагрев. Нагрев двигателя не будет превышать допустимой температуры при выполнении условия

$$M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}} \quad (3.26)$$

где $M_{\text{экв}}$ — эквивалентный момент двигателя, определяемый за цикл работы и учитывающий долю времени динамического торможения в общем цикле работы двигателя (8.13); $M_{\text{ном}}$ — номинальный момент двигателя.

Предлагаемая методика позволяет оценить возможность использования трехфазного АД с кз ротором в режиме динамического торможения при заданном времени $t_{\partial\tau}$ без экспериментального исследования, а именно:

1. Определить требуемую величину постоянного тока I_n (3.24), обеспечивающую заданное время торможения $t_{\partial\tau}$.

2. Оценить полученное значение I_n с точки зрения допустимого нагрева двигателя (3.25, 3.26).

3. Если требуемая величина I_n не удовлетворяет условиям (3.25) или (3.26), то следует рассмотреть возможность торможения противовключением или выбрать другой двигатель данной серии ближайшей большей мощности.

3.2.3 Торможение противовключением трехфазных АД с кз ротором

Для перевода трехфазного АД в режим торможения противовключением достаточно изменить направление вращения магнитного поля статора путем изменения порядка чередования фаз. Например, прямой порядок чередования фаз ABC заменить обратным порядком следования ВАС. Для этого достаточно переключить два провода, присоединяющих к сети обмотку статора (рис.3.7а). На рис. 3.7б приведены механические характеристики АД при прямом порядке следования фаз (кривая 1 в первом и четвертом квадрантах) и обратном (кривая 2 во втором и третьем квадрантах). Характеристики симметричны относительно начала координат.

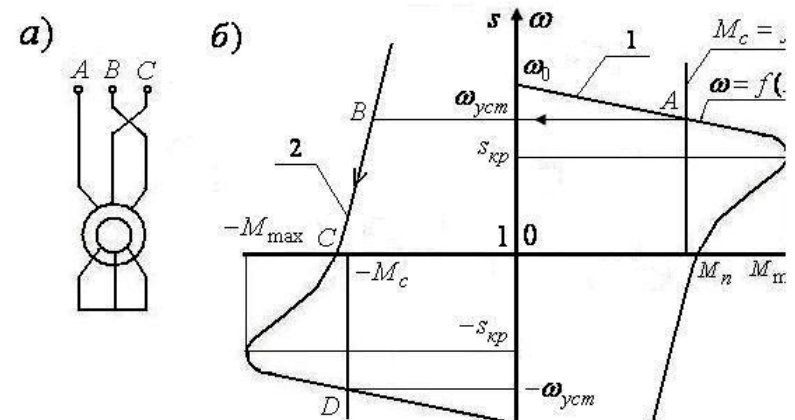


Рис. 3.7 Режим торможения противовключением трехфазного АД с кз ротором; а) схема включения двигателя; б) механические характеристики

Пусть двигатель в установившемся режиме работал при моменте сопротивления M_c (точка А). В начальный момент торможения противовключением угловая скорость вращения $\omega_{\text{нач тп}} = \omega_{\text{уст}}$ не изменяется, рабочая точка смещается на характеристику обратного следования фаз (точка В). В точке В на ротор двигателя будет действовать начальный тормозной момент

$$-M_{нач\ t} = -\frac{2M_{\max}}{s_{нач} \sqrt{s_{кр} + s_{кр}} \sqrt{s_{нач}}}, \quad (3.27)$$

$$\text{где } M_{\max} = M_{ном} \lambda_m; \quad s_{кр} = \frac{s_{ном}}{\lambda_m \sqrt{\lambda_m^2 + 1}}; \quad s_{нач} = \frac{\omega_o - \omega_{уст}}{\omega_o}.$$

Под действием тормозного момента частота вращения ротора уменьшится до нуля ($s_{кон} = 1$), в точке C двигатель необходимо отключить от сети, иначе он перейдет из тормозного (генераторного) режима в двигательный с противоположным направлением вращения ротора (точка D). Точке C соответствует момент двигателя, равный пусковому $-M_n$.

Если при торможении противовключением ток в статоре I_{1c} превышает допустимый ток сети $I_{доп}$, то ограничение тормозного тока достигается [5] использованием автотрансформаторов, дополнительных реакторов (индуктивностей) или резисторов, включаемых последовательно в цепь статора на время пуска или посредством преобразователя напряжения постоянной частоты, подключаемого к обмотке статора.

3.2.4 Рекуперативное торможение трехфазных АД с кз ротором

Рекуперативное торможение осуществляется, когда скорость ротора превышает синхронную скорость поля. В приводах с АД возможны три варианта реализации рекуперативного торможения.

1. Этот вид торможения реализуется в системе «преобразователь частоты (ПЧ) — АД» при остановке двигателя или его переходе с одной искусственной характеристики на другую (рис. 3.7). Пусть в исходном состоянии АД работает на характеристике 1 в точке A . При уменьшении частоты $f_{рег}$ на выходе ПЧ осуществляется переход на характеристику 2. Поскольку скорость ω_{ycm1} мгновенно измениться не может, то переходим в точку B характеристики 2, где $\omega_{ycm1} > \omega_{02}$. За счет этого и возникает режим торможения с отдачей энергии в сеть. При этом схема ПЧ должна быть способна передать энергию от двигателя в сеть. Торможение заканчивается в точке C при скорости ω_{ycm2} , соответствующей действующему моменту сопротивления M_c .

2. Рекуперативное торможение АД осуществляется при торможении двухскоростного (многоскоростного) АД увеличением числа пар полюсов. При увеличении числа пар полюсов рабочая точка A на характеристике 1 (рис. 3.8) перемещается в точку B

на характеристике 2, где $\omega_{ycm1} > \omega_{02}$. Далее скорость двигателя уменьшается (участок BC кривой 2), что соответствует торможению с рекуперацией (отдачей) энергии в сеть.

3. Рекуперативное торможение реализуется в ЭП при спуске грузов. При этом вал ротора АД вращается в направлении спуска груза.

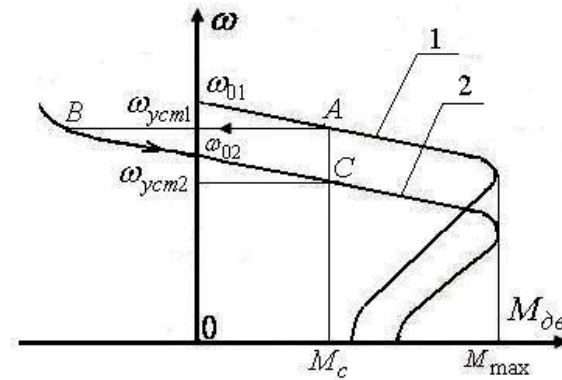


Рис. 3.8 Механические характеристики АД в режиме рекуперативного торможения

Выводы

1. Трехфазные АД с кз ротором имеют меньшую стоимость, чем ДПТ НВ, и более надежны (из-за отсутствия щеточно-коллекторного узла).

2. Трехфазные АД с кз ротором постепенно вытесняют ДПТ НВ. Однако, их использование в современных ЭП с широким диапазоном регулирования частоты вращения двигателя сдерживается сложностью системы частотного управления и повышенной стоимостью преобразователей частоты.

3. Недостатком трехфазного АД с кз ротором является сравнительно небольшой пусковой момент при большом пусковом токе ($i = 5 \div 7$; $\lambda_n = 1.3 \div 1.6$).

4. Окончательное решение о применении ДПТ НВ или трехфазного АД с кз ротором в регулируемом ЭП должно основываться на экономических расчетах с учетом не только капитальных затрат, но и расходов, связанных с эксплуатацией ЭП.

3.3 Синхронные двигатели (СД)

3.3.1 Трехфазные СД

Трехфазные СД имеют абсолютно жесткую механическую характеристику (1 на рис. 3.9) при моменте нагрузки $M_c \leq M_{\max}$. При $M_c > M_{\max}$ нарушается синхронное вращение ротора и магнитного поля, то есть СД выпадает из синхронизма. До недавнего времени СД широко применялись в ЭП, не требующих регулирования координат движения, а именно, обеспечивающих стабильную заданную скорость вращения нагрузки или нескольких нагрузок. С внедрением преобразователей частоты трехфазные СД находят применение в ЭП *большой мощности* с широким диапазоном регулирования скорости (механическая характеристика 1 перемещается параллельно оси абсцисс при изменении частоты питающего напряжения, то есть частоты вращения холостого хода n_0). Торможение СД осуществляется переводом его в генераторный режим. При этом торможение противовключением практически не используется, так как сопровождается большими бросками тока и момента. Наиболее часто в электроприводах с СД используется режим динамического торможения.

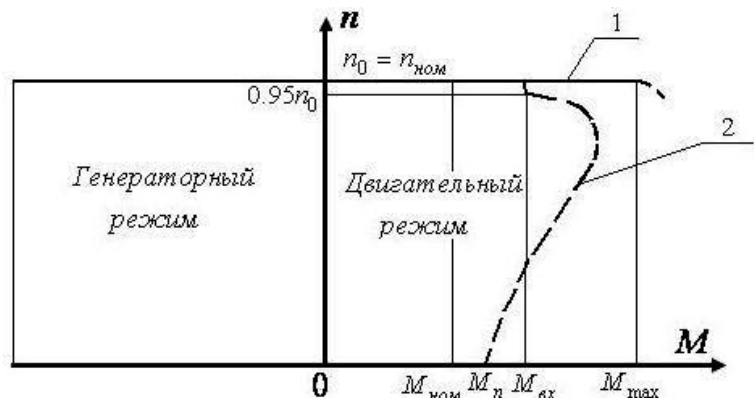


Рис. 3.9 Естественная механическая характеристика трехфазного СД (прямая 1) (2 — механическая характеристика СД при асинхронном пуске, $M_{вх}$ — момент втягивания в синхронизм).

Трехфазные СД имеют высокие технико-экономические показатели:

1. Высокий КПД, составляющий 96-98%, что на 1-1.5% выше КПД АД тех же габаритов и скорости.

2. Высокий коэффициент мощности $\cos \phi$, равный единице для приводов небольшой мощности и опережающий $\cos \phi$ в установках большой мощности, что позволяет отдавать в сеть реактивную мощность, улучшая режим работы и экономичность сети электроснабжения.

3. Возможность изготовления СД на очень большие мощности (до нескольких десятков мегаватт и более).

Выводы

1. Использование трехфазных СД в ЭП *большой мощности* представляется целесообразным в виду их высоких технико-экономических показателей.

2. Однако ЭП с трехфазным СД и частотным преобразователем имеет достаточно большую стоимость. Вопрос о его применении должен решаться после технико-экономического анализа возможных вариантов построения привода.

3.3.2 Вентильные двигатели

Все большее распространение получают ЭП с вентильными двигателями (ВД) постоянного тока и синхронными ВД (электродвигатели, совмещенные с полупроводниковым инвертором). ВД постоянного тока (рис. 3.10) — это синхронный двигатель с электронным коммутатором напряжения И, к которому подключена трехфазная обмотка статора, датчиком положения ротора ДПР, схемой импульсно-фазового управления (СИФУ).

Основными элементами ДПР являются магниточувствительные схемы, располагаемые на статоре двигателя. При их попадании в зону действия магнитного поля вращающегося ротора на выходе схемы появляется электрический сигнал. В качестве магниточувствительных схем, как правило, применяются микросхемы, содержащие датчики ЭДС Холла и формирующие на выходе сигналы логических уровней «0» или «1». Сигналы от всех чувствительных элементов в определенной последовательности и с частотой, определяемой частотой вращения ротора двигателя, поступают на входы блока СИФУ и обеспечивают требуемый режим переключения полупроводниковых элементов 1–6 инвертора И. В результате магнитное поле статора вращается с той же средней скоростью, что и ротор (синхронно).

Если ВД является исполнительным двигателем электропривода, то от устройства управления на вход СИФУ поступает сигнал задания скорости $U_{з.с}$, управляющий частотой тока на выходе инвертора И, и следовательно, скоростью вращения двигателя.

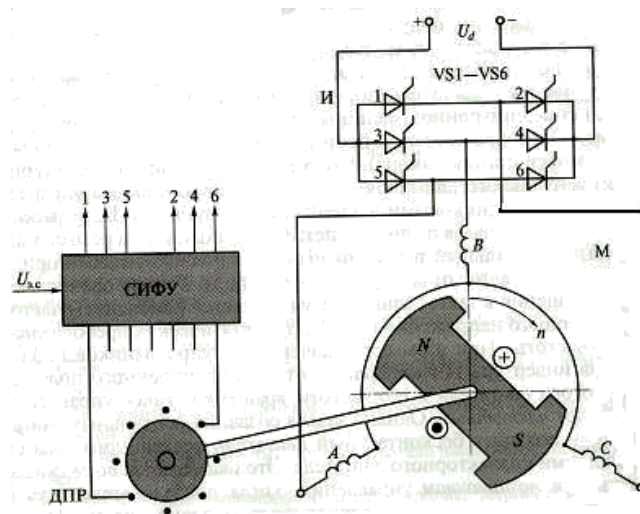


Рис. 3.10 Функциональная схема вентильного двигателя постоянного тока

Если ВД предназначен для включения в сеть трехфазного тока, то трехфазный СД дополняют датчиком положения ротора (рис. 3.11).

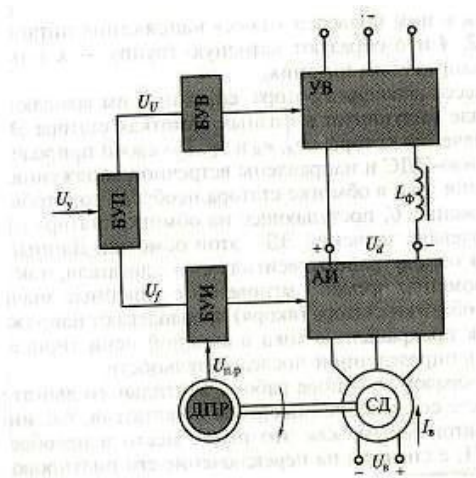


Рис. 3.11 Функциональная схема включения трехфазного ВД

Такой двигатель получает питание от преобразователя частоты со звеном постоянного тока (управляемый выпрямитель УВ). При этом выходные сигналы $U_{n.p}$ от ДПР вводятся в блок управления БУИ автономным инвертором АИ и корректируют сигнал задания частоты вращения U_f в соответствии с пространственным положением ротора. Сигнал от устройства управления U_y подается на вход блока БУП управления частотным преобразователем.

Выводы

1. Схожесть механических характеристик ВД с механическими характеристиками ДПТ и отсутствие коллекторно-щеточного узла у ВД способствуют его широкому внедрению в автоматизированный электропривод.

2. Однако при выборе ВД следует учитывать его большую стоимость и большую сложность управления по сравнению с ДПТ НВ.

3.3.3 Шаговые двигатели

Шаговые двигатели (ШД) — устройства для преобразования последовательности управляющих импульсов в угловые или линейные перемещения. По принципу действия ШД аналогичен СД, но его магнитное поле вращается не непрерывно, а дискретно, шагами. ШД рассчитаны на принудительное вхождение в синхронизм из состояния покоя и принудительное электрическое торможение. Проблемы обеспечения требуемого теплового режима электрических шаговых двигателей не существует, так как они рассчитываются на длительный режим отработки импульсов заданной частоты.

При использовании ШД в электроприводе необходимо знать зависимость частоты приемистости f_{np} от нагрузки на валу двигателя. Частотой приемистости f_{np} называется максимальная частота управляющих импульсов, при которой возможен пуск ШД из неподвижного состояния без выпадения из синхронизма (без пропуска шагов). Чем больше механическая инерция ротора и момент нагрузки на валу, тем меньше частота f_{np} . В справочниках для каждого типа ШД дается график зависимости частоты приемистости от нагрузки на валу.

Основные характеристики ШД:

- угол шага ротора α ;
- количество шагов n на 1 оборот ротора с учетом дробления шага на малых скоростях;
- номинальный момент $M_{ном}$;

- зависимость частоты приемистости f_{np} от момента нагрузки M_c ;
- допуск угловой погрешности $\pm \Delta\alpha$;
- максимальная скорость $\omega_{max} = \alpha f_{np}$.

Выводы

1. ШД широко используются в ЭП, исполнительные органы которых должны совершать строго дозированные перемещения с фиксацией своего положения в конце движения. При этом не требуется широкий диапазон регулирования скорости перемещения исполнительного органа.

2. Шаговый (дискретный) ЭП естественным образом сочетается с микропроцессорами, программными устройствами и управляющими ЭВМ.

3. Шаговый ЭП является разомкнутым, что значительно упрощает его схему.

4 Конструктивные формы исполнения двигателей

После выбора типа двигателя по принципу действия необходимо определить конструктивную форму его исполнения, которая определяется:

- степенью защиты;
- способом охлаждения;
- способом монтажа;
- климатическими условиями эксплуатации;
- местом размещения двигателя при эксплуатации.

4.1 Степень защиты электродвигателей

Система кодификации, применяемая для обозначения степени защиты, обеспечиваемых оболочкой электродвигателей, от доступа к опасным частям, попадания внешних твердых предметов, воды установлена ГОСТ 14254–96 [7].

Степень защиты электродвигателей обозначается двумя буквами *IP* (*International protection*) и двумя цифрами.

Первая цифра обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими частями и от попадания внутрь двигателя твердых веществ. Для электродвигателей напряжением до 1000 В первая цифра может иметь шесть значений:

- 0 — защита отсутствует;
- 1 — защита от случайного соприкосновения большого участка человеческого тела с токоведущими и вращающимися частями;

отсутствует защита от преднамеренного соприкосновения; имеется защита от попадания внутрь твердых тел диаметром более 50 мм;

2 — защита от соприкосновения пальцев человека с токоведущими и вращающимися частями и защита от попадания внутрь двигателя твердых тел диаметром более 12 мм;

3 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями инструмента, проволоки и других предметов, толщина которых превышает 2.5 мм; защита от попадания внутрь двигателя твердых тел диаметром более 2.5 мм;

4 — защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями предметов, толщиной более 1 мм и защита от попадания внутрь двигателя твердых тел толщиной более 1 мм;

5 — полная защита от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и полная защита от вредных отложений пыли внутри машины.

Вторая цифра обозначает степень защиты от попадания внутрь двигателя воды. Существует девять степеней защиты от проникновения воды внутрь двигателя:

- 0 — защита отсутствует;
- 1 — защита от капель сконденсированной воды, падающих вертикально;
- 2 — защита от капель воды, падающих под углом не более 15° к вертикали;
- 3 — защита от дождя, падающего под углом не более 60° к вертикали;
- 4 — защита от брызг воды любого направления;
- 5 — защита от водяных струй в любом направлении;
- 6 — защита от воздействий, характерных для палубы корабля, включая захлестывание морской волной;
- 7 — защита при погружении в воду в течение времени и давления, указанных в стандарте;
- 8 — защита при погружении в воду на неограниченное время при давлении, указанном в стандарте.

Например, обозначение *IP 00* означает, что отсутствуют: специальная защита обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями машины; защита от попадания твердых тел внутрь корпуса и проникновения воды.

Обозначение *IP 21* означает, что машина защищена от проникновения внутрь корпуса пальцев, твердых тел размером более 12 мм, капель воды, падающих вертикально.

4.2 Способы охлаждения электродвигателей

Способы охлаждения двигателей определены ГОСТ 20459-87 [8]. Обозначение этих способов состоит из начальных букв *IC* (*International cooling*) и последующих букв и цифр. Последующая буква обозначает вид хладагента: *A* — воздух, *H* — водород, *N* — азот, *C* — двуокись углерода, *Fr* — фреон, *W* — вода, *U* — масло, *Cr* — керосин.; если хладагентом является *только* воздух, то буква опускается.

Устройства цепи для циркуляции хладагента, обозначаемые *первой цифрой*, и соответствующие определения приведены в Приложении А.

Способы перемещения хладагента, обозначаемые *второй цифрой*, и соответствующие определения приведены в Приложении Б.

Если двигатель имеет несколько цепей охлаждения (например, внутренняя вентиляция и наружный обдув), то в обозначении может быть четыре цифры: две — для обозначения наружной цепи охлаждения и две — для внутренней.

Различают разомкнутые и замкнутые системы охлаждения электрических двигателей.

Рассмотрим примеры некоторых наиболее применяемых разомкнутых систем охлаждения:

IC01 — защищенный двигатель с внутренней самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины;

IC31 — защищенный двигатель с самовентиляцией, вентилятор расположен на валу двигателя, воздух поступает в двигатель и удаляется из него с помощью подводящей и отводящей труб;

IC37 — защищенный двигатель с принудительной вентиляции-ей, воздух поступает в двигатель и удаляется из него с помощью подводящей и отводящей труб, вентилятор приводится во вращение отдельным двигателем;

IC0040 — закрытый двигатель с естественным охлаждением без внешнего вентилятора;

IC0141 — закрытый двигатель с самовентиляцией с внешним вентилятором, расположенным на валу двигателя.

Примеры обозначения замкнутых систем охлаждения:

ICW32A81 — замкнутая система самовентиляции воздухом, водяной охладитель встроен в охлаждаемый двигатель;

ICW37A97 — замкнутая система принудительной вентиляции воздухом, водяной охладитель установлен отдельно от охлаждаемого двигателя.

Применяемые способы охлаждения находятся во взаимосвязи с конструктивными формами исполнения двигателей по способу защиты. Например, для стандартных асинхронных двигателей применяются следующие способы охлаждения:

IC01 — двигатели со степенями защиты *IP20*, *IP22*, *IP23* с вентилиатором, расположенным на валу двигателя;

IC05 — двигатели со степенями защиты *IP20*, *IP22*, *IP23* с пристроенным вентилятором, имеющим независимый привод;

IC0141 — двигатели со степенями защиты *IP43*, *IP44*, *IP54*, *IP55* с наружным вентилятором, расположенным на валу двигателя.

IC0541 — двигатели со степенями защиты *IP43*, *IP44*, *IP54*, *IP55* с пристроенным вентилятором, имеющим независимый привод.

4.3 Способы монтажа электродвигателей

Монтаж двигателей в местах их установки осуществляется обычно на лапах или посредством фланцев. При этом возможно горизонтальное или вертикальное расположение оси вала машины.

Разновидности конструктивного исполнения двигателей по способу монтажа определены ГОСТ 2479-79 [9]. При этом имеется в виду крепление двигателя на месте его установки и способ сочленения с рабочим механизмом.

Условное обозначение состоит из латинских букв *IM* (*International Mounting*) и следующих за ними четырех цифр.

Первая цифра обозначает способ крепления двигателя в месте его установки:

1 — на лапах с подшипниковыми щитами;

2 — на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах);

3 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах); с цокольным фланцем;

4 — без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине;

5 — без подшипниковых щитов;

6 — на лапах с подшипниковыми щитами и со стоячковыми подшипниками;

7 — на лапах со стоячковыми подшипниками (без подшипниковых щитов);

8 — с вертикальным валом, кроме позиций 1, 2, 3, 4 данного перечня;

9 — специальное исполнение по способу монтажа.

Вторая цифра обозначает способ монтажа электродвигателя и имеет значения от 0 до 7.

Третья цифра обозначает направление конца вала двигателя и имеет значения от 0 до 9.

Для каждой из групп электрических машин от *IM1* до *IM9* в соответствии с ГОСТ 2479 установлены значения второй и третьей цифр, которые сведены в соответствующие табл. [9].

Четвертая цифра обозначает количество и исполнение концов валов (под концом вала понимают часть вала, выступающую за внешний подшипник):

0 — без конца вала;

1 — с одним цилиндрическим концом вала;

2 — с двумя цилиндрическими концами вала;

3 — с одним коническим концом вала;

4 — с двумя коническими концами вала;

5 — с одним фланцевым концом вала;

6 — с двумя фланцевыми концами вала;

7 — с фланцевым концом вала на стороне *D* (стороне привода)

и цилиндрическим концом вала на стороне *N* (противоположной стороне *D*);

9 — прочие исполнения концов вала.

Примеры некоторых распространенных видов исполнения двигателей по способу монтажа:

IM1001 — с двумя подшипниковыми щитами на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом;

IM1011 — с двумя подшипниковыми щитами на лапах, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вниз;

IM2001 — с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с фланцем на одном щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом;

IM2131 — с двумя подшипниковыми щитами, на лапах, с фланцем на одном щите, не доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх;

IM3001 — без лап, с двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на одном щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом.

4.4 Климатические условия эксплуатации электродвигателей

Климатические условия эксплуатации электродвигателей определяются следующими параметрами: температура и диапазон ее колебаний, относительная влажность, атмосферное давление, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в окружающей среде коррозионно-активных материалов. Все эти факторы необходимо учитывать при выборе двигателя для ЭП. В соответствии с ГОСТ 15150-69 [10] климатическое исполнение двигателей обозначается буквами (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Обозначения климатических исполнений двигателей

Обозначение	Характеристика
<i>Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше и озерах для макроклиматических районов</i>	
У	с умеренным климатом
ХЛ	с холодным климатом
УХЛ	с умеренным и холодным климатом
ТВ	с влажным тропическим климатом
ТС	с сухим тропическим климатом
Т	как с сухим, так и с влажным тропическим климатом
О	для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)
<i>Электрические машины, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом</i>	
М	с умеренно-холодным морским климатом
ТМ	с морским тропическим климатом, в том числе и на судах каботажного плавания
ОМ	на судах неограниченного района плавания
В	для всех макроклиматических районов на суше и на море

4.5 Место размещения электродвигателей при эксплуатации

В соответствии с ГОСТ 15150-69 [10] место размещения электродвигателей при эксплуатации обозначается цифрой, расположенной после букв, характеризующих климатическое исполнение машины:

1 — на открытом воздухе;

2 — на открытом воздухе или в помещениях, где колебания температуры и влажности несущественно отличаются от этих па-

раметров на открытом воздухе (отсутствует солнечная радиация и атмосферные осадки);

3 — в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий;

4 — в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями;

5 — в помещениях с повышенной влажностью.

5 Предварительный выбор исполнительного двигателя электропривода по требуемой мощности

Расчету требуемой мощности двигателя должны предшествовать выбор типа двигателя (глава 3) и определение конструктивных форм его исполнения (гл. 4).

Требуемая мощность $P_{тр}$ двигателя рассчитывается для заданного режима ($S1 \div S8$) работы электропривода с учетом нагрузочной диаграммы и тахограммы, момента инерции (массы) нагрузки и других исходных данных, приведенных выше в гл. 2. При предварительном выборе двигателя должно соблюдаться условие

$$P_{ном} \geq k_z P_{тр}, \quad (5.1)$$

где $P_{ном}$ — номинальная мощность выбираемого двигателя; $k_z = 1.1 \div 1.3$ — коэффициент запаса.

Поскольку расчет $P_{тр}$ для каждого из режимов имеет свои особенности, детально данная процедура будет рассмотрена ниже (гл. 11 и 12).

Для предварительно выбранного по условию (5.1) двигателя его номинальная мощность

$$P_{ном} = M_{ном} \omega_{ном} \quad (5.2)$$

где $M_{ном}$ — номинальный вращающий момент на валу двигателя, $\omega_{ном}$ — номинальная скорость вращения вала двигателя.

Из выражения (5.2) следует, что два двигателя с одинаковой мощностью $P_{ном}$ могут иметь различные номинальные скорости $\omega_{ном}$ и моменты $M_{ном}$. Поэтому необходимо проверить, подходит ли выбранный двигатель по наибольшей скорости нагрузки $\omega_{н max}$ и требуемому нагрузочному моменту M_n .

6 Проверка соответствия номинальной скорости двигателя заданной скорости нагрузки

Условие согласования скоростей двигателя и нагрузки при вращательном движении нагрузки

$$\omega_{ном} \geq \omega_{н max} \cdot i \quad (6.1)$$

при поступательном движении

$$\omega_{ном} \geq v_{н max} / \rho \quad (6.2)$$

Как правило, для ДПТ НВ характерным является выполнение условия (6.1) или (6.2). Если оно не выполняется, то следует выбрать более быстроходный двигатель той же мощности.

Для трехфазных СД и АД с кз ротором характерным является случай, когда условие (6.1) или (6.2) не выполняется. Тогда определяют новое передаточное отношение редуктора

$$i = \omega_{ном} / \omega_{н max} \quad (6.3)$$

при вращательном движении нагрузки или

$$\rho = v_{н max} / \omega_{ном} \quad (6.4)$$

при поступательном движении нагрузки.

Дальнейшие расчеты выполняются уже с новым значением передаточного отношения редуктора.

7 Проверка предварительно выбранного двигателя на перегрузочную способность и достаточность пускового момента

После предварительного выбора двигателя по мощности становятся известными его параметры и появляется возможность расчета требуемого момента двигателя $M_{двтр}(t)$, учитывающего как движение нагрузки в установившемся режиме, так и ее движение в динамических (переходных) режимах [2,3,4,5].

При вращательном движении нагрузки

$$M_{двтр} = M_{сп} \pm M_{дин} = \frac{M_c}{i \eta_p} \pm (J_{дв} + J_n / i^2) \varepsilon_n \dot{i} \quad (7.1)$$

где знак «+» соответствует режиму пуска (разгона), знак «-» — режиму торможения; M_{cn} — статическая составляющая $M_{\text{двтр}}$, определяющая движение рабочего механизма в установившемся режиме;

$$M_{cn} = \frac{M_c}{i \eta_p} \quad (7.2)$$

i — передаточное отношение редуктора; η_p — КПД редуктора; $M_{дин}$ — динамическая составляющая $M_{\text{двтр}}$, обеспечивающая разгон (торможение) нагрузки с заданным угловым ускорением (замедлением) ε_n ;

$$M_{дин} = (J_{\text{дв}} + J_n i^2) \varepsilon_n i \quad (7.3)$$

$J_{\text{дв}}$, J_n — соответственно моменты инерции ротора (якоря) двигателя и нагрузки.

При поступательном движении нагрузки

$$M_{\text{двтр}} = M_{\pm} = \frac{F_c \rho}{\eta_p} (m_n + J_{\text{дв}} / \rho^2) a_n \rho, \quad (7.4)$$

где

$$M_{cn} = \frac{F_c \rho}{\eta_p} \quad (7.5)$$

$$M_{дин} = (m_n + J_{\text{дв}} / \rho^2) a_n \rho \quad (7.6)$$

m_n и a_n — соответственно масса и линейное ускорение нагрузки; ρ [м/рад] — передаточное отношение редуктора.

Для проверки предварительно выбранного двигателя на перегрузочную способность рассчитывается зависимость $M_{\text{двтр}}(t)$ и строится ее график (рис. 7.1).

При расчете определяются величины динамических моментов при пуске [2]

$$M_{динп} \approx J_{устн} \omega_n / t \quad (7.7)$$

где t_n — время пуска, и в режиме торможения

$$M_{динт} \approx J_{устт} \omega_n / t \quad (7.8)$$

где t_m — время торможения.

По графику $M_{\text{двтр}}(t)$ определяется его максимальное требуемое значение $M_{\text{двтр max}}$ (на рис. 7.1 наибольший момент двигатель должен развивать на участке пуска $M_{\text{двтр max}} = M_n$).

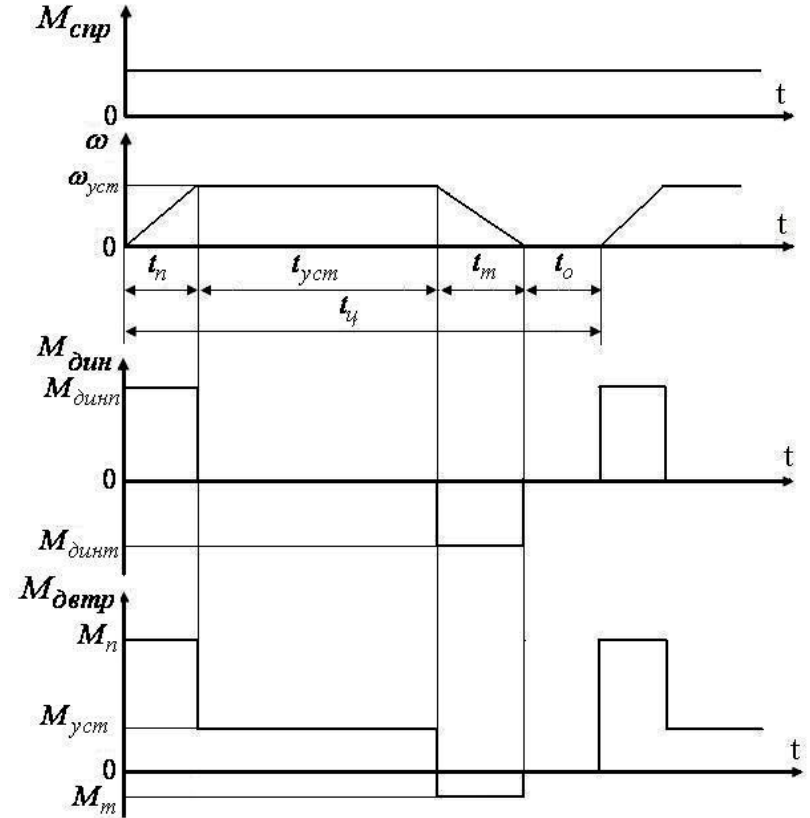


Рис. 7.1 К определению требуемого момента двигателя при проверке его перегрузочной способности

(t_n , $t_{уст}$, t_m , t_n , t_o , $t_ц$ — соответственно времена пуска, установившегося движения, торможения, паузы, цикла)

Проверка двигателя на перегрузочную способность заключается в сопоставлении допустимого (предельного) момента двигателя с максимальным значением $M_{\text{двтр max}}$. Должно выполняться условие

$$M_{\text{доп}} \geq M_{\text{двтр max}} \quad (7.9)$$

Если условие (7.9) выполняется, то двигатель обеспечит заданное ускорение на участке пуска и замедление при торможении, если нет — необходимо выбирать другой двигатель.

Для достаточности пускового момента M_n двигателя необходимо выполнение условия

$M_n > M_{\text{сн}}$ или при вращательном движении нагрузки

$$M_n > \frac{M_c}{i\eta_p} \quad (7.10)$$

при поступательном движении нагрузки

$$M_n > \frac{F_c \rho}{\eta_p} \quad (7.11)$$

7.1 Проверка ДПТ НВ на перегрузочную способность

Для ДПТ НВ предельное значение момента $M_{\text{доп}}$ и перегрузочная способность определяются допустимой величиной тока в якоре $I_{\text{я доп}}$, которая может быть кратковременно допущена в этом двигателе, не вызывая необратимых процессов в коллекторно-щеточном узле.

Для предварительно выбранного ДПТ НВ величина тока $I_{\text{я доп}}$ ($M_{\text{доп}} = c_m I_{\text{я доп}}$) определяется в зависимости от времени его прохождения через коллекторно-щеточный узел.

Для режимов пуска t_n и торможения t_m величина $I_{\text{я доп}}$ определяется в зависимости от их продолжительности:

по формуле (3.9) при $t_n(t_m) \leq 10\text{с}$, т.е. $I_{\text{я доп}} = \frac{I_{\text{я ном}}}{3 \div 4}$ ($M_{\text{доп}} = (3 \div 4)M_{\text{ном}}$):

по формуле (3.10) при $10\text{с} < t_n(t_m) \leq 1\text{мин}$, то есть $I_{\text{я доп}} = (2 \div 2.5)I_{\text{я ном}}$ ($M_{\text{доп}} = (2 \div 2.5)M_{\text{ном}}$)

Точное значение $I_{\text{я доп}}$ ($M_{\text{доп}}$) определяется для конкретного типа двигателя по справочным данным.

Предварительно выбранный двигатель подходит по перегрузочной способности, если выполняется условие (7.9)

$$M_{\text{доп}} \geq M_{\text{двтр max}}$$

Поскольку при выполнении условия (7.9) выбранный двигатель обеспечивает пуск с заданным ускорением, то проверка ДПТ НВ на достаточность пускового момента не требуется.

7.2 Проверка трехфазного АД с кз ротором и трехфазного СД на достаточность пускового момента и перегрузочную способность

Трехфазные АД с кз ротором имеют *физический предел* макси-мального M_{max} и пускового M_n моментов (рис. 3.2).

При включении двигателя в сеть пуск не произойдет, если приведенный к валу двигателя статический момент $M_{\text{сн}}$ превышает пусковой момент M_n .

Следовательно, условием достаточности пускового момента трехфазного АД с кз ротором при вращательном движении нагрузки является выполнение условия (7.10) $M_n > M_c / i\eta_p$ или при поступательном движении нагрузки — выполнение условия (7.11) $M_n > F_c \rho / \eta_p$.

Поскольку, как правило, в справочниках для каждого типа двигателей приводятся значения $M_{\text{ном}}$ и λ_n , то на практике удобнее пользоваться следующими условиями достаточности пускового момента

$$\lambda_n M_{\text{ном}} > M_c / i\eta_p \quad (7.12)$$

или

$$\lambda_n M_{\text{ном}} > F_c \rho / \eta_p \quad (7.13)$$

Чтобы ротор двигателя не остановился, необходимо проверить АД на перегрузочную способность. Поскольку момент трехфазного АД с кз ротором прямо пропорционален квадрату напряжения питания статорной обмотки, то с учетом разрешенного стандартом возможного снижения напряжения питания на 10% проверяется выполнение условия $M_{\text{двтр}} \leq 0.8M_{\text{max}}$ или

$$0.8M_{\text{ном}} \lambda \geq M_{\text{двтр}} \quad (7.14)$$

Трехфазные СД также имеют *физический предел* максимального момента M_{max} (рис. 3.3), при превышении которого двигатель выпадает из синхронизма. В отличие от АД, где момент пропорционален квадрату напряжения питания, момент СД пропорционален напряжению питания в первой степени. Поэтому при про-

верке трехфазного СД на перегрузочную способность пользуются следующими выражениями $M_{\partial в тр} \leq M_{\max}$ или

$$M_{ном} \lambda_m \geq M_{\partial в тр}, \quad (7.15)$$

где для СД нормального исполнения $\lambda_m = 2 \div 2.5$

При асинхронном пуске СД (кривая 2 на рис. 3.3) для достаточности пускового момента как и для асинхронного двигателя должно проверяться соблюдение условия (7.12) или (7.13).

Если для выбранного СД момент вытягивания в синхронизм $M_{\lambda_{ex}}$ меньше пускового M_n , то проверяется условие обеспечения вытягивания в синхронизм

$$M_{ном} \lambda_{ex} > M_{ср} i \eta_p \quad (7.16)$$

или

$$M_{ном} \lambda_{ex} > F / \rho \eta_p \quad (7.17)$$

где $\lambda_{ex} = M_{ex} / M_{ном}$ — кратность входного момента при вытягивании в синхронизм.

Выводы

1. При проверке трехфазного АД с кз-ротором на достаточность пускового момента следует воспользоваться формулой (7.12) или (7.13).
2. При проверке трехфазного СД на достаточность пускового момента при асинхронном пуске следует воспользоваться формулами (7.12) или (7.13) и, если $M_{ex} < M_n$, то формулами (7.16) или (7.17).
3. При проверке трехфазного АД с кз ротором на перегрузочную способность следует воспользоваться формулой (7.14).
4. При проверке трехфазного СД на перегрузочную способность следует воспользоваться формулой (7.15).

8 Проверка выбранного двигателя по нагреву [2,3,4]

При работе двигателя в электроприводе температура его нагрева не должна превышать допустимой, установленной заводом-изготовителем. Соблюдение этого ограничения обеспечивает нормативный срок службы двигателя в пределах от 15 до 20 лет.

Значение допустимой температуры нагрева двигателя, в первую очередь, определяется нагревостойкостью используемых изо-

ляционных материалов. В электродвигателях применяется изоляция нескольких классов, для которых допустимая (нормативная) температура нагрева составляет: для класса *A* — до 105°C, *E* — до 120°C, *B* — до 130°C, *F* — до 155°C, *H* — до 180°C, — свыше 180°C. В настоящее время при изготовлении электродвигателей применяются в основном изоляции классов *B*, *F* и *H*.

Сущность проверки двигателя по нагреву состоит в сопоставлении допустимой для него температуры с его температурой при работе. Обычно оценивается не абсолютная температура, а перегрев τ , который представляет собой разность реальной температуры двигателя t и температуры окружающей среды $t_o . c$

$$\tau = t - t_o . c \quad (8.1)$$

Стандартная температура окружающей среды $t_o . c = 40^\circ C$. Этой температуре соответствует номинальная мощность двигателя, указанная на его щитке.

Двигатель будет работать в допустимом тепловом режиме при выполнении условия

$$\tau_{раб} < \tau_{доп}, \quad (8.2)$$

где $\tau_{доп}$ — допустимый (нормативный) перегрев двигателя, определяемый классом его изоляции; $\tau_{раб}$ — перегрев двигателя при работе.

В качестве $\tau_{раб}$ выбирается средний или максимальный перегрев за время (цикл) работы двигателя. При ориентировании на средний перегрев будет иметь место наиболее полное использование двигателя, хотя в некоторые периоды его работы перегрев будет превышать средний. Если ориентироваться на максимальный перегрев, то рабочий перегрев всегда будет меньше нормативного, но при этом двигатель будет недоиспользован по своей мощности.

Проверка условия (8.2) может быть выполнена *прямым или косвенными методами*.

8.1 Прямой метод проверки двигателя по нагреву

Для использования *прямого метода* необходимо иметь математическую модель теплового режима двигателя, представляющего собой совокупность деталей и узлов различной конфигурации, выполненных из различных материалов, что обуславливает их различные теплоемкости и теплопередачу. Неодинаковыми

являются условия нагрева отдельных частей двигателя, а направление тепловых потоков зависит от режима его работы. Поэтому при тепловых расчетах, как правило, рассматривают упрощенную тепловую модель с введением следующих допущений: двигатель рассматривается как однородное тело, имеющее одинаковую температуру во всех своих точках; в процессе нагрева двигателя температура окружающей среды не изменяется; теплоемкость двигателя и коэффициент его теплоотдачи не зависят от температуры; теплоотдача во внешнюю среду пропорциональна первой степени разности температур двигателя и окружающей среды. При этих условиях уравнение теплового баланса имеет вид [2]

$$\Delta P dt = A \tau dt + C dt, \quad (8.3)$$

где ΔP — потери мощности в двигателе, Вт; A — теплоотдача двигателя, Дж с $^{\circ}\text{C}$; C — теплоемкость двигателя, Дж $^{\circ}\text{C}$.

Как при нагреве (рис. 8.1а), так и при охлаждении (рис. 8.1б) решение уравнения (8.3) имеет вид

$$\tau = (\tau_{\text{нач}} - \tau_{\text{уст}}) e^{-t/T_m} + \tau_{\text{уст}}, \quad (8.4)$$

где $\tau_{\text{уст}} = \Delta P / A$ — установившееся превышение температуры двигателя, $^{\circ}\text{C}$; $T_m = C / A$ — тепловая постоянная времени двигателя, с; при нагреве $T_m = T_n$, при охлаждении $T_m = T_o$; $\tau_{\text{нач}}$ — начальный перегрев двигателя, $^{\circ}\text{C}$.

Поскольку при остановке двигателя условия теплоотдачи изменяются, то изменяется и постоянная времени охлаждения T_o . Количественно ухудшение теплоотдачи при неподвижном роторе характеризуется коэффициентом

$$\beta_o = A_o / A, \quad (8.5)$$

где A_o , A — теплоотдача соответственно при неподвижном роторе и номинальной скорости его вращения. Примерные значения β_o для двигателей приведены в табл. 8.1.

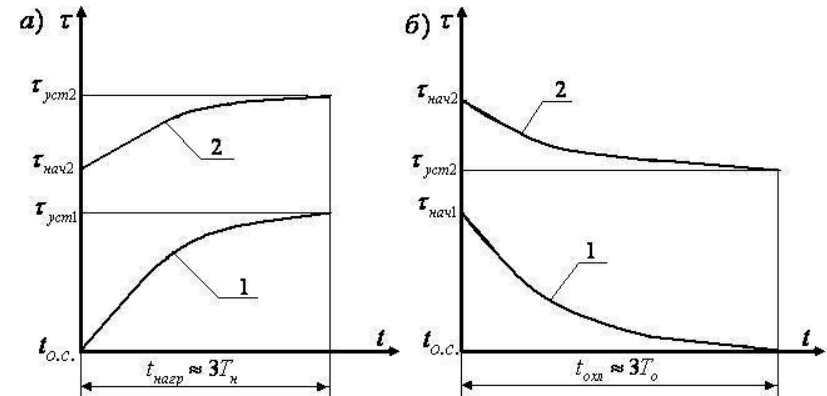


Рис. 8.1 Кривые нагрева (а) и охлаждения (б) двигателя
($t_{o.c.}$ — температура окружающей (охлаждающей) среды; $t_{\text{нагр}}$ — время нагрева двигателя; $t_{\text{охл}}$ — время охлаждения двигателя; T_n, T_o — соответственно постоянные времени нагрева и охлаждения)

Таблица 8.1

Двигатели по способу вентиляции	Значение β_o
С независимой вентиляцией	1
Без принудительного охлаждения	0.95–0.98
Самовентилируемые	0.45–0.55
Защищенные самовентилируемые	0.25–0.35

Постоянные времени нагрева и охлаждения связаны соотношением $T_n = \beta_o T_o$, то есть охлаждение неподвижного двигателя происходит медленнее, чем нагрев.

Практическое использование прямого метода проверки оказывается затруднительным, поскольку в справочниках по двигателям не указываются значения теплоотдачи A и теплоемкости C .

Поэтому в большинстве практических случаев проверка двигателей по нагреву осуществляется косвенными методами (методами средних потерь и эквивалентных величин).

8.2 Косвенные методы проверки двигателя по нагреву

Метод средних потерь является наиболее точным и универсальным из косвенных методов. Сущность этого метода заключается в том, что превышение температуры двигателя определяется средними потерями за цикл ΔP_{cp} , которые сопоставляются

с номинальными потерями $\Delta P_{ном}$, определяющими допустимый перегрев двигателя $\tau_{доп}$. По результату сопоставления делается заключение о нагреве двигателя. Основное расчетное соотношение метода средних потерь, определяющее допустимый нагрев двигателя

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном} \quad (8.6)$$

Если на отдельных участках цикла нагрузка постоянна (рис. 8.2), то средние потери определяются по формуле

$$\Delta P_{cp} = (\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3) / (t_1 + t_2 + t_3) = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i / t_{cy} \quad (8.7)$$

где ΔP_i — мощность потерь на i -ом интервале рабочего цикла; t_i — продолжительность i -го интервала; m — число интервалов в цикле; t_{cy} — время цикла.

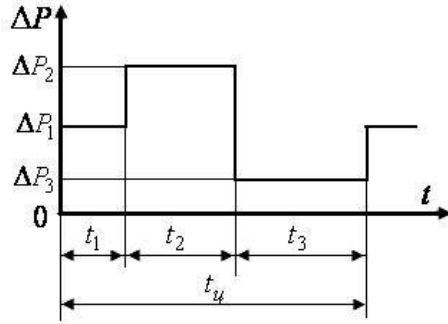


Рис. 8.2 График потерь мощности в течение рабочего цикла

Номинальные потери мощности двигателя определяются по справочным данным

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} (1 - \eta_{л, ном}) \eta_{ном} \quad (8.8)$$

При выполнении условия (8.6) значение τ_{cp} не превышает допустимой величины, то есть $\tau_{cp} \leq \tau_{доп}$. При использовании этого метода тепловой режим работы оценивается по среднему превышению температуры, что обуславливает определенную погреш-

ность метода, поскольку максимальный перегрев двигателя τ_{max} на отдельных участках цикла может превышать средний. Но при часто встречающемся на практике соблюдении условий $t_{cy} \ll T_n$ и $q t_{cy} > 4 T_n$, где q — число циклов, это расхождение незначительно и можно полагать $\tau_{cp} \approx \tau_{max}$.

Если на протяжении цикла теплоотдача двигателя на отдельных интервалах различна, например, в случае изменения скорости самовентилируемого двигателя, средние эквивалентные потери подсчитываются по формуле

$$\Delta P_{cp} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i / \sum_{i=1}^m \beta_i t_i \quad (8.9)$$

где β_i — коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -ом интервале, соответствующий значению скорости ω_i на этом интервале, и приближенно определяемый по формуле

$$\beta = \beta_o + (1 - \beta_o) \phi_1 \omega_{ном} \quad (8.10)$$

где β_o — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе (якоре) (табл. 8.1).

Методы эквивалентных величин основываются на методе средних потерь. Методы эквивалентного тока, эквивалентного момента и эквивалентной мощности используются в зависимости от того, график изменения какой величины известен (по аналогии с графиком на рис. 8.2).

Для метода эквивалентного тока определяют эквивалентный ток

$$I_{эkv} = \sqrt{I_i^2 t_i / t_{cy}}, \quad (8.11)$$

где I_i — ток двигателя на i -ом участке цикла.

Условие $\tau_{cp} \leq \tau_{доп}$ будет выполняться, если

$$I_{эkv} \leq I_{ном} \quad (8.12)$$

Это заключение справедливо, если выполняются следующие условия:

1. Сопротивления всех цепей двигателя остаются неизменными.
2. Потери в стали и на возбуждение постоянны.

Аналогично для метода эквивалентного момента

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{M_i^2 t_i / t_{\text{ц}}}, \quad (8.13)$$

где M_i — момент двигателя на i -ом участке цикла.

Условие $\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{доп}}$ будет выполняться, если

$$M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}} \quad (8.14)$$

Это заключение справедливо, если к двум условиям для $I_{\text{экв}}$ добавляется условие — постоянство магнитного потока двигателя.

Для метода эквивалентной мощности

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{P_i^2 t_i / t_{\text{ц}}}, \quad (8.15)$$

где P_i — мощность двигателя на i -ом участке цикла.

Условие $\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{доп}}$ будет выполняться, если

$$P_{\text{экв}} \leq P_{\text{ном}} \quad (8.16)$$

Это заключение справедливо, если к трем условиям для $M_{\text{экв}}$ добавляется условие — постоянство или малое изменение скорости двигателя в рассматриваемом цикле работы.

Выводы

1. Двигатель эксплуатируется в допустимом тепловом режиме, если его перегрев при работе не превышает допустимый (нормативный) перегрев, определяемый классом его изоляции (8.2).

2. Перегрев двигателя при нагреве (охлаждении) происходит по экспоненциальной зависимости (8.4) с постоянными времени нагрева T_n или охлаждения T_o .

3. На практике проверка двигателей на нагрев осуществляется одним из косвенных методов в зависимости от того, график изменения какой величины задан:

- методом средних потерь; превышение температуры двигателя определяется средними потерями за цикл $\Delta P_{\text{ср}}$, номинальные потери $\Delta P_{\text{ном}}$ определяют допустимый перегрев двигателя $\tau_{\text{доп}}$; основное расчетное соотношение метода средних потерь (8.6), определяющее допустимый нагрев двигателя

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

- методами эквивалентных величин:

- методом эквивалентного тока, где основное расчетное соотношение (8.12), определяющее допустимый нагрев двигателя $I_{\text{экв}} \leq I_{\text{ном}}$;

- методом эквивалентного момента, где основное расчетное соотношение (8.14), определяющее допустимый нагрев двигателя $M_{\text{экв}} \leq M_{\text{ном}}$;

- методом эквивалентной мощности, где основное расчетное соотношение (8.16), определяющее допустимый нагрев двигателя $P_{\text{экв}} \leq P_{\text{ном}}$.

9 Расчет потерь мощности и энергии в исполнительном двигателе в установившемся режиме работы электропривода

Представим потери мощности в электрическом двигателе в виде суммы постоянных K и переменных V потерь [2]. К постоянным потерям относят потери в магнитопроводе, механические потери в подшипниках, вентиляционные потери, потери в обмотках возбуждения двигателя постоянного тока независимого возбуждения и синхронного двигателя. В реальности, постоянные потери не являются неизменными, так как зависят от скорости вращения, частоты питающего напряжения и других факторов. Однако в процессе работы они изменяются незначительно. Поэтому обычно их принимают равными номинальным

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}}, \quad (9.1)$$

где $V_{\text{ном}}$ — переменные потери мощности двигателя при работе в номинальном режиме; $\Delta P_{\text{ном}}$ — потери двигателя в номинальном режиме, определяемые по его паспортным данным

$$\Delta P_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}}) \eta_{\text{ном}} \quad (9.2)$$

Переменными V называются потери в обмотках двигателя при протекании по ним токов, определяемых механической нагрузкой двигателя.

Для ДПТ НВ переменные потери мощности

$$V_{\text{дпт нв}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} \quad (9.3)$$

где $I_{\text{я}}$, $R_{\text{я}}$ — ток и сопротивление якорной цепи соответственно.

Для трехфазных АД с П-образной схемой замещения [2] пере-менные потери составят

$$V_{ad} = V_1 + V_2 = 3I_1^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = 3I_2'^2 R_1 + 3I_2'^2 R_2' = V_2 \left(\frac{R_1}{R_2'} + 1 \right), \quad (9.4)$$

где I_1, I_2' — соответственно ток статора и приведенный к обмотке статора ток ротора, R_1, R_2' — соответственно активное фазное сопротивление обмотки статора и приведенное к обмотке статора фазное сопротивление обмотки ротора.

Учитывая, что переменные потери мощности V_2 в роторе АД могут быть определены как разность между электромагнитной мощностью двигателя $P_{эм} = M_{дв} \omega_0$ и мощностью на его валу $P_{дв} = M_{дв} \omega$

$$V_2 = M_{дв} \omega_0 - M_{дв} \omega = M_{дв} \omega_0 \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = M_{дв} \omega_0 s \quad (9.5)$$

выражение (9.4) представим в виде

$$V_{ad} = M_{дв} \omega_0 s \left(\frac{R_1}{R_2'} + 1 \right), \quad (9.6)$$

где $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ — скольжение АД.

Выражение (9.6) позволяет рассчитать переменные потери мощности в АД по известным моменту, скорости идеального холостого хода, скольжению и величинам сопротивлений R_1, R_2' . Значения сопротивлений могут быть определены по номинальным параметрам двигателя

$$R_2' = M_{2ном} \frac{\omega_{сх}}{\omega_{2ном}} \frac{1}{I_2'^2} = M_{2ном} \frac{\omega_{сх}}{\omega_{2ном}} \frac{1}{\beta I_1^2} \cos^2 \phi \quad (9.7)$$

$$R_1 = [(3U_{1ф}^2 / 2\omega_0 M_{\max})^2 - X_{к.з.}^2] / (3U_{1ф}^2 / \omega_0 M_{\max}), \quad (9.8)$$

где индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$X_{к.з.} = U_{1ф} / I_{1ном} \cos \phi_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}); \lambda_m = M_{\max} / M_{ном}$$

В трехфазных синхронных двигателях переменные потери мощности составят [4]

$$V = 3I_1^2 R_1 = 3I_1^2 \frac{R_1}{I_1} = V_{1ном} \left(\frac{I_1}{I_{1ном}} \right)^2 = V_{1ном} \left(\frac{I}{I_{1ном}} \right)^2, \quad (9.9)$$

где I_1, R_1 — соответственно ток и активное сопротивление фазы обмотки статора.

9.1 Расчет потерь мощности и энергии в исполнительном двигателе в установившемся режиме работы нерегулируемого электропривода

Предлагается следующий порядок расчета потерь мощности и энергии в двигателе в установившемся режиме работы в нерегулируемом приводе:

1. В зависимости от типа двигателя величина переменных потерь V определяется по одной из формул (9.3) или (9.6), или (9.9) — по значениям параметров в рабочей точке.

2. По одной из этих формул находим переменные потери в номинальном режиме $V_{ном}$.

3. По формуле (9.2) определяем общие потери мощности двигателя в номинальном режиме $\Delta P_{ном}$.

4. Из выражения (9.1) находим постоянные потери мощности K в двигателе.

5. Общие потери мощности в двигателе в рабочей точке будут равны

$$\Delta P_{общ} = K + V \quad (9.10)$$

6. При работе двигателя в течение времени t_p с постоянной нагрузкой потери энергии ΔW составят

$$\Delta W = \Delta P_{общ} \cdot t_p \quad (9.11)$$

Если двигатель работает с циклически изменяющейся нагрузкой, то полные потери энергии за цикл определяются из выражения

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \Delta P_{i общ} t_{ip}, \quad (9.12)$$

где $\Delta P_{i общ}$ — потери мощности при работе на i -ом участке, t_{ip} —

время работы двигателя на i -ом участке, n — число участ-ков.

Пример 9.1. Рассчитать потери мощности и энергии в асинхронном двигателе типа 4АН160S4 при работе на естественной характеристике с приведенным моментом сопротивления

$M_c = 0.9 M_{ном}$ в течение 5 мин. Номинальные параметры двигателя: мощность $P_{ном} = 18.5 \text{ кВт}$; скорость $n_{ном} = 1450 \text{ об/мин}$; ток статора $I_{1ном} = 36.5 \text{ А}$; КПД $\eta_{ном} = 88\%$; $\cos \phi_{ном} = 0.87$; $\lambda = M_{\max} / M_{ном} = 2.1$; число пар полюсов $p = 2$.

Решение

1. Для асинхронного двигателя величину потерь мощности в рабочей точке определим из выражения (9.6)

$$V = M_{\text{об}} \omega_0 s \left(\frac{R}{R_2' + 1} + 1 \right) = 110 \cdot 157 \cdot 0.03 \cdot \left(\frac{0.05}{0.21 + 1} + 1 \right) = 641 \text{ Вт},$$

где в установившемся режиме

$$M_{\text{об}} = M_c = 0.9 M_{\text{ном}} = 0.9 \cdot 122 = 110 \text{ Нм};$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с};$$

величину скольжения в рабочей точке линейного участка механической характеристики АД определим из выражения

$$s = \frac{M \cdot s}{M_{\text{ном}}} = \frac{110 \cdot 0.033}{122} = 0.03; \\ s_{\text{ном}} = \frac{(\omega_0 - 0.105 n_{\text{ном}})}{\omega_0} = \frac{(157 - 152)}{157} = 0.033; \\ \text{где } M_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{0.105 n_{\text{ном}}} = \frac{18500}{152} = 122 \text{ Нм};$$

величину R_1 определим из выражения (9.8)

$$R_1 = [(3U_1^2 \phi / 2\omega_0 M_{\text{мах}})^2 - X_{\text{к.з.}}^2] / (3U_1^2 \phi / \omega_0 M_{\text{мах}}) = \\ [(3 \cdot 220^2 / 2 \cdot 157 \cdot 2.1 \cdot 122)^2 - 1.755^2] / (3 \cdot 220^2 / 157 \cdot 2 \cdot 122) = 0.05 \text{ Ом}; \\ X_{\text{к.з.}} = U_1 \phi / I_{\text{ном}} \cos \phi (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 220 / 36.5 \cdot 0.87 \cdot (2.1 + \sqrt{1.1^2 - 1}) = 1.755 \text{ Ом};$$

Величину R_2' определим из выражения (9.7)

$$R_2' = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} / 3 I_1^2 \cos^2 \phi_{\text{ном}} = 122 \cdot 157 \cdot 0.033 / 3 \cdot 36.5^2 \cdot 0.87^2 = 0.21 \text{ Ом}$$

2. По формуле (9.6) определяем величину переменных потерь в номинальном режиме работы

$$V_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} \left(\frac{R_1}{R_2' + 1} + 1 \right) = 122 \cdot 157 \cdot 0.033 \cdot \left(\frac{0.05}{0.21 + 1} + 1 \right) = 783 \text{ Вт}$$

3. По формуле (9.2) определяем общие потери двигателя в номинальном режиме

$$\Delta P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}} (1 - \eta_{\text{ном}})}{\eta_{\text{ном}}} = \frac{18500 \cdot (1 - 0.88)}{0.88} = 2523 \text{ Вт}$$

4. Из выражения (9.1) находим постоянные потери мощности в двигателе

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} = 2523 - 783 = 1740 \text{ Вт}$$

5. Общие потери мощности в двигателе в рабочей точке определяем по формуле (9.10)

$$\Delta P_{\text{общ}} = K + V = 1740 + 641 = 2381 \text{ Вт}$$

6. Потери энергии за время работы $t_p = 5 \text{ мин}$ составят (9.11)

$$\Delta W = \Delta P_{\text{общ}} \cdot t_p = 2381 \cdot 300 = 714 \text{ кДж}$$

Пример 9.2. ДПТ НВ типа 2ПН-132 имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{ном}} = 5.5 \text{ кВт}$; $U_{\text{ном}} = 110 \text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 59 \text{ А}$; $n_{\text{ном}} = 1500 \text{ об/мин}$; $\eta_{\text{ном}} = 80\%$; $R_{\text{я}} = 0.146 \text{ Ом}$; $J = 0.05 \text{ кг·м}^2$. Определить переменные потери энергии в якоре двигателя за цикл работы, в котором он в течение времени $t_1 = 10 \text{ мин}$ работает с моментом нагрузки $M_{c1} = 0.6 M_{\text{ном}}$, в течение времени $t_2 = 3 \text{ мин}$ работает с номинальной нагрузкой $M_{c2} = M_{\text{ном}}$, в течение времени $t_3 = 15 \text{ мин}$ работает с моментом нагрузки $M_{c3} = 0.8 M_{\text{ном}}$. Ток возбуждения двигателя в цикле не изменяется и равен номинальному.

Решение

Поскольку магнитный поток двигателя не изменяется, то для линейных механических (электромеханических) характеристик можно найти токи в цепи якоря на отдельных участках цикла из соотношения $I_i / I_{\text{ном}} = M_{ci} / M_{\text{ном}}$, где I_i , M_{ci} — соответственно ток в якоре и момент нагрузки на i -ом участке цикла.

Следовательно,

$$I_1 = I_{\text{ном}} M_{c1} / M_{\text{ном}} = 59 \cdot 0.6 = 35.4 \text{ А};$$

$$I_2 = I_{\text{ном}} = 59 \text{ А};$$

$$I_3 = I_{\text{ном}} M_{c3} / M_{\text{ном}} = 59 \cdot 0.8 = 47.2 \text{ А}.$$

Потери энергии в обмотке якоря за цикл составят (9.12)

$$\Delta W = \sum_{i=1}^3 \Delta P_{i \text{ общ}} t_i = \sum_{i=1}^3 I_i^2 R_{\text{я}} t_i = 0.146 \cdot (35.4^2 \cdot 600 + 59^2 \cdot 180 + 47.2^2 \cdot 900) = 493.8 \text{ кДж}$$

9.2 Расчет потерь мощности и энергии в исполнительном двигателе в установившемся режиме работы регулируемого электропривода

По критерию значения потерь мощности и энергии способы регулирования скорости могут быть разделены на экономичные (малые потери) и неэкономичные (существенные потери) [2]. К экономичным способам относятся, например, частотное регулирование скорости АД и СД, регулирование скорости ДПТ НВ с помощью управляемых преобразователей напряжения.

9.2.1 Потери мощности в трехфазном АД с кз ротором при управлении от преобразователя частоты

Регулирование скорости приводит к изменению постоянных потерь K в двигателе. Для трехфазного АД с кз ротором к постоянным потерям относятся механические потери K_m , потери в стали статора K_{c1} и ротора K_{c2} и потери в меди обмотки статора от намагничивающего тока I_0

$$K = K_m + K_{c1} + K_{c2} + 3I_0^2 R \quad (9.13)$$

Без большой погрешности для определения механических потерь K_m можно воспользоваться следующей приближенной формулой

$$K_m \approx K_{mном} (\omega / \omega_{ном})^2, \quad (9.14)$$

где $K_{mном}$ — механические потери при номинальной скорости.

Суммарные потери K_c в стали АД

$$K_c = K_{c1} + K_{c2}$$

При частотном способе регулирования скорости АД рабочее скольжение двигателя остается небольшим во всем диапазоне регулирования и потерями в стали ротора из-за малой частоты можно пренебречь, $K_{c2} = 0$. При частотном регулировании и $U_1 / f_1 = const$

$$K_c = K_{c1ном} (f / f_{1ном})^{3.3}, \quad (9.15)$$

где $K_{c1ном}$ — потери в стали статора при номинальной частоте $f_{ном}$ и напряжении питания $U_{ном}$.

В произведении $I_0^2 R_1$ величина R_1 определяется из (9.8), а I_0 из зависимости

$$I_0 \approx I_{1ном} [\sin \phi - (\cos \phi / 2 \lambda_m)] \quad (9.16)$$

Если регулирование скорости частотным способом осуществляется при $M_c \approx M_{ном} = const$, то перепад скорости $\Delta \omega = \omega_0 s \approx \omega_0 s_{ном}$ и полные переменные потери остаются неизменными и равными номинальным

$$V_{ад} = V_{ном} = M_{ном} \omega_0 s_{ном} (1 + R_1 / R_2) \quad (9.17)$$

При $\omega > \omega_{ном}$ ($f_1 > f_{ном}$) полные потери мощности становятся больше номинальных. Для их определения в приведенные выше формулы следует подставить соответствующие значения ω и f_1 .

9.2.2 Потери мощности в ДПТ НВ при управлении от преобразователя напряжения.

Постоянные потери мощности ДПТ НВ складываются из потерь в цепи возбуждения K_v , механических потерь K_m и потерь в стали K_c . Потери в цепи возбуждения

$$K_v = U_{ов}^2 / R_{ов} = const, \quad (9.18)$$

где $U_{ов}$ — напряжение питания обмотки возбуждения; $R_{ов}$ — активное сопротивление цепи обмотки возбуждения.

Потери K_m и K_c зависят от скорости

$$K_m + K_c \approx (K_m + K_c)_{ном} (\omega / \omega_{ном})^2, \quad (9.19)$$

где $(K_m + K_c)_{ном}$ — потери при номинальной скорости двигателя. При регулировании скорости ДПТ НВ изменением напряжения при постоянном моменте нагрузки $M_c = const = M_{ном}$ ток якоря остается неизменным и равным номинальному. Тогда переменные потери

$$V_{дпня} = I_{яном}^2 R_{я} = const \quad (9.20)$$

Приведенные выше выражения значительно упрощают расчет потерь мощности и энергии в двигателях регулируемых электроприводов.

Выводы

Способы регулирования скорости трехфазных АД с кз ротором от преобразователей частоты и скорости ДПТ НВ с помощью управляемых преобразователей напряжения являются экономичными.

1. При регулировании скорости трехфазного АД с кз ротором частотным методом при $M_c \approx M_{ном} = const$ и $\omega \leq \omega_{ном}$ полные потери ($K + V$) не превышают номинальных.

2. При регулировании скорости ДПТ НВ с помощью управляемых преобразователей напряжения при $M_c \approx M_{ном} = const$ и $\omega \leq \omega_{ном}$ полные потери мощности не превышают номинальных.

3. При регулировании скорости трехфазного АД с кз ротором и ДПТ НВ при $\omega > \omega_{ном}$ полные потери ($K + V$) превышают номинальные и для их определения в формулы, приведенные в разделах 9.2.1 и 9.2.2, следует подставить соответствующие значения входящих в них параметров.

10 Расчет потерь мощности и энергии в электрическом двигателе в переходных режимах работы электропривода

Работа электроприводов многих механизмов сопровождается переходом из одного установившегося состояния к другому, происходящему во время пуска, реверсирования, торможения, резкого приложения или сброса нагрузки на валу двигателя. Эти режимы называются *переходными*, и, как правило, сопровождаются большими бросками момента и тока, что приводит к значительным потерям энергии. Повышенные потери в двигателе вызывают его дополнительный нагрев. Поэтому для электроприводов с частыми переходными процессами важна оценка энергетических потерь в этих режимах.

Расчет потерь энергии электропривода в переходных режимах представляет собой достаточно сложную задачу, поскольку их величина зависит от значений ряда параметров (продолжительности переходного процесса, величины статической нагрузки и характера ее изменения, моментов инерции вращающихся частей, начальной и конечной частоты вращения и др.). Поэтому при расчете потерь в переходных режимах будем принимать некоторые упрощения и допущения.

Исследование потерь в переходных режимах выполним на идеализированной модели привода. При этом влиянием электромагнитных процессов в двигателях пренебрегаем, поскольку, с

одной стороны, их учет приводит к необходимости решения сложных нелинейных дифференциальных уравнений, что значительно усложняет процедуру выбора двигателя электропривода; с другой стороны, они протекают значительно быстрее электромеханических процессов и в первом приближении их влиянием на выходную координату электропривода можно пренебречь [2,3,4,5].

При анализе потерь энергии в двигателе в переходных режимах выделим два подхода:

1. Фактор, вызывающий переходный процесс изменяется мгновенно (скачком), то есть намного быстрее, чем изменяется скорость ω .

2. Фактор, вызывающий переходный процесс изменяется «медленно», то есть темп его изменения соизмерим с темпом изменения скорости ω .

10.1 Потери энергии в двигателе при скачкообразном изменении фактора, вызывающего переходный процесс

Потери энергии в двигателе за время переходного процесса t_{nn} определяются из выражения

$$\Delta W = \int_0^{t_{nn}} K dt + \int_0^{t_{nn}} V dt = \Delta W_k + \Delta W_v,$$

где ΔW_k , ΔW_v — потери энергии, обусловленные постоянными и переменными потерями мощности соответственно.

Полагаем, что за время переходного процесса постоянные потери мощности K практически не изменяются. Тогда

$$\Delta W_k = K \cdot t_{nn} \quad (10.1)$$

При оценочных расчетах переменных потерь ΔW_v в переходных режимах при $M_c \neq 0$ пользуются следующим выражением

$$\Delta W_v = \frac{J \omega^2}{2} (s_{нач}^2 - s_{кон}^2) \frac{M_{ср}}{M_c} \quad (10.2)$$

где $s_{нач}$, $s_{кон}$ — соответственно начальное и конечное скольжения АД или начальная и конечная относительные скорости ДПТ

$$s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0 \quad (10.3)$$

$M_{ср}$ — средний, неизменный за время переходного процесса момент двигателя, при котором продолжительность переходного

процесса остается той же самой, что и при реальном изменении момента двигателя.

Знак « $\leftarrow$ » в знаменателе (10.2) соответствует процессу пуска, а знак « $\rightarrow$ » — процессу торможения, когда момент сопротивления действует согласно с моментом двигателя.

Величина M_{cp} определяется по заданным нагрузочной диаграмме, тахограмме (рис. 7.1), приведенному к валу двигателя моменту инерции нагрузки J_n и моменту инерции ротора (якоря) $J_{\partial\delta}$ выбираемого двигателя.

Величина среднего момента M_{cp}^n при пуске двигателя с нулевой начальной скорости $\omega_{нач} = 0$ до конечной скорости $\omega_{кон} = \omega_{уст}$

$$M_{cp}^n \approx M_{cn} + J \omega_{y\text{cm}} / t_n, \quad (10.4)$$

где, t_n — определяемое по тахограмме время пуска (рис. 7.1);

приведенный момент инерции $J = J_{\partial\delta} + J_n / i^2$.

Величина M_{cp}^n при пуске двигателя от $\omega_{нач} = 0$ до $\omega_{кон} = \omega_{уст}$ за время разгона t_{p1}

$$M_{cp}^n \approx M_{cn} + J (\omega_2 - \omega_1) / t_{p1} \quad (10.5)$$

При динамическом торможении двигателя момент двигателя $M_{\partial\delta}$ и M_{cn} направлены в одну сторону, $d\omega/dt < 0$ и величина среднего момента $M_{cp}^{\partial m}$ при динамическом торможении двигателя

от $\omega_{нач} = \omega_{уст}$ до $\omega_{кон} = 0$ за время t_m (рис. 7.1) выражения (10.6) определяется из

$$M_{cp}^{\partial m} \approx M_{cn} - J \omega_{y\text{cm}} / t_m \quad (10.6)$$

Аналогично при торможении противовключением с $\omega_{нач} = \omega_{уст}$ до $\omega_{кон} = 0$ за время t_m

$$M_{cp}^{mn} \approx M_{cn} - J \omega_{y\text{cm}} / t_m \quad (10.7)$$

Процесс реверсирования двигателя от скорости $\omega_{нач} = \omega_{уст}$ до скорости $\omega_{кон} = -\omega_{уст1}$ включает торможение противовключением от $\omega_{нач} = \omega_{уст}$ до $\omega_{кон} = 0$ и пуск от $\omega_{нач} = 0$ до $\omega_{кон} = -\omega_{уст1}$. Следовательно, средний момент M_{cp} при реверсировании определяется из выражения

$$M_{cp}^p = M_{cp}^{mn} + M_{cp}^n = 2M_{cn} + J [(\omega_{уст1} / t_n) - (\omega_{уст} / t_m)] \quad (10.8)$$

Пользуясь формулой (10.2) определим потери энергии в переходных режимах при скачкообразном изменении задающего воздействия.

10.1.1 Переменные потери при пуске под нагрузкой

При пуске ЭП с нагрузкой ($M_c \neq 0$) разгон осуществляется от начальной скорости $\omega_{нач} = 0$ ($s_{нач} = 1$) до конечной скорости $\omega_{кон} = \omega_{уст} < \omega_0$ ($0 < s_{кон} < 1$), величина которой определяется ординатой точки пересечения механической характеристики двигателя $\omega = f(M_{\partial\delta})$ с нагрузочной характеристикой M_c (рис. 3.1а, 3.4а).

Поскольку переменные потери в статоре асинхронного двигателя ΔW_{cm} и потери ΔW_p в его роторе связаны соотношением $\Delta W_{cm} = \Delta W_p R_1 / R_2$, то полные переменные потери энергии при пуске трехфазного АД с кз ротором в соответствии с формулой (10.2) составят

$$\Delta W_{ад}^n = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{2}\right) \cdot \frac{M_{cp}^n}{M_{cp}^n - M_{cn}} \cdot \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{\omega_{уст}^2 - \omega_{нач}^2}, \quad (10.9)$$

где средний момент при пуске трехфазного АД с кз ротором M_{cp}^n ад определяется из (10.4).

Величина M_{cp}^n ад может быть определена по механической характеристике двигателя [2] (рис. 3.4а)

$$M_{cp}^n \text{ ад} = \frac{(\lambda_n + \lambda_m) M_{ном}}{2} = \frac{M + M_{max}}{2} \quad (10.10)$$

При работе АД на холостом ходу ($M_{cn} = 0$) величина $s_{кон} = 0$ и полные переменные потери АД при пуске $\Delta W_{ад}^n$ составят (10.9)

$$\Delta W_{ад}^n = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{2}\right) \cdot \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{\omega_{уст}^2 - \omega_{нач}^2} \quad (10.11)$$

Полные переменные потери энергии при одноэтапном пуске ДПТ НВ составят (10.2)

$$\Delta W_{дпт}^n = \frac{J\omega^2}{2} \cdot (1 - s^2) \cdot \frac{M_{cp}^n}{M_{cp}^n - M_c}, \quad (10.12)$$

где средний момент при пуске определяется из (10.4).

При пуске ДПТ НВ на холостом ходу ($M_{cn} = 0$) величина $s_{кон} = 0$ и полные переменные потери ДПТ $\Delta W_{дпт}^n$ составят (10.9)

$$\Delta W_{дпт}^n = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \frac{\omega_{кон}^2 - \omega_{нач}^2}{\omega_{уст}^2 - \omega_{нач}^2} \quad (10.13)$$

Анализ выражения (10.13) показывает, что потери энергии при пуске количественно равны кинетической энергии движущихся механических частей ЭП в конце пуска.

Выводы

1. Потери энергии при пуске под нагрузкой (10.9) и (10.12) увеличиваются по сравнению с потерями энергии при пуске в режиме холостого хода (10.11) и (10.13).

2. Потери энергии пропорциональны моменту инерции J движущихся частей электропривода. Поэтому для снижения потерь энергии в электроприводах с частыми пусками целесообразным является использование малоинерционных двигателей, например, двигателей с уменьшенным диаметром ротора (якоря).

3. Потери энергии при пуске пропорциональны ω_0^2 . Поэтому в нерегулируемом приводе их можно уменьшить, применив поэтапный пуск. Например, для двухскоростных АД, у которых синхронные скорости вращения различаются в два раза ($\omega_{12} = 2\omega_{11}$), экономичнее пуск производить не сразу до скорости ω_{12} , а в два этапа: на первом этапе двигатель разгоняется до скорости ω_{11} , а на втором — до ω_{12} . В этом случае расход энергии при пуске двигателя сокращается в два раза (пример 10.1). Аналогичный результат получается и при ступенчатом пуске ДПТ НВ с помощью пусковых резисторов R_n . При этом следует учитывать, что часть потерь, пропорциональная $R_n (R_{я} + R_n)$, рассеивается в виде тепла в пусковом резисторе.

В общем случае, если скорость идеального холостого хода ω_0 в переходном процессе имеет n ступеней регулирования, потери энергии в роторе (якоре) уменьшаются в n раз по сравнению с прямым пуском.

Пример 10.1. Рассчитать переменные потери энергии при прямом и ступенчатом пусках на высшую скорость при $M_c = 0$ двухскоростного АД с кз ротором, который имеет следующие технические данные: $P_{ном} = 2.5 \text{ кВт}$; $n_{o1} = 1500 \text{ об/мин}$; $n_{o2} = 3000 \text{ об/мин}$; $J = 0.23 \text{ кг·м}^2$; $R = 1.6$.

Решение

1. Определяем низшую и высшую угловые синхронные скорости АД

$$\omega_{o1} = \pi n_{o1} / 30 = 157 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{o2} = \pi n_{o2} / 30 = 314 \text{ рад/с}.$$

2. Полные переменные потери в АД при прямом пуске и $M_{cn} = 0$ (10.11)

$$\Delta W_{nad} = \frac{J\omega^2}{2} \left(1 + \frac{R}{R'}\right) = 0.23 \cdot 314^2 \cdot (1 + 1.6)/2 = 29480 \text{ Дж}.$$

3. Потери при ступенчатом

пуске: а) пуск до скорости ω_{o1}

$$\Delta W_{n1} = 0.23 \cdot 157^2 \cdot (1 + 1.6)/2 = 7370 \text{ Дж};$$

б) пуск от ω_{o1} до ω_{o2}

$$\Delta W_{n2} = 0.23 \cdot 157^2 \cdot (1 + 1.6)/2 = 7370 \text{ Дж};$$

в) суммарные потери при ступенчатом пуске

$$\Delta W_{n\Sigma} = \Delta W_{n1} + \Delta W_{n2} = 14740 \text{ Дж}.$$

$\Delta W_{n\Sigma} = \Delta W_{nad} / 2$, то есть потери энергии при ступенчатом пуске двухскоростного АД в два раза меньше потерь при прямом пуске.

1.1.2 Переменные потери при динамическом торможении под нагрузкой

Полные переменные потери энергии при динамическом торможении трехфазного АД с кз ротором составят

$$\Delta W_{ad}^{\partial m} = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{R'}\right) \cdot \left(1 - s_{нач}^2\right) \cdot \frac{M_{cp}^{\partial m}}{M_{cp}^{\partial m} + M_{сн}} \quad (10.14)$$

Среднее значение момента асинхронного двигателя при динамическом торможении $M_{cp}^{\partial m}$ определяется из (10.6). Для обеспечения режима динамического торможения необходимо соблюдение условия

$$M_{cp}^{\partial m} \leq M_{кдт} \quad (10.15)$$

где $M_{кдт}$ — значение максимального момента при динамическом торможении (рис. 3.5б).

Требуемую для обеспечения заданного тормозного момента величину постоянного тока в обмотке статора можно определить из (3.23) — (3.26).

При динамическом торможении АД на холостом ходу $M_{сн} = 0$, $s_{нач} = 0$ полные переменные потери

$$\Delta W_{0\partial\partial}^{\partial m} = \frac{J\omega_0^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{R_2}\right) \quad (10.16)$$

Полные переменные потери энергии при динамическом торможении ДПТ НВ (рис. 3.2б) составят

$$\Delta W_{\partial m}^{\partial m} = \frac{J\omega_0^2}{2} \cdot (1 - s_{нач}^2) \cdot \frac{M_{ср}^{\partial m}}{M_{ср}^{\partial m} + M_{сн}} \quad (10.17)$$

где $M_{ср}^{\partial m}$ — средний момент при динамическом торможении ДПТ НВ, определяемый из выражения (10.6); $s_{нач} = \omega_0 - \omega_{уст}$

ω_0 . При динамическом торможении АД на холостом ходу $M_{сн} = 0$, $s_{нач} = 0$ полные переменные потери

$$\Delta W_{0\partial\partial m}^{\partial m} = \frac{J\omega_0^2}{2} \quad (10.18)$$

Пример 10.2. Рассчитать полные переменные потери энергии в трехфазном АД типа 4АН160 S4 при динамическом торможении от $\omega_{нач} = \omega_{ном}$ до $\omega_{кон} = 0$ за время $t_{\partial m} = 1$ с. Приведенные момент сопротивления $M_{сн}^{пр} = M_{ном}$ и момент инерции нагрузки $J_H = 9 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$. Номинальные параметры двигателя: $P_{ном} = 18.5 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 1450 \text{ об/мин}$ ($\omega_{ном} = 152 \text{ рад/с}$); $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$; $I_{ном} = 36.5 \text{ А}$; $\lambda_{м} = M_{\max} / M_{ном} = 2.1$; $J_{\partial\partial} = 9.25 \cdot 10^{-2} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $R_1 / R_2 = 0.24$; число пар полюсов $p = 2$.

Решение

Полные переменные потери энергии в АД при динамическом торможении составят (10.14)

$$\Delta W_{\partial m}^{\partial m} = \frac{J\omega_0^2}{2} \cdot (1 - s_{нач}^2) \cdot \left(\frac{R_1}{R_2} + 1\right) \cdot \frac{M_{ср}^{\partial m}}{M_{ср}^{\partial m} + M_{сн}} =$$

$$\frac{18.25 \cdot 10^{-2} \cdot 157^2}{2} \cdot (1 - 0.032^2) \cdot (0.24 + 1) \cdot \frac{149.7}{149.7 + 122} = 1532 \text{ Дж},$$

где

$$J = J_{\partial\partial} + J_H = 9 + 9.25 \cdot 10^{-2} = 18.25 \cdot 10^{-2} \text{ кг}\cdot\text{м}^2;$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{2} = 157 \text{ рад/с};$$

$$s_{нач} = s_{ном} = \frac{(\omega_0 - \omega_{ном})}{\omega_{ном}} = \frac{(157 - 152)}{157} = 0.032;$$

$$M_{ср}^{\partial m} = M_{сн} - J \omega_{уст} / t_{\partial m} = 122 - 18.25 \cdot 10^{-2} \cdot 152 / 1 = 122 + 27.7 = 94.3 \text{ Нм};$$

$$M_{сн} = M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = 18500 / 152 = 122 \text{ Нм}$$

Пример 10.3. Рассчитать переменные потери энергии в якоре ДПТ НВ типа 2ПН-132 при динамическом торможении от $\omega_{нач} = \omega_{уст}$ до $\omega_{кон} = 0$ за время $t_{\partial m} = 1$ с. Приведенный момент инерции нагрузки $J_H = 0.3 J_{я}$; момент нагрузки $M_{сн} = 0.9 M_{ном}$. Параметры двигателя: $P_{ном} = 5.5 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 1500 \text{ об/мин}$; $U_{ном} = 110 \text{ В}$; $I_{ном} = 59 \text{ А}$; $I_{\partial\partial} = 3 I_{ном}$; $R_{я} = 0.146 \text{ Ом}$; $J_{я} = 0.05 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Решение

Переменные потери энергии в якоре ДПТ НВ при динамическом торможении составят (10.17)

$$\Delta W_{\partial m}^{\partial m} = \frac{J\omega_0^2}{2} \cdot (1 - s_{нач}^2) \cdot \frac{M_{ср}^{\partial m}}{M_{ср}^{\partial m} + M_{сн}} =$$

$$= \frac{0.065 \cdot 170^2}{2} \cdot (1 - 0.07^2) \cdot \frac{21.2}{21.2 + 31.5} = 376 \text{ Дж};$$

где $J = J_{я} + J_H = 1.3 \cdot 0.05 = 0.065 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$;

$$\omega_0 = U / c_e = 110 / 0.65 \approx 170 \text{ рад/с};$$

$$c_e = (U - I_{ном} R_{я}) / \omega_{ном} = (110 - 59 \cdot 0.146) / 157 = 0.65 \text{ В}\cdot\text{с}\cdot\text{рад};$$

$$\omega_{ном} = \pi n_{ном} / 30 = \pi \cdot 1500 / 30 = 157 \text{ рад/с};$$

$$s_{нач} = (\omega_0 - \omega_{уст}) / \omega_0 = (170 - 158) / 170 = 0.07;$$

для линейной механической характеристики

$$\omega_{уст} = \omega_0 - (M_{сн} / M_{ном}) \cdot (\omega_0 - \omega_{ном}) = 170 - 0.9 \cdot (170 - 157) = 158 \text{ рад/с};$$

$$M_{ср}^{\partial m} = M_{сн} - J \omega_{уст} / t_{\partial m} = 0.9 \cdot 35 - 0.065 \cdot 158 / 1 = 31.5 + 10.3 = 21.2 \text{ Нм}$$

10.1.3. Переменные потери при торможении противовключением

В соответствии с (10.2) формула для определения полных переменных потерь энергии в трехфазном АД с кз ротором при торможении противовключением (рис. 3.6б)

$$\Delta W_{ад}^{mn} = \frac{J\omega^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{R}\right) \cdot (s_{нач}^2 - 1) \cdot \frac{M_{ср}^{mn}{}_{ад}}{M_{ср}^{mn}{}_{ад} + M_c}, \quad (10.19)$$

где в соответствии с (10.7) $M_{ср}^{mn}{}_{ад} \approx M_{сн} - J \omega_{ycm} / t_m$

При торможении противовключением АД на холостом ходу $M_{сн} = 0$, $s_{нач} = (-\omega_0 - \omega_0) / \omega_0 = -2$ и полные переменные потери

$$\Delta W_{0ад}^{mn} = \frac{3J\omega^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{R}\right) \quad (10.20)$$

Полные переменные потери энергии при торможении противовключением ДПТ НВ (рис. 3.3б) составят

$$\Delta W_{дпт}^{mn} = \frac{J\omega^2}{2} \cdot (s_{нач}^2 - 1) \cdot \frac{M_{ср}^{mn}{}_{дпт}}{M_{ср}^{mn}{}_{дпт} + M_{сн}}, \quad (10.21)$$

где $M_{ср}^{mn}{}_{дпт}$ — средний момент при торможении противовключением ДПТ НВ, определяемый из выражения (10.7).

При торможении противовключением ДПТ НВ на холостом ходу $M_{сн} = 0$, $s_{нач} = -2$, полные переменные потери

$$\Delta W_{0дпт}^{mn} = \frac{3J\omega^2}{2} \quad (10.22)$$

Выводы

Сравнение выражений (10.16) и (10.20), (10.18) и (10.22) позволяет сделать вывод о том, что потери энергии при торможении противовключением в три раза больше потерь энергии при динамическом торможении.

Однако, режим торможения противовключением обеспечивает более эффективное торможение и более просто технически реализуем, особенно, при использовании регулируемых преобразователей.

10.2 Потери энергии в двигателе при «медленном» изменении фактора, вызывающего переходный процесс

Современные регулируемые (замкнутые) электроприводы постоянного и переменного тока базируются на системе «полупроводниковый управляемый преобразователь — двигатель». К таким системам относятся:

- управляемый преобразователь напряжения — двигатель постоянного тока (УПН — ДПТ);
- преобразователь частоты — асинхронный двигатель (ПЧ—АД);
- преобразователь частоты — синхронный двигатель (ПЧ—СД).

В таких электроприводах имеется возможность существенного сокращения потерь в переходных режимах за счет плавного изменения скорости идеального холостого хода, что достигается соответствующим изменением напряжения или частоты на выходе управляемых преобразователей.

Наибольший эффект дает частотное управление трехфазным АД с кз ротором по сравнению с другими способами управления. Исследования показали [3], что *практически потери энергии за время переходного процесса достигают минимума при токах в обмотке статора приблизительно в 1.5–2 раза больше номинального и оптимальном скольжении.*

В общем случае расчет потерь энергии в системе «полупроводниковый управляемый преобразователь — двигатель» представляет собой непростую задачу, так как требует решения с помощью вычислительных средств сложных нелинейных дифференциальных уравнений.

В частном случае, при пуске двигателя вхолостую и линейном нарастании скорости холостого хода $\omega_0 = \omega_{0нач} + \varepsilon \cdot t$ (ε — темп (производная) изменения ω_0) выражение для потерь энергии будет иметь вид [4]

$$\Delta W_{0пл}^n = \Delta W_{0мн}^n \cdot 2T / t, \quad (10.23)$$

где $\Delta W_{0пл}^n$ — потери энергии при ступенчатом изменении ω_0 , T_m — механическая постоянная времени привода, t_n — время нарастания скорости холостого хода от $\omega_{0нач}$ до ω_0 .

Отметим, что выражение (10.23) справедливо лишь при $t_n \gg T_m$; при иных условиях следует использовать более точные модели.

Практический интерес представляет исследование работы двигателя в переходных режимах в ЭП, построенном по принципу подчиненного регулирования.

Такие ЭП нашли широкое применение не только во всех видах систем регулирования скорости и положения приводов постоянного тока, но и во всех системах переменного тока. Для ЭП с подчиненным регулированием промышленностью выпускаются унифицированные блочные системы регулирования, содержащие необходимый для технической реализации набор готовых усилителей, датчиков, источников питания, задатчиков интенсивности (ЗИ), функциональных блоков.

Пример функциональной схемы электропривода подчиненного регулирования с ДПТ НВ представлен на рис. 10.1.

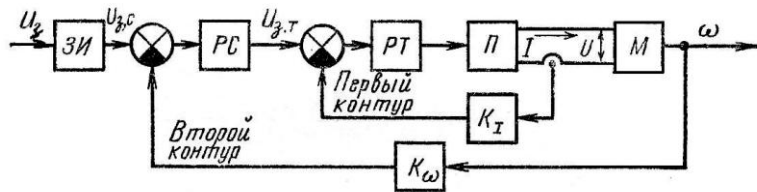


Рис. 10.1 Функциональная схема электропривода подчиненного регулирования

Система имеет два контура регулирования: первый (внутренний) контур — контур регулирования тока якоря двигателя I . Этот контур содержит регулятор тока PT , управляемый преобразователь напряжения Π , якорную цепь двигателя M с напряжением на якоре U и жесткую обратную связь (ЖОС) по току с коэффициентом передачи K_I .

Второй контур (внешний) — контур регулирования угловой скорости ω двигателя. Ему подчинен первый контур. Второй контур содержит регулятор скорости PC , первый контур, двигатель M и ЖОС по скорости с коэффициентом передачи K_{ω} . Задающим сигналом для второго контура является сигнал задания угловой скорости $U_{3,c}$, а для первого — сигнал с выхода регулятора скорости $U_{3,T}$.

Настройка контура включает выбор типа регулятора и расчет его параметров [3]. Настройку производят так, чтобы получить технически оптимальный переходный процесс (настройка на тех-

нический оптимум). Технически оптимальным считается такой переходный процесс, при котором время t_1 изменения регулируемой величины от 0 до установившегося значения было бы минимально возможным при перерегулировании σ , не превышающем 4-10% (рис. 10.2).

Такой переходный процесс при ступенчатом входном воздействии является компромиссным между процессом более быстрым, но с большим перерегулированием, и процессом с меньшим перерегулированием, но более медленным.

Из теории автоматического управления известно, что характер переходного процесса замкнутой системы определяется соотношением постоянных времени элементов системы [11]. Оптимальному процессу соответствуют оптимальные соотношения постоянных времени, то есть коэффициентов характеристического уравнения системы.

При указанном в табл. 10.1 соотношении коэффициентов характеристических уравнений характер переходного процесса определяется не всеми членами уравнения, а вырожденным характеристическим уравнением второго порядка.

Используемая в таблице 10.1 постоянная времени T_1 — наименьшая постоянная времени первого (самого внутреннего) контура системы. Для электропривода на рис. 10.1 $T_1 = (0.004 \div 0.01) \text{ с}$, она отражает инерционность системы фазового управления выпрямителем, запаздывание (дискретность) выпрямителя и инерционность датчика тока и регулятора.

Как видно из табл. 10.1, уравнения не содержат никаких других постоянных кроме T_1 . Следовательно, все другие постоянные компенсированы и заменены нужными. Естественно, что физически существующую инерционность можно устранить, только изъяв ее из системы, что невозможно. Но можно компенсировать влияние больших инерционностей системы, используя форсиров-

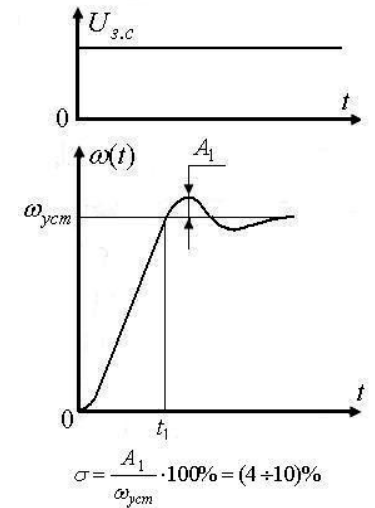


Рис. 10.2 К определению технически оптимального переходного процесса

ку переходного процесса в данном элементе за счет увеличения напряжения, момента и т. п. Полная компенсация невозможна, по-этому и производят операцию замены большой постоянной времени меньшей, но требуемого значения.

Исходная система, как правило, не обладает оптимальным соотношением постоянных времени. Поэтому, нужно подобрать такой тип регулятора и с такими параметрами, чтобы получить характеристические уравнения, приведенные в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Качество управления при технически оптимальном
переходном процессе

Порядок уравнения	Вырожденное характеристическое уравнение	Время регулирования t_1	Перерегулирование σ , %
2	$2T_1 p (T_1 p + 1) + 1$	$4.7T_1$	4.33
3	$4T_1 p (2T_1 p + 1) + 1$	$7.6T_1$	8
4	$8T_1 p (4T_1 p + 1) + 1$	$14.4T_1$	6.2

Настройка осуществляется для каждого контура отдельно, начиная с первого (внутреннего). На практике обычно используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор) тока с передаточной функцией

$$W_{pm}(p) = \frac{Tp + 1}{KT_O p} \quad (10.24)$$

С целью компенсации наибольшей постоянной времени первого контура, как правило, электромагнитной постоянной времени $T_{\text{я}}$, выбирают $T_O = T_{\text{я}}$ (форсировку для этой компенсации будет создавать регулятор РТ, воздействуя на преобразователь П). Электромагнитная постоянная времени $T_{\text{я}}$, где $L_{\text{я}}$ — индуктивность якорной цепи, включающая индуктивности обмотки якоря и сглаживающего дросселя.

Характеристическое уравнение контура скорости (второй контур на рис. 10.1) при ПИ-регуляторе с фильтром на входе получается четвертого порядка [3]. Следовательно, время регулирования скорости $t_1 = 14.4T_1$, а перерегулирование $\sigma = 6.2\%$ (табл. 10.1).

Расчет переменных потерь в переходных режимах в двигателе электропривода с подчиненным регулированием весьма затрудни-

телен из-за сложности расчета момента двигателя с учетом алгоритма управления и индуктивности якорной цепи. Такой расчет можно сделать с использованием пакетов типа *Mathlab*, *Simulink* и других.

Однако, при проверке выбранного двигателя по нагреву целесообразно использовать приближенный метод расчета переменных потерь в двигателе электропривода с подчиненным регулированием, который заключается в следующем.

1. Для внешнего контура (рис. 10.1) строим график изменения скорости $\omega = f(t)$ при пуске (технически оптимальный процесс для системы четвертого порядка, рис. 10.3). Для практически приемлемого электропривода, в соответствии с требованием теории автоматического управления [11], задаемся величиной показателя

колебательности $M = A_1 / A_2 = 1.5$ (рис. 10.3)

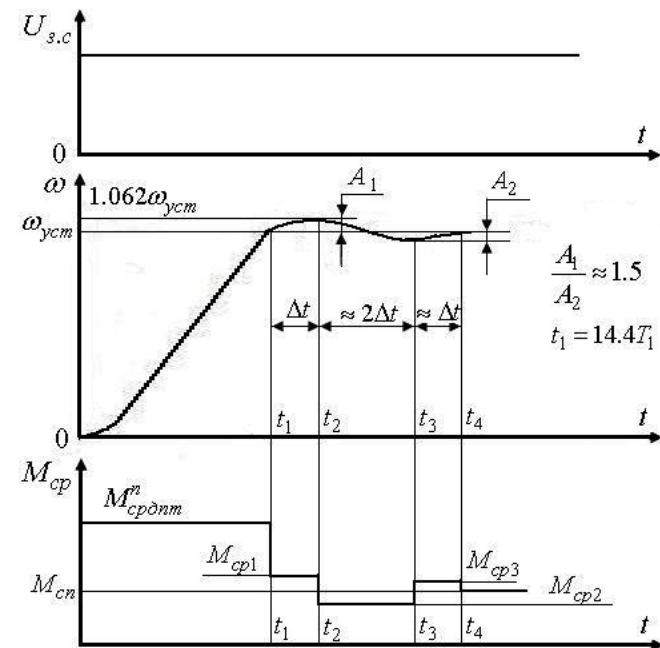


Рис. 10.3 К определению среднего момента при пуске электропривода с подчиненным регулированием

2. Определяем средний момент ДПТ НВ при пуске $M_{cp\partial nm}^n$, который обеспечивает требуемый технически оптимальный процесс при скачкообразном изменении задающего сигнала $U_{3.c}$

Анализ графика $\omega = f(t)$ при технически оптимальном переходном процессе показывает, что его можно разделить на четыре временных участка (рис. 10.3):

1. Участок разгона от $\omega = 0$ до $\omega = \omega_{ycm}$; протяженность этого участка равна $t_1 = 14.4T_1$ (табл. 10.1); средний момент двигателя

$$M_{cp\partial nm}^n = M_{cn} + J \omega_{ycm} / t_1.$$

2. Участок разгона от $\omega = \omega_{ycm}$ до $\omega = 1.062 \omega_{ycm}$ при $t_1 < t < t_2$ ($\sigma = 6.2\%$ из табл. 10.1); полагаем протяженность этого участка равной Δt ; $M_{cp1} = M_{cn} + 0.062 J \omega_{ycm} / \Delta t$.

3. Участок торможения от $\omega = 1.062 \omega_{ycm}$ до $\omega = 0.959 \omega_{ycm}$ при показателе колебательности $M=1.5$; полагаем протяженность этого участка $\approx 2\Delta t$;

$$M_{cp2} \approx M_{cn} - (0.062 + \frac{0.062}{1.5}) J \omega_{ycm} / 2 \Delta t \approx M_{cn} - 0.103 J \omega_{ycm} / 2 \Delta t$$

4. Участок разгона от $\omega = 0.959 \omega_{ycm}$ до $\omega = \omega_{ycm}$; полагаем протяженность этого участка $\approx \Delta t$; $M_{cp3} \approx M_{cn} + 0.041 J \omega_{ycm} / \Delta t$.

Определим суммарный средний момент для 2-го, 3-го и 4-го участков

$$M_{cp2-4} \approx \frac{M_{cp1} \cdot \Delta t + M_{cp3} \cdot 2\Delta t + M_{cp3} \cdot \Delta t}{4\Delta t} \approx \frac{M_{cn} \cdot \Delta t + 0.062 J \omega_{ycm} + M_{cn} \cdot 2\Delta t - 0.103 J \omega_{ycm} + M_{cn} \cdot \Delta t + 0.041 J \omega_{ycm}}{4\Delta t} \approx M_{cn}$$

Поскольку $M_{cp2-4} \approx M_{cn}$, то с точки зрения потерь мощности участок от t_1 до t_4 следует рассматривать как участок установившегося движения.

Таким образом, средний момент двигателя при пуске $M_{cp\partial nm}^n$ в системе с подчиненным регулированием равен

$$M_{cp\partial nm}^n = M_{cn} + J \omega_{ycm} / t_1 \quad (10.25)$$

В соответствии с формулой (10.12) полные переменные потери энергии при пуске ДПТ НВ в электроприводе подчиненного регулирования не превысят

$$\Delta W_{\partial nm}^n \leq \frac{J \omega_{ycm}^2}{2} \cdot [1 - (\frac{\omega_0 - \omega_{ycm}}{\omega_0})^2] \cdot \frac{M_{cp\partial nm}^n}{M_{cp\partial nm}^n - M_{cn}} \quad (10.26)$$

Для трехфазного АД с кз ротором полные переменные потери энергии при пуске АД (10.9) в ЭП подчиненного регулирования не превысят величины

$$\Delta W_{\partial nm}^n \leq \frac{J \omega_{ycm}^2}{2} \cdot (1 + \frac{R}{R_{\text{кон}}}) \cdot (1 - s_{\text{кон}}^2) \cdot \frac{M_{cp\partial nm}^n}{M_{cp\partial nm}^n - M_{cn}} \quad (10.27)$$

Аналогично в режимах торможения при подчиненном регулировании средний момент $M_{cp\partial m}^m$ следует определять только для временного интервала Δt_m с момента начала торможения от $\omega = \omega_{ycm}$ до момента, когда скорость достигает значения $\omega = 0$

$$t_m = M_{cn} - J \omega_{ycm} / \Delta t_m \quad (10.28)$$

Полные переменные потери энергии при торможении ДПТ НВ в ЭП подчиненного регулирования не превысят величины

$$\Delta W_{\partial nm}^m \leq \frac{J \omega_{ycm}^2}{2} \cdot [1 - (\frac{\omega_0 - \omega_{ycm}}{\omega_0})^2] \cdot \frac{M_{cp\partial m}^m}{M_{cp\partial m}^m + M_{cn}} \quad (10.29)$$

Для трехфазного АД с кз ротором полные переменные потери энергии при торможении АД в ЭП подчиненного регулирования не превысят величины

$$\Delta W_{\partial nm}^m \leq \frac{J \omega_{ycm}^2}{2} \cdot (1 + \frac{R}{R_{\text{кон}}}) \cdot (1 - s_{\text{кон}}^2) \cdot \frac{M_{cp\partial m}^m}{M_{cp\partial m}^m + M_{cn}} \quad (10.30)$$

Выводы

1. В общем случае, при плавном изменении ω_0 потери энергии в переходных режимах в 3–5 раз меньше, чем при ступенчатом изменении этого параметра.

2. Полные переменные потери энергии в ЭП с подчиненным регулированием в переходных режимах могут быть оценены по формулам (10.26) и (10.29) для ДПТ НВ и (10.27) и (10.30) для трехфазного АД с кз ротором.

3. На практике ЭП подчиненного регулирования строятся не более чем из 3-х контуров (момента, скорости и положения). Каждый внутренний контур подчинен следующему по порядку внешнему. Достоинства ЭП подчиненного регулирования определяются возможностью реализации следующих процедур:

- раздельная настройка контуров, начиная с первого самого внутреннего контура;
- коррекция переходных процессов в каждом контуре, что существенно упрощает практическую настройку системы;
- раздельное регулирование переменных.

11 Выбор типа двигателя для заданного режима работы электропривода

11.1 Выбор типа двигателя при продолжительном номинальном режиме работы S1

Продолжительным номинальным режимом работы S1 электрического двигателя называется его режим работы при неизменной нагрузке, продолжающийся столько времени, что превышения температуры всех его частей достигают установившегося значения $\tau_{уст}$. Продолжительность паузы роли не играет. Признаком режима S1 является выполнение условия $t_p > 3T_n$, где t_p – время работы двигателя, T_n – постоянная времени нагрева двигателя.

В режиме S1 нагрузка может быть неизменной или переменной.

11.1.1 Выбор двигателя, работающего в режиме S1 при неизменной нагрузке [3,4,5]

Существуют механизмы (насосы, вентиляторы, транспортеры и др.), работающие продолжительно с неизменной или мало изменяющейся нагрузкой $M_c = const$ без регулирования скорости $\omega_n = const$ ($n_n = const$). На рис. 11.1 представлены графики изменения требуемой для работы механизма полез-

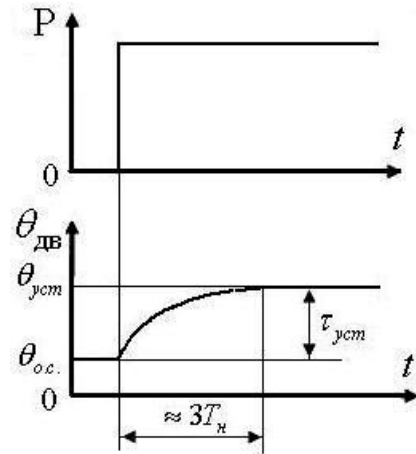


Рис. 11.1 Графики зависимости $P(t)$ и $\theta_{дв}(t)$ в режиме S1 при неизменной нагрузке

ной мощности P и температуры двигателя $\theta_{дв}$ в течение продолжительного режима работы с неизменной нагрузкой, где перегрев двигателя $\tau_{уст} = \theta_{уст} - \theta_{ос.с.}$.

В общем случае, расчетная мощность

$$P_{расч} [кВт] = \frac{M_c \omega_n}{\eta_{мех}} \times 10^{-3} = 0.105 \times \frac{M_c n_n}{\eta_{мех}} \times 10^{-3}, \quad (11.1)$$

где $\eta_{мех}$ – КПД механизма, включая редуктор.

Расчетная мощность двигателя для привода насоса определяется по формуле

$$P_{расч} [кВт] = \frac{V \gamma H g}{\eta_{нас} \eta_{пер}} \times 10^{-3}, \quad (11.2)$$

где V – подача насоса, $м^3/с$; γ – плотность перекачиваемой жидкости, $кг/м^3$; H – расчетная высота подъема, $м$; $\eta_{нас}$ – КПД насоса (для поршневых 0.8 – 0.9; центробежных высокого давления 0.5–0.8; низкого давления 0.3–0.6); $\eta_{пер}$ – КПД передачи от двигателя к насосу; $g \neq 9.8 м/с^2$ – ускорение силы тяжести.

Расчетная мощность двигателя для привода вентилятора

$$P_{расч} [кВт] = \frac{V p}{\eta_{вент} \eta_{пер}} \times 10^{-3}, \quad (11.3)$$

где p – давление на выходе вентилятора, $Па$; $\eta_{вент}$ – КПД вентилятора (от 0.3 до 0.8 – меньшие значения относятся к вентиляторам малой и средней мощности).

Выбор двигателя по мощности выполняется из условия

$$P_{ном} \geq P_{расч}, \quad (11.4)$$

где $P_{ном}$ – номинальная мощность выбираемого двигателя.

Кроме того, для выбираемого двигателя должно соблюдаться условие

$$\omega_{ном} \geq \omega_{нпр}, \quad (11.5)$$

где $\omega_{нпр}$ – приведенная к валу двигателя скорость нагрузки.

С соблюдением условий (11.4) и (11.5) по каталогу выбирают двигатель с ближайшим большим значением номинальной мощности по отношению к $P_{расч}$, обеспечивающий требуемую частоту вращения.

При соблюдении условия (11.4) и условий эксплуатации, соответствующих техническим условиям выбранной серии двигателей, установившееся значение температуры двигателя не пре-

вышает нормативной величины $\theta_{доп}$, т.е.

т.е., при постоянной продолжительной нагрузке *не требуется* дополнительных расчетов по определению нагрева двигателя.

Пусковые потери мощности не могут сказаться на нагреве двигателя, поскольку в продолжительном режиме работы пуск двигателя происходит редко.

Иногда встречаются механизмы, имеющие повышенный момент сопротивления при трогании с места. В этом случае необходимо выполнить проверку выбранного двигателя на достаточность пускового момента.

Пример 11.1. Выбрать трехфазный асинхронный двигатель для привода механизма, работающего в продолжительном режиме S1. По условиям эксплуатации требуется двигатель закрытого исполнения IP44 с горизонтальным расположением вала и фланцевым креплением. Привод нерегулируемый, статический нагрузочный момент механизма $M_c = 45 \text{ Нм}$, требуемая частота вращения $n_n = 1450 \pm 10 \text{ об/мин}$, КПД механизма $\eta_{мех} = 0.75$.

Решение

1. По формуле (11.1) определяем расчетную мощность двигателя

$$P_{расч} [\text{кВт}] = 0.105 \times \frac{M_c}{\eta_{мех}} \times 10^{-3} = 0.105 \times \frac{45 \times 1450}{0.75} \times 10^{-3} = 9.14 \text{ кВт}$$

2. По условиям (11.4) и (11.5) выбираем асинхронный двигатель 4A132M4УЗ серии 4A закрытого исполнения IP44 с горизонтальным расположением вала и фланцевым креплением (исполнение по способу монтажа IM3031). Его номинальная мощность $P_{ном} > P_{расч}$ ($11 \text{ кВт} > 9.14 \text{ кВт}$) и номинальная частота вращения $n_{ном} > n_n$ ($1460 \text{ об/мин} > 1450 \text{ об/мин}$).

При соблюдении условия (11.4) и условий эксплуатации, соответствующих техническим условиям выбранной серии двигателей, установившееся значение температуры двигателя не превышает нормативной величины.

11.1.2 Выбор двигателя, работающего в режиме S1 при переменной нагрузке [3,4,5]

В таком режиме работают электроприводы металлорежущих станков (рис. 11.2). При расчете номинальной мощности двигателя используют либо метод средних потерь, либо метод эквивалентных величин (тока, момента или мощности).

Установим следующий порядок выбора двигателя при переменной нагрузке.

1. Выбор типа двигателя по конструктивным требованиям и условиям эксплуатации (гл. 3).

2. Предварительный выбор типа двигателя по мощности и наибольшей скорости нагрузки

Используя нагрузочную диаграмму (рис. 11.2), определяем среднее значение мощности

$$P_{ср} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_k t_k}{t_1 + t_2 + \dots + t_k} = \frac{\sum_{i=1}^k P_i t_i}{\sum_{i=1}^k t_i} \quad (11.6)$$

Номинальную мощность выбираемого двигателя определяем в соответствии с выражением

$$P_{ном} = k_3 P_{ср} = (1.1 \div 1.3) P_{ср}, \quad (11.7)$$

где k_3 — коэффициент запаса.

Предварительно выбираемый двигатель должен иметь номинальную скорость $\omega_{ном}$, которая обеспечивает заданную скорость нагрузки. Так при регулировании скорости вниз от номинальной (нагрузка типа $M_c = \text{const}$) должно выполняться условие $\omega_{ном} \geq \omega_{н \max}$ или $\omega_{ном} \geq \frac{v_{н \max}}{r}$, где $\omega_{н \max}$, $v_{н \max}$ — наибольшие скорости нагрузки соответственно при вращательном и поступательном движениях.

При регулировании скорости вверх от номинальной (нагрузка типа $P = \text{const}$) должно выполняться условие $\omega_{ном} \geq \omega_{н \min}$ или $\omega_{ном} \geq \frac{v_{н \min}}{r}$, где $\omega_{н \min}$, $v_{н \min}$ — наименьшие скорости нагрузки соответственно при вращательном и поступательном движениях.

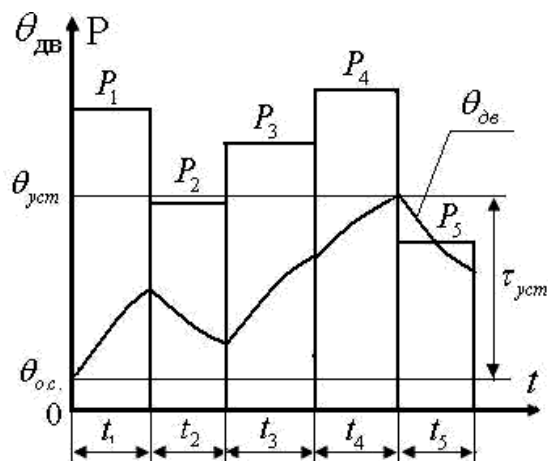


Рис. 11.2 Графики зависимости мощности $P(t)$ и температуры двигателя $\theta_{дв}(t)$ в режиме S1 при переменной нагрузке

3. Проверка выбранного двигателя по нагреву

По каталогу определяем КПД выбранного двигателя $\eta_{ном}$ в но-минальном режиме. Рассчитываем потери $\Delta P_{ном}$ при номинальной нагрузке

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} \left[\frac{1}{\eta_{ном}} - 1 \right] \quad (11.8)$$

Определяем потери ΔP_i на участках нагрузочной диаграммы $P_1, P_2, \dots, P_i$

$$\Delta P_i = P_i \left[\frac{1}{\eta_i} - 1 \right] \quad (11.9)$$

Формулой (11.9) пользуются, если в каталоге или справочнике приведены графики или таблицы зависимости КПД от нагрузки.

Если таких справочных данных нет, то можно воспользоваться приближенной формулой

$$\Delta P_i = \Delta P_{ном} \frac{\gamma + \beta_i^2}{\gamma + 1} \quad (11.10)$$

где β_i^2 — коэффициент нагрузки, определяемый по нагрузочной диаграмме, $\beta_i^2 \approx \frac{P_i}{P_{ном}}$; $\gamma = \Delta P_{ном} / \Delta P_{пер}$ — коэффициент, опреде-

ляемый по табл. 11.1, равный отношению постоянных потерь $\Delta P_{пост}$ к переменным $\Delta P_{пер}$.

Таблица 11.1

Приблизительные значения γ для различных двигателей

Тип двигателя	Значение γ
Асинхронные двигатели общего назначения с короткозамкнутым ротором	0.5—0.7
Асинхронные двигатели крановые с короткозамкнутым ротором	0.4—0.5
Двигатели постоянного тока независимого возбуждения	0.5—0.9
Двигатели постоянного тока крановые	1.0—1.5

Примечание. Большие значения γ соответствуют двигателям большой мощности.

После определения по формуле (11.9) или (11.10) потерь мощности на всех участках нагрузочной диаграммы рассчитывают средние потери двигателя

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (11.11)$$

Чтобы перегрев двигателя не превышал допустимый, должно выполняться условие

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном} \quad (11.12)$$

Если условие (11.12) не выполняется, то выбирают двигатель большей мощности и расчет повторяют.

4. Проверка двигателя на перегрузочную способность и доста-точность пускового момента

Если перегрев двигателя не превышает допустимый ($\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}$), но на i -м участке нагрузочной диаграммы мощность $P_i > P_{ном}$, то требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

Для ДПТ НВ:

а) определяется величина тока $I_{яi}$ в обмотке якоря на i -м участке нагрузочной диаграммы

$$I_{яi} = P_i / \omega_c \quad (11.13)$$

- б) по нагрузочной диаграмме определяется длительность i -го участка t_i ;
 в) проверяется выполнение условия (3.9) или (3.10)

$$I_{\text{я}i} \leq I_{\text{я доп}} \text{ при } t_i \leq t_m$$

где величины $I_{\text{я доп}}$ и t_m для выбираемого двигателя определяются по каталогу или по табл. 7.1.

Если выбранный типоразмер двигателя не удовлетворяет требованиям по перегрузке, то следует принять следующий типоразмер с большей мощностью и произвести проверку по перегрузочной способности.

Если выбранный ДПТ НВ удовлетворяет требованиям по перегрузке, то не требуется его проверка на достаточность пусково-го момента, кроме случая, когда ЭП имеет повышенный момент сопротивления при пуске $M_{\text{сп}}$. В этом случае проверяется выполнение условия

$$I_{\text{я доп}} > M_{\text{сп}} / c_m \quad (11.14)$$

Для трехфазного АД с кз ротором на i -м участке нагрузочной диаграммы должно выполняться условие (7.14):

$$0.8 M_{\text{ном}} \lambda_m \geq M_{\text{дв тр}i}, \quad (11.15)$$

где $M_{\text{дв тр}i} = P_i / \omega_i$ — требуемый момент двигателя на i -м участке нагрузочной диаграммы.

Выбираемый трехфазный АД с кз ротором имеет достаточный пусковой момент если выполняется условие (7.12) $\lambda_n M_{\text{ном}} > M_{\text{дв тр}i} / \eta_p$ или (7.13) $\lambda_n M_{\text{ном}} > F_{\text{дв}} / \rho \eta_p$.

Для трехфазного СД на i -м участке нагрузочной диаграммы должно выполняться условие (7.15) $M_{\text{ном}} \lambda_m \geq M_{\text{дв тр}i}$.

При асинхронном пуске СД (кривая 2 на рис. 3.3) для достаточности пускового момента как и для асинхронного двигателя должно проверяться соблюдение условия (7.12) или (7.13).

Если для выбранного СД момент втягивания в синхронизм $M_{\text{вх}}$ меньше пускового M_n , то проверяется условие обеспечения втягивания в синхронизм (7.16) $M_{\text{ном}} \lambda_{\text{вх}} \geq M_n / i \eta_p$ или (7.17)

$$M_{\text{ном}} \lambda_{\text{вх}} \geq F_{\text{дв}} / \rho \eta_p$$

Пример 11.2. Для электропривода главного движения токарного станка выбрать трехфазный АД серии АИР основного исполнения. Пуск двигателя выполняется без нагрузки. Нагрузочная диаграмма этого привода приведена на рис. 11.2. Значения мощности на участках диаграммы P_i [кВт] и их продолжительность t_i [мин] составляют: $P_1 = 14$; $t_1 = 6$; $P_2 = 10$; $t_2 = 6$; $P_3 = 12$; $t_3 = 4$; $P_4 = 17$; $t_4 = 4$; $P_5 = 7$; $t_5 = 8$. Номинальная частота вращения шпинделя $n = 1460 \pm 5$ [об/мин].

Решение шном

Задачу решаем методом средних потерь

1. Среднее значение мощности находим по формуле (11.6)

$$P_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^5 P_i t_i}{\sum_{i=1}^5 t_i} = \frac{14 \cdot 6 + 10 \cdot 6 + 12 \cdot 4 + 17 \cdot 4 + 7 \cdot 8}{6 + 6 + 4 + 4 + 8} = \frac{320}{28} = 10.7 \text{ кВт}$$

2. В соответствии с (11.7) рассчитываем предварительно номинальную мощность выбираемого двигателя

$$P_{\text{ном}} = k_3 P_{\text{ср}} = 1.25 \cdot 10.7 = 13.4 \text{ кВт}$$

По каталогу серии АИР (основное исполнение) выбираем двигатель АИР160S4У3 со следующими параметрами: номинальная мощность $P_{\text{ном}} = 15$ кВт; номинальный момент $M_{\text{ном}} = 99$ Нм; номинальная частота вращения $n_{\text{ном}} = 1455$ об/мин; номинальный КПД $\eta_{\text{ном}} = 90\%$; номинальный коэффициент мощности $\cos \phi_{\text{ном}} = 0.89$; перегрузочная способность $\lambda_m = 2.9$; кратность пускового момента $\lambda_n = 1.9$; кратность пускового тока $i_{\text{п}} = 7.0$; число пар полюсов $p = 2$; исполнение по способу монтажа IM2031. По скорости двигателя подходит, так как $n_{\text{ном}} = n_{\text{шном}} (1455 \text{ об/мин} = (1460 \pm 5) \text{ об/мин})$.

3. Проверка выбранного двигателя по нагреву.

3.1. Определим потери при номинальной нагрузке (11.8)

$$\Delta r_{\text{ном}} = r_{\text{ном}} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{\text{ном}}} - 1 \right) = 15 \cdot \left(\frac{1}{0.90} - 1 \right) = 1.66 \text{ кВт}$$

3.2. Определим потери для каждого участка нагрузочной диаграммы по формуле (11.10). Для АД с кз ротором полагаем $\gamma = 0.5$ (таблица 11.1). Для каждого участка нагрузочной диаграммы вычисляем значения коэффициентов нагрузки $\beta_k^2 \approx P_i / P_{\text{ном}}$:

$$\beta_1^2 \approx P_1 / P_{ном} = 14 / 15 = 0.93; \quad \beta_2^2 \approx P_2 / P_{ном} = 10 / 15 = 0.66;$$

$$\beta_3^2 \approx P_3 / P_{ном} = 12 / 15 = 0.80; \quad \beta_4^2 \approx P_4 / P_{ном} = 17 / 15 = 1.13;$$

$$\beta_5^2 \approx P_5 / P_{ном} = 7 / 15 = 0.47.$$

Тогда

$$\Delta P_1 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_1^2) / (\gamma + 1) = 1.66 \cdot (0.5 + 0.93) / (0.5 + 1) = 1.58 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_2^2) / (\gamma + 1) = 1.66 \cdot (0.5 + 0.66) / (0.5 + 1) = 1.28 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_3^2) / (\gamma + 1) = 1.66 \cdot (0.5 + 0.80) / (0.5 + 1) = 1.40 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_4 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_4^2) / (\gamma + 1) = 1.66 \cdot (0.5 + 1.13) / (0.5 + 1) = 1.79 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_5 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_5^2) / (\gamma + 1) = 1.66 \cdot (0.5 + 0.47) / (0.5 + 1) =$$

1.08 кВт; 3.3. Определим средние потери двигателя (11.11)

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^5 \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^5 t_i} = \frac{1.58 \cdot 6 + 1.28 \cdot 6 + 1.40 \cdot 4 + 1.79 \cdot 4 + 1.08 \cdot 8}{6 + 6 + 4 + 4 + 8} =$$

$$= \frac{38.56}{28} = 1.38 \text{ кВт}$$

3.4. Сравним средние потери с номинальными (проверка условия (11.12))

$$\Delta P_{cp} < \Delta P_{ном} \quad (1.38 \text{ кВт} < 1.66 \text{ кВт})$$

Следовательно, перегрев двигателя не будет превышать допустимой (нормативной) величины.

4. Проверка двигателя на перегрузочную способность и достаточность пускового момента.

Поскольку наибольшая мощность на четвертом участке нагрузочной диаграммы (17 кВт) превышает номинальную мощность выбранного двигателя (15 кВт), требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

Определим перегрузку двигателя на четвертом участке нагрузочной диаграммы $\lambda_4 = M / 0.8 M_{ном}$, где M_4 — момент нагрузки на четвертом участке.

$$M_4 [H \cdot м] = 9.55 \cdot P_4 [Вт] / n_4 [об/мин] = 9.55 \cdot \frac{17000}{1449} = 112 \text{ Нм},$$

где n_4 — частота вращения на четвертом участке; для линейного участка механической характеристики АД (рис. 3.2а)

$$n_4 = n_1 - (P_4 / P_{ном}) \cdot (n_1 - n_{ном}) = 1500 - (17 / 15) \cdot (1500 - 1455) = 1449 \text{ об/мин}$$

синхронная частота вращения $n_1 = 60 f_c / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500 \text{ об/мин}$; $f_c = 50 \text{ Гц}$ — частота питающей сети.

Следовательно, превышение момента на четвертом участке диаграммы составит

$$\lambda_4 = M_4 / 0.8 M_{ном} = 112 / 0.8 \cdot 99 = 1.41$$

Поскольку $\lambda_4 < \lambda_m$ ($1.41 < 2.9$), то устойчивая работа двигателя на четвертом участке обеспечена.

Заметим, что выбор двигателя по участку с наибольшей мощностью ($P_4 = 17 \text{ кВт}$) был бы ошибочным, так как в этом случае пришлось бы использовать двигатель с номинальной мощностью 18.5 кВт. Это привело бы к значительному недоиспользованию мощности двигателя (к снижению КПД и коэффициента мощности).

Пусковой момент двигателя будет достаточным, так как соблюдается условие

$$\lambda_n M_{ном} \geq M_4 \quad (1.9 \cdot 98.5 = 187.15 \text{ Нм} > 112 \text{ Нм})$$

Окончательно выбираем двигатель типа АИР160 S4У3.

Пример 11.3. Выбрать ДПТ НВ для электропривода, работающего в продолжительном режиме с переменной нагрузкой. Значения мощности на участках нагрузочной диаграммы P_i [кВт] и их продолжительность t_i [мин] составляют: $P_1 = 3.35$; $t_1 = 5$; $P_2 = 0.9$; $t_2 = 20$; $P_3 = 1.0$; $t_3 = 14$. Номинальная частота вращения нагрузки $n_n = 2450 \pm 50$ [об / мин]. Пуск двигателя выполняется без нагрузки.

Решение

Задачу решаем методом средних потерь

1. Среднее значение мощности находим по формуле (11.6)

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^3 P_i t_i}{\sum_{i=1}^3 t_i} = \frac{3.35 \cdot 5 + 0.9 \cdot 20 + 1.0 \cdot 14}{5 + 20 + 14} = \frac{48.75}{39} = 1.25 \text{ кВт}$$

2. В соответствии с (11.7) рассчитываем предварительно номи-нальную мощность выбираемого двигателя

$$P_{ном} = k_3 P_{cp} = 1.2 \cdot 1.25 = 1.5 \text{ кВт}$$

По каталогу выбираем ДПТ НВ типа МИ-41 со следующими параметрами: $P_{ном} = 1.6 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 2500 \text{ об/мин}$; ($\omega_{ном} = 262 \text{ рад/с}$); $\eta_{ном} = 73\%$; $M_{ном} = 6.25 \text{ Нм}$; $U_{ном} = 110 \text{ В}$; $I_{яном} = 19.2 \text{ А}$; $R_{я} = 0.147 \text{ Ом}$; $J_{я} = 408 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$.

По скорости двигатель подходит, так как $n_{ном} = n_n$ ($2500 \text{ об/мин} = (2450 + 50) \text{ об/мин}$).

3. Проверка выбранного двигателя по нагреву.

3.1. Определим потери при номинальной нагрузке (11.8)

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}} - P_{ном} = 1.6 \cdot \left(\frac{1}{0.73} - 1 \right) = 0.59 \text{ кВт}$$

3.2. Определим потери для каждого участка нагрузочной диаграммы по формуле (11.10). Для ДПТ НВ малой мощности полагаем $\gamma = 0.5$ (таблица 11.1). Для каждого участка нагрузочной диаграммы вычисляем значения коэффициентов нагрузки

$$\beta_1^2 \approx \frac{P_1}{P_{ном}} = \frac{3.35}{1.6} = 2.09; \quad \beta_2^2 \approx \frac{P_2}{P_{ном}} = \frac{0.9}{1.6} = 0.5625; \quad \beta_3^2 \approx \frac{P_3}{P_{ном}} = \frac{1.0}{1.6} = 0.625.$$

Тогда,

$$\Delta P_1 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_1^2) / (\gamma + 1) = 0.59 \cdot (0.5 + 2.09) / (0.5 + 1) = 1.02 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_2^2) / (\gamma + 1) = 0.59 \cdot (0.5 + 0.5625) / (0.5 + 1) = 0.42 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_3^2) / (\gamma + 1) = 0.59 \cdot (0.5 + 0.625) / (0.5 + 1) = 0.44 \text{ кВт}.$$

3.3. Определим средние потери двигателя (11.11)

$$\Delta P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^3 t_i} = \frac{1.02 \cdot 5 + 0.42 \cdot 20 + 0.44 \cdot 14}{5 + 20 + 14} = \frac{19.66}{39} = 0.5 \text{ кВт}$$

3.4. Сравним средние потери с номинальными (проверка усло-вия (11.12))

$$\Delta P_{cp} < \Delta P_{ном} \quad (0.5 \text{ кВт} < 0.59 \text{ кВт})$$

Следовательно, перегрев двигателя не будет превышать допу-стимой (нормативной) величины.

4. Проверка двигателя на перегрузочную способность и доста-точность пускового момента.

Поскольку наибольшая мощность на первом участке нагрузочной диаграммы (3.35 кВт) превышает номинальную мощность вы-бранного двигателя (1.6 кВт), требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

В соответствии с (11.13) определим ток в якоре для первого участка нагрузочной диаграммы

$$I_{я1} = \frac{P_1}{\omega_1 c_M} = \frac{3.35}{254 \cdot 0.33} = 39.97 \text{ А}$$

$$\text{где } \omega_1 = \omega_0 - \frac{P_1}{P_{ном}} \cdot (\omega_0 - \omega_{ном}) = 269 - \frac{3.35}{1.6} \cdot (269 - 262) = 254 \text{ рад/с}$$

$$\omega_0 = U_{ном} / c_e = U_{ном} \omega_{ном} / (U_{ном} - I_{яном} R_{я}) = 110 \cdot 262 / (110 - 19.2 \cdot 0.147) = 269 \text{ рад/с}$$

$$c_M = M_{ном} / I_{яном} = 6.25 / 19.2 = 0.33 \text{ Нм/А}$$

Находим значение перегрузки по току на первом участке на-грузочной диаграммы

$$I_{я1} / I_{яном} = 39.97 / 19.2 \approx 2.1$$

Для двигателей типа МИ допускается двойная перегрузка по току якоря в течение времени $t_M \leq 1 \text{ мин}$. Поскольку $t_1 \gg t_M$ дви-гатель МИ-41 по перегрузочной способности не подходит для данного электропривода.

Выбираем следующий из ряда этой серии двигатель типа МИ-42 со следующими параметрами:

$$P_{ном} = 3.2 \text{ кВт}; n_{ном} = 2500 \text{ об/мин}; (\omega_{ном} = 262 \text{ об/мин}); \\ \eta_{ном} = 78\%; M_{ном} = 12.5 \text{ Нм}; U_{ном} = 110 \text{ В}; I_{яном} = 36.3 \text{ А}; \\ R_{я} = 0.192 \text{ Ом}; J_{я} = 662 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2.$$

По скорости двигатель подходит, так как $n_{ном} = n_n (2500 \text{ об/мин} = (2450 + 50) \text{ об/мин})$.

1. Проверка выбранного двигателя по нагреву.

3.1. Определим потери при номинальной нагрузке (11.8)

$$\Delta P_{ном} = P_{ном} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{ном}} - 1 \right) = 3.2 \cdot \left(\frac{1}{0.78} - 1 \right) = 0.9 \text{ кВт}$$

3.2. Определим потери для каждого участка нагрузочной диаграммы по формуле (11.10). Для ДПТ НВ малой мощности полагаем $\gamma = 0.5$ (таблица 11.1). Для каждого участка нагрузочной диаграммы вычисляем значения коэффициентов нагрузки

$$\beta_k^2 \approx P_i / P_{ном}:$$

$$\beta_1^2 \approx P / P_{ном} = 3.35 / 3.2 = 1.05; \beta_2^2 \approx P / P_{ном} = 0.9 / 3.2 = 0.28; \\ \beta_3^2 \approx P / P_{ном} = 1.0 / 3.2 = 0.31.$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_1^2) / (\gamma + 1) = 0.9 \cdot (0.5 + 1.05) / (0.5 + 1) = 0.93 \text{ кВт}; \\ \Delta P_2 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_2^2) / (\gamma + 1) = 0.9 \cdot (0.5 + 0.28) / (0.5 + 1) = 0.468 \text{ кВт}; \\ \Delta P_3 = \Delta P_{ном} \cdot (\gamma + \beta_3^2) / (\gamma + 1) = 0.9 \cdot (0.5 + 0.31) / (0.5 + 1) = 0.486 \text{ кВт}.$$

3.3. Определим средние потери двигателя (11.11)

$$\Delta P_{ср} = \frac{\sum_{i=1}^3 \Delta P_i t_i}{\sum_{i=1}^3 t_i} = \frac{0.93 \cdot 5 + 0.468 \cdot 20 + 0.486 \cdot 14}{5 + 20 + 14} = \frac{26.05}{39} = 0.67 \text{ кВт}$$

3.4. Сравним средние потери с номинальными (проверка условия (11.12))

$$\Delta P_{ср} < \Delta P_{ном} (0.67 \text{ кВт} < 0.9 \text{ кВт})$$

Следовательно, перегрев двигателя не будет превышать допустимой (нормативной) величины.

Поскольку наибольшая мощность на первом участке нагрузочной диаграммы (3.35 кВт) превышает номинальную мощность выбранного двигателя (3.2 кВт), требуется проверка двигателя на перегрузочную способность.

В соответствии с (11.13) определяем для первого участка нагрузочной диаграммы

$$I_{я1} = P_1 / \omega_1 c_M = 3350 / 261 \cdot 0.33 = 38.9 \text{ А},$$

$$\text{где } \omega = \omega_0 - \frac{P_1}{P_{ном}} \cdot (\omega_0 - \omega_{ном}) = 279 - \frac{3.35}{3.2} \cdot (279 - 262) = 261 \text{ рад/с} \\ = U_{ном} / c = U_{ном} \cdot \omega_{ном} \cdot \left(\frac{U_{ном}}{U_{ном}} - I_{яном} R_{я} \right) = \\ = 110 \cdot 262 / (110 - 36.3 \cdot 0.192) = 279 \text{ рад/с}$$

$$c_M = M_{ном} / I_{яном} = 6.25 / 19.2 = 0.33 \text{ Нм/А}$$

Находим значение перегрузки по току на первом участке нагрузочной диаграммы

$$I_{я1} / I_{яном} = 38.9 / 36.3 \approx 1.1$$

Двигатель МИ-42 по перегрузочной способности подходит для данного электропривода.

Окончательно выбираем двигатель типа МИ-42.

11.2 Выбор типа двигателя для кратковременного номинального режима работы S2

Режим S2 характеризуется чередованием периодов неизменной нагрузки с периодами отключения двигателя [2,3,4,5]. При этом за время t_p работы двигателя его температура $\theta_{кр}$ не достигает нормативного значения $\theta_{доп}$, а за время паузы t_n двигатель охлаждается до температуры окружающей среды θ_0 . Таким образом при режиме S2 соблюдаются условия: $t_p < 3T_n$ и $t_n > 3T_p$, где T_n и T_p — постоянные времени нагревания и остывания двигателя соответственно. Диаграммы, характеризующие этот режим, приведены на рис. 11.3.

Стандартом установлена длительность периодов нагрузки $t_p = 10; 30; 60; 90 \text{ мин}$. В таком режиме работают электроприводы шлюзов, вентилях и заслонок, регулирующих подачу нефти, газа и других веществ по трубопроводу.

Если двигатель рассчитан на продолжительный режим работы, то при кратковременном режиме превышение температуры к концу рабочего периода t_p не достигнет установившегося значения. В этом случае двигатель будет недоиспользован по нагреву, а значит и по мощности.

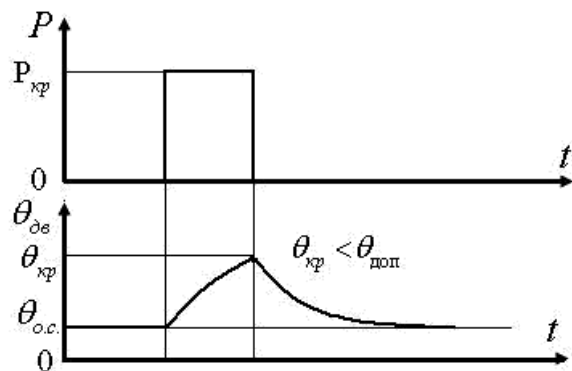


Рис. 11.3 Зависимости от времени мощности P и температуры двигателя $\theta_{\text{дв}}$ для режима S2

Для полного использования в кратковременном режиме работы двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме, его следует перегружать по мощности на валу. Тогда перегрев к концу рабочего периода достигнет нормативного уровня.

Для количественной оценки перегрузки и нагрева двигателя используются коэффициенты термической p_T и механической p_M перегрузок (рис. 11.4).

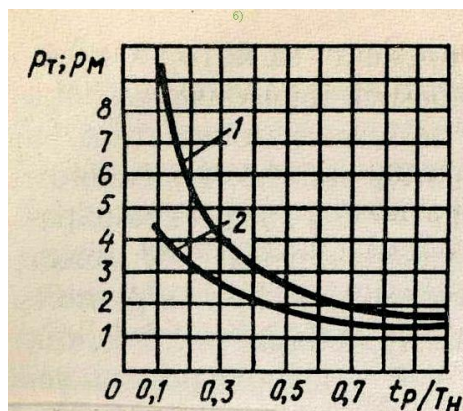


Рис. 11.4 Зависимость коэффициентов p_T (кривая 1) и p_M (кривая 2) от относительной длительности рабочего периода t_p / T_n

Коэффициентом термической перегрузки p_T называется отношение потерь мощности при кратковременном режиме $\Delta P_{кр}$ к номинальным потерям мощности $\Delta P_{ном}$, $p_T = \Delta P_{кр} / \Delta P_{ном}$. Коэффициентом механической перегрузки p_M называется от-

ношение мощности двигателя $P_{кр}$ в кратковременном режиме работы к номинальной мощности $P_{ном}$ в продолжительном режиме, $p_M = P_{кр} / P_{ном}$.

Задача расчета мощности двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме, сводится к определению номинальной мощности двигателя для кратковременного режима $P_{кр ном}$, при требуемой мощности кратковременного режима $P_{кр}$ и относительной продолжительности рабочего цикла

$$t^* = t_p / T_n \quad (11.16)$$

где T_n — постоянная времени нагрева двигателя выбранной се-

рии. При этом перегрев двигателя не должен превысить допустимого значения, соответствующего продолжительному режиму работы этого двигателя с номинальной нагрузкой $P_{ном}$. Расчетная мощность $P_{кр ном}$ меньше мощности $P_{кр}$ на величину коэффициента механической перегрузки p_M , соответствующего заданному t^* (рис. 11.4)

$$P_{кр ном} = P_{кр} / p_M \quad (11.17)$$

Для кратковременного режима работы предлагается следующая методика выбора типа двигателя, предназначенного для работы в продолжительном режиме.

1. Определение требуемой мощности двигателя $P_{кр}$ для кратковременного режима по формуле (11.1).

2. Выбор серии двигателя, степени защиты, способа монтажа и т.д., определение постоянной времени нагрева двигателя T_n . Расчет относительного времени рабочего цикла t^* (11.16). Определение по графику рис. 11.4 значения p_M для полученного t^* .

3. Расчет номинальной мощности двигателя для кратковременного режима $P_{кр ном}$ по известным значениям $P_{кр}$ и p_M (11.17).

4. Выбор типа двигателя с номинальной мощностью в продолжительном режиме работы, $P_{ном} \geq P_{кр ном}$.

5. Определение частоты вращения $n_{кр}$ при кратковременной нагрузке $P_{кр}$ с учетом перегрузки двигателя

$$n_{кр} = n_1 - (P_{кр} / P_{ном}) \cdot (n_1 - n_{ном}) \quad (11.18)$$

6. Определение номинального момента двигателя в кратковременном режиме

$$M_{кр} = 9.55 \cdot 10^3 \cdot P_{кр} / n_{кр} \quad (11.19)$$

7. Проверка условия

$$M_{кр} > M_{сн}, \quad (11.20)$$

где $M_{сн}$ — приведенный к валу двигателя момент сопротивления

8. Определение действительной перегрузочной способности двигателя

$$\lambda_{мд} = 0.8 M_{макс} / M_{сн} = 0.8 M_{ном} \lambda_{м} / M_{сн} \quad (11.21)$$

Чтобы двигатель в кратковременном режиме удовлетворял требованию по перегрузочной способности, необходимо выполнение условия

$$\lambda_{мд} > 1 \quad (11.22)$$

9. Проверка достаточности пускового момента.

Чтобы двигатель в кратковременном режиме удовлетворял требованию по пусковому моменту должно выполняться условие

$$M_n = \lambda M_{ном} > M_{сп} \quad (11.25)$$

Промышленностью выпускаются специальные электродвигатели для кратковременного режима работы. Они имеют повышенную перегрузочную способность, что позволяет полнее использовать их по нагреву. Время работы этих двигателей в соответствии с ГОСТ 183 составляет 10, 15, 30, 60 и 90 мин. Например, для режима S2 на время работы 60 мин. выпускаются ДПТ типа Д21 и Д22 при способе охлаждения IC040, а на время работы 15 мин. — трехфазные АД типа АД00 63 — АД00 112.

Методика выбора специального двигателя для кратковременного режима предельно проста. Если заданы величины $P_{кр}$ и t_p , то выбирается специальный двигатель с номинальной мощностью $P_{ном} \geq P_{кр}$, рассчитанный на работу с данной мощностью в течение времени $t \geq t_p$. Например, если специальный двигатель имеет $P_{ном} = 4$ кВт и предназначен для работы в течение 30 мин., то он может не перегреваясь развивать мощность 4 кВт в течение 30 мин. Затем он *должен быть отключен* до тех пор пока не охладится до температуры окружающей среды.

Внимание! Двигатели, предназначенные для кратковременного режима, не рекомендуется использовать в продолжительном режиме из-за повышенных постоянных потерь мощности и перегрева выше допустимого уровня (иногда даже на холостом ходу).

Пример 11.4. Для электропривода заслонки трубопровода требуется выбрать трехфазный асинхронный двигатель (предназначенный для работы в продолжительном режиме) с частотой вращения $n = 940 \pm 10$ об / мин. Двигатель должен быть закрытого исполнения; способ монтажа IM1001; климатические условия и место установки УЗ. Режим работы кратковременный $t_p = 15$ мин; приведенный к валу двигателя статический момент сопротивления $M_{сп} = 70$ Нм.

Решение

1. Определим требуемую мощность двигателя (11.1) в кратковременном режиме S2

$$P_{кр} = 0.105 \cdot 10^{-3} \cdot M_{сп} \cdot n = 0.105 \cdot 10^{-3} \cdot 70 \cdot 940 = 6.91 \text{ кВт}$$

2. Выбираем серию двигателя АИР (основное исполнение); степень защиты IP44; постоянная нагревания $T_n = 30$ мин. Определяем относительное время рабочего цикла (11.16)

$$t^* = t_p / T_n = 15 / 30 = 0.5$$

По графику рис. 11.4 для $t^* = 0.5$ определяем коэффициент $m = 1.9$

3. Определяем номинальную мощность двигателя продолжительного режима, используемого в кратковременном режиме

(11.17) ханической перегрузки p

$$P_{ном кр} = P_{кр} / p_m = 6.91 / 1.9 = 3.64 \text{ кВт}$$

4. По каталогу двигателей серии АИР (основное исполнение) выбираем двигатель типа АИР112МВ6У3 номинальной мощностью $P_{ном} = 4.0$ кВт; номинальная частота вращения $n_{ном} = 950$ об / мин; перегрузочная способность $\lambda_m = 2.2$; кратность пускового момента $\lambda_n = 2.0$; число пар полюсов $p = 3$ (синхронная скорость $n_1 = 1000$ об / мин).

5. С учетом перегрузки двигателя определяем частоту вращения при кратковременной нагрузке $P_{кр} = 6.91$ кВт (11.18)

$$n_{кр} = n_1 - (P_{кр} / P_{ном}) \cdot (n_1 - n_{ном}) = 1000 - 6.91 / 4.0 \cdot (1000 - 950) = 913 \text{ об / мин}$$

6. Определим превышает ли момент двигателя в кратковременном режиме величину $M_{сн}$. Момент на валу двигателя, соответствующий кратковременной нагрузке $P = 6.91$ кВт и частоте вращения $n_{кр} = 913$ об / мин

$$M_{кр} = 9.55 \cdot 10^3 \cdot P_{кр} / n_{кр} = 9.55 \cdot 10^3 \cdot 6.91 / 913 = 72.2 \text{ Нм}$$

Таким образом $M_{кр} > M_{сн}$ ($72.2 \text{ Нм} > 70 \text{ Нм}$).

7. Определим действительную перегрузочную способность двигателя

$$\lambda_{мд} = 0.8 \lambda_m M_{ном} / M_{сн} = 9.55 \cdot 10^3 \cdot 40.2 \cdot 2.2 / 70 = 1.01$$

$$\text{где } M_{ном} = 9.55 \cdot 10^3 \cdot P_{ном} / n_{ном} = 9.55 \cdot 10^3 \cdot 4.0 / 950 = 40.2 \text{ Нм}$$

Поскольку $\lambda_{мд} > 1$ выбранный двигатель удовлетворяет требованиям электропривода по перегрузочной способности.

8. Пусковой момент, обеспечиваемый двигателем,

$$M_n = M_{ном} \cdot \lambda_n = 40.2 \cdot 2 = 80.4 \text{ Нм}$$

$$M_n > M_{сн} \quad (80.4 \text{ Нм} > 70 \text{ Нм})$$

Следовательно, выбранный двигатель удовлетворяет требованиям электропривода по пусковому моменту.

Окончательно выбираем двигатель типа АИР112МВ6У3.

Пример 11.5. Выбрать специальный двигатель краново-металлургической серии для кратковременного режима ($t_p = 60$ мин) с частотой вращения нагрузки $n = 1020 \pm 10$ об / мин.; статический

реактивный момент сопротивления $M_c = 37$ Нм; КПД механической передачи $\eta = 0.9$.

Решение

1. Определим требуемую мощность двигателя (11.1) в кратковременном режиме S2:

$$P_{кр} = 0.105 \cdot 10^{-3} \cdot M_{сн} \cdot n / \eta = 0.105 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 1020 / 0.9 = 4.4 \text{ кВт}$$

2. Из краново-металлургической серии выбираем ДПТ НВ типа Д21 с $P_{ном} = 4.5 \text{ кВт}$; $n_{ном} = 1030 \text{ об / мин}$; $t_p = 60$ мин.

3. Выбранный двигатель может не перегреваясь развивать мощность 4.5 кВт в течение 60 мин. при частоте вращения $n_{ном} = 1030 \text{ об / мин}$. Затем он должен быть отключен до тех пор пока не охладится до температуры окружающей среды.

11.3 Выбор типа двигателя для повторно-кратковременного номинального режима работы S3

Режим работы двигателя S3 [2,3,4,5] характеризуется чередованием рабочих периодов t_p (периодов нагрузки) с паузами t_n (периодами отключения двигателя). Как за время t_p , так и за время t_n температура двигателя не достигает установившихся значений, то есть выполняются условия $t_p < 3T_n$; $t_n < 3T_o$ (рис. 11.5).

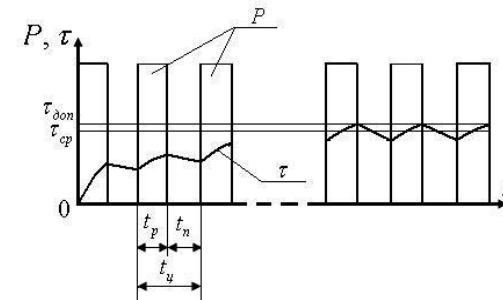


Рис. 11.5 Зависимости мощности P и температуры перегрева двигателя τ от времени для режима S3

При достаточно долгом повторении циклов температура перегрева двигателя колеблется около среднего уровня τ_{cp} , не превышая допустимой величины $\tau_{доп}$.

Режим S3 характеризуется относительной продолжительностью включения ПВ.

$$ПВ = \frac{t_p}{t_p + \beta \cdot t_n} \cdot 100\% = \frac{t_p}{t_u} \cdot 100\% \quad (11.26)$$

где β — коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения двигателей с самовентиляцией при уменьшении их частоты вращения (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Зависимость значения коэффициента β от частоты вращения двигателя

Частота вращения n	Значение β	Примечания
$n \leq 0.2n_{ном}$	$\beta = \beta_0$	Значения β_0 зависят от конструктивного исполнения двигателей (таблица 11.3)
$0.2n_{ном} \leq n \leq 0.8n_{ном}$	$\beta = 0.5 \cdot (1 + \beta_0)$	
$n \geq 0.8n_{ном}$	$\beta = 1$	

Таблица 11.3

Значения β_0 в зависимости от исполнения двигателей по способам защиты и охлаждения

Исполнение двигателей	Значение β_0
Закрытое с независимой вентиляцией	1
Закрытое с естественным охлаждением	0.97
Закрытое с самовентиляцией	0.5
Защищенное с самовентиляцией	0.3

При повторно-кратковременном режиме ограничиваются время цикла $t_u \leq 10 \text{ мин}$ и относительная продолжительность $10\% \leq ПВ \leq 60\%$.

При $ПВ < 10\%$ расчет мощности двигателя ведут как для кратковременного режима S2. Если $ПВ > 60\%$ или $t_u > 10 \text{ мин}$, расчет мощности двигателя ведут как для продолжительного режима S1.

При выборе двигателя для режима S3 будем считать, что время пуска и торможения значительно меньше длительности рабочего периода t_p и их влияние на нагрев двигателя не существенно. Поэтому динамические моменты при пуске и торможении учитывать не будем. Учет динамических моментов при пуске и торможении, а также определение допустимой частоты включений двигателя произведем при анализе повторно-кратковременного режима с частыми пусками S4.

Промышленностью выпускаются *специальные двигатели постоянного и переменного тока*, предназначенные для работы в повторно-кратковременном режиме (например, двигатели краново-металлургической серии). Отличительные особенности этих двигателей:

- пониженная величина момента инерции ротора (якоря);
- большой пусковой момент при сравнительно небольших пусковых токах;
- повышенная перегрузочная способность.

Для режима S3 установлены номинальные значения $ПВ = 15, 25, 40$ или 60% .

В каталогах специальных серий двигателей для режима S3 указана номинальная мощность при $ПВ = 40\%$.

Период работы t_p нагрузочной диаграммы может иметь несколько ступеней (рис. 11.6).

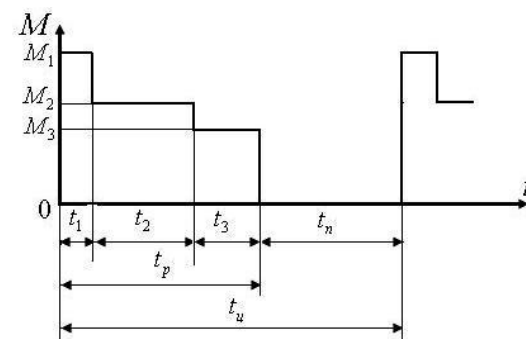


Рис. 11.6 Нагрузочная диаграмма режима S3 с переменной нагрузкой в рабочем периоде

Рассмотрим порядок выбора специального двигателя для режима S3 для общего случая (переменная нагрузка в рабочем периоде). Расчеты проведем методом эквивалентных величин.

1. Определяем эквивалентный момент нагрузки

$$M_{эkv} = \sqrt{\sum_{i=1}^k M_i^2 t_i / t_p} \quad (11.27)$$

2. Определяем эквивалентную мощность двигателя

$$P_{эkv} [Bm] = 0.105 \cdot M_{эkv} \cdot n_n, \quad (11.28)$$

где n_n — приведенная к валу двигателя скорость перемещения нагрузки.

3. Вычисляем продолжительность цикла t_u при β , определенном из табл. 11.2 и 11.3

$$t_u = t_p + \beta \cdot t_n \quad (11.29)$$

4. Рассчитываем относительную продолжительность рабочего периода

$$PB_p = (t_p / t_u) \cdot 100\% \quad (11.30)$$

5. Определяем требуемую мощность двигателя при $PB = 40\%$

$$P_{нкр} = P_{экр} \sqrt{PB_p / 40} \quad (11.31)$$

6. Из каталога выбираем специальный двигатель, имеющий при $PB = 40\%$ $P_{ном} \geq P_{нкр}$.

Выбираем наибольший нагрузочный момент $M_{i \max}$ на i -м интервале цикла, для которого выполняется условие $M_{i \max} > M_{экр}$ и выполняем следующие проверки

7. Проверяем выбранный двигатель по условиям пуска

$$\frac{M}{n} > \frac{M_{i \max}}{n_{i \max}} \quad (11.32)$$

8. Проверяем двигатель на перегрузочную способность при работе на заданную нагрузку.

Для трехфазного АД с кз ротором

$$\lambda_{мр} = 0.8 M_{ном} / M_{i \max} > 1 \quad (11.33)$$

Для трехфазного СД

$$\lambda_{мр} = M_{ном} / M_{i \max} > 1 \quad (11.34)$$

Для ДПТ НВ в соответствии с (7.1)

$$\lambda_{мр} = \frac{I_{ср}}{I_{доп}} \cdot \frac{M}{M_{i \max}} > 1 \quad \text{при } t \leq t_m \quad (11.35)$$

При отсутствии значительных нагрузок возможно применение в электроприводах с повторно-кратковременным режимом работы

двигателей общепромышленного назначения для продолжительного режима работы. В этом случае номинальная мощность двигателя $P_{ном}$ выбирается из условия

$$P_{ном} = P_{экр} \sqrt{PB_p / 100} \quad (11.36)$$

Поскольку $P_{ном} < P_{экр}$ за счет того, что часть цикла двигатель не работает, следует внимательно отнестись к проверке двигателя по перегрузке (11.33) — (11.35) и пусковому моменту для АД и СД (11.32).

Использование двигателей продолжительного режима S1 в повторно-кратковременном ведет к снижению надежности электропривода и его энергетических показателей. Это объясняется тем, что по сравнению со специальными двигателями для повторно-кратковременного режима двигатели для продолжительного режима имеют меньшие значения перегрузочной способности и пускового момента, больший момент инерции ротора (якоря), меньший диаметр вала и меньший ресурс подшипников.

Пример 11.6. Для электропривода подъемного механизма необходимо выбрать тип трехфазного АД с кз ротором для режима работы S3 в соответствии с нагрузочной диаграммой на рис. 11.6, где $M_1 = 327 \text{ Нм}$; $M_2 = 164 \text{ Нм}$; $M_3 = 125 \text{ Нм}$; $t_1 = 4 \text{ с}$; $t_2 = 20 \text{ с}$; $t_3 = 15 \text{ с}$; $t_n = 65 \text{ с}$; $n_n \approx 700 \text{ об/мин}$

Решение

1. Определим эквивалентный момент нагрузки (11.27)

$$M_{экр} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{327^2 \cdot 4 + 164^2 \cdot 20 + 125^2 \cdot 15}{4 + 20 + 15}} \approx 176 \text{ Нм}$$

2. Определим эквивалентную мощность двигателя (11.28)

$$P_{экр} [\text{Вт}] = 0.105 \cdot M_{экр} \cdot n_n = 0.105 \cdot 176 \cdot 700 = 12936 \text{ Вт} \approx 13 \text{ кВт}$$

3. Для краново-металлургической серии МТКН выбираем асинхронный двигатель с кз ротором (р=4) закрытого исполнения с самовентиляцией. При приведенной к валу двигателя скорости $n_n \approx 700 \text{ об/мин} > 0.8 n_{ном}$ определяем величину $\beta = 1$ (табл. 12.2). Тогда время цикла (11.24)

$$t_u = t_p + \beta \cdot t_n = 39 + 1 \cdot 65 = 104 \text{ с}$$

4. Рассчитываем относительную продолжительность рабочего периода (11.30)

$$PB_p = (t_p / t_u) \cdot 100\% = (39/104) \cdot 100\% = 37.5\%$$

5. Определяем требуемую мощность двигателя при ПВ = 40% (11.31)

$$P_{пкр} = P_{экв} \sqrt{PB_p / 40} = 13 \cdot \sqrt{37.5/40} = 12.19 \text{ кВт}$$

6. Из условия $P_{ном} \geq P_{пкр}$ выбираем асинхронный двигатель с кз ротором типа МТКН 411-8 краново-металлургической серии. Параметры двигателя: $P_{ном} = 15 \text{ кВт}$ при ПВ=40%; $n_{ном} = 695 \text{ об/мин}$; $M_{ном} = 9.55 P_{ном} / n_{ном} = 9.55 \cdot 15000 / 695 = 206 \text{ Нм}$; $M_{max} = 670 \text{ Нм}$; $M_n = 650 \text{ Нм}$

7. Проверяем выбранный двигатель по условиям пуска (11.32).
Условие $M_n > M_1$ выполняется, поскольку $650 \text{ Нм} > 327 \text{ Нм}$.
Двигатель по пусковому моменту удовлетворяет заданным условиям.

8. Проверяем двигатель на перегрузочную способность при работе на заданную нагрузку (11.33)

$$\lambda_{мр} = M_{max} / M_1 = 670/327 = 2.05$$

Поскольку $\lambda_{мр} > 1$ двигатель проходит по перегрузочной способности.

Окончательно выбираем трехфазный АД с кз ротором типа МТКН 411-8.

в течение t_p , $PB_p = 25\%$, $n_n = 700 \pm 20 \text{ об/мин}$ / $\eta = 0.9$ требуется выбрать специальный трехфазный АД с кз ротором серии МТКН.

Решение

1. Определяем требуемую мощность двигателя при ПВ = 25% (11.28) **Пример 11.7.** Для режима S3 при постоянном M

$$P_{мр} [\text{Вт}] = 0.105 \cdot M_c \cdot n_n / \eta = 0.105 \cdot 220 \cdot 700 / 0.9 = 17967 \text{ Вт} \approx 18 \text{ кВт}$$

2. Определяем требуемую мощность двигателя при ПВ = 40% (12.31)

$$P_{пкр} = P_{мр} \sqrt{PB_p / 40} = 18 \cdot \sqrt{25/40} = 14.2 \text{ кВт}$$

3. Из условия $P_{ном} \geq P_{пкр}$ и $PB_p = 25\%$ выбираем АД с кз ротором типа МТКН 412-8 краново-металлургической серии с $n_{ном} = 695 \text{ об/мин}$, имеющий $P_{ном} = 15 \text{ кВт}$ при ПВ=40%.

Пример 11.8. Для режима S3 при постоянном $M_c = 60 \text{ Нм}$ в течение $t_p = 1 \text{ мин}$ при $t_u = 3.5 \text{ мин}$, $n = 1500 \pm 50 \text{ об/мин}$ требуется выбрать ДПТ НВ общепромышленного назначения.

Решение

1. Определяем требуемую мощность двигателя в рабочем цикле (11.28) в рабочем цикле t_p

$$P_{мр} [\text{Вт}] = 0.105 \cdot M_c \cdot n_n = 0.105 \cdot 60 \cdot 1500 = 9.45 \text{ кВт}$$

2. Рассчитываем относительную продолжительность рабочего периода (11.30) при $\beta = 1$

$$PB_p = (t_p / t_u) \cdot 100\% = (1/3.5) \cdot 100\% = 28.6\%$$

3. Из выражения (11.36) определяем номинальную мощность двигателя

$$P_{ном} \geq P_{мр} \sqrt{PB_p / 100} \geq 9.45 \cdot \sqrt{28.6/100} \geq 5.1 \text{ кВт}$$

4. Из условия $P_{ном} \geq P_{пкр}$ выбираем ДПТ НВ типа 2ПН-132, $= 5.5 \text{ кВт}$, $n_{ном} = 1500 \text{ об/мин}$ имеющий $P_{ном}$

Определим номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = P_{ном} / \omega_{ном} = 30 P_{ном} / \pi n_{ном} = 30 \cdot 5500 / \pi \cdot 1500 = 35 \text{ Нм}$$

5. Проверим двигатель на перегрузочную способность (11.35)

$$\lambda_{мр} = I_{ядоп} c_m / M_c > 1 \text{ при } t \leq t_m$$

Для данного двигателя $I_{ядоп} = 2 I_{яном} = 2 \cdot 59 = 118 \text{ А}$ при $t_p = 1 \text{ мин}$

$$c_m = M_{ном} / I_{яном} = 35/59 = 0.59 \text{ Нм/А}$$

$$\lambda_{мр} = 118 \cdot 0.59 / 60 = 1.16 > 1$$

Двигатель по перегрузочной способности проходит.

Окончательно выбираем ДПТ НВ общепромышленного назначения типа 2ПН-132.

11.4 Выбор типа двигателя для повторно-кратковременного номинального режима работы с частыми пусками S4

Важным частным случаем повторно-кратковременного режима является режим частых пусков или коротких циклов S4 [2,3,4,5] (рис. 11.7).

В режиме S4 существенное влияние на перегрев двигателя оказывают переходные режимы, связанные с его частыми пусками. Это объясняется тем, что при пусках значения токов в обмотках двигателей значительно превышают номинальные. Например, у трехфазных АД с кз ротором пусковой ток в 5–7 раз превышает номинальный.

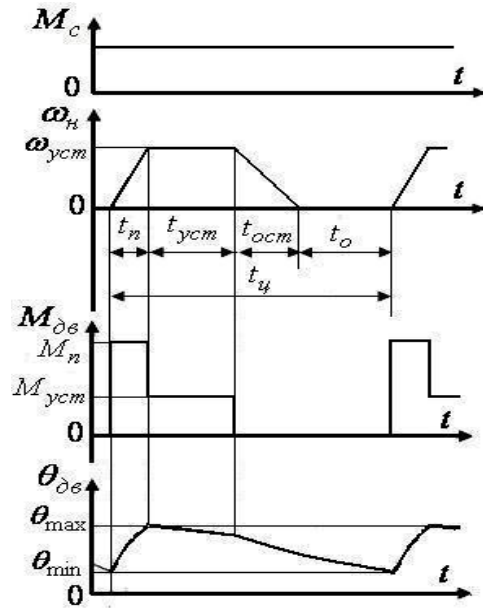


Рис. 11.7. Временные диаграммы для режима S4
(где t_n — время пуска, t_{ycm} — время движения с установившейся скоростью, $t_{осм}$ — время выбега (остановки под действием M_c), t_o — время паузы, t_u — время цикла работы, M_n — момент двигателя при пуске, M_{ycm} — момент двигателя в установившемся режиме, θ_{max} , θ_{min} — соответственно наибольшая и наименьшая температура нагрева двигателя)

Для электроприводов, работающих в режиме S4, выбираются двигатели, предназначенные для режима S3. Выбор в этом случае

затрудняется тем, что точная нагрузочная диаграмма для этого режима предварительно не может быть рассчитана, так как потери в переходных режимах могут быть рассчитаны только после выбора двигателя.

Поэтому на практике выбор двигателя осуществляют в два этапа. На первом этапе по диаграмме статических нагрузок определяют эквивалентные приведенные момент или мощность без учета момента инерции ротора двигателя. При выборе двигателя по каталогу вводят коэффициент запаса, учитывающий дополнительные потери при пуске. На втором этапе для выбранного двигателя строят уточненную нагрузочную диаграмму с учетом момента инерции ротора двигателя, по которой проводят поверочный расчет. Сравнение производят с каталожными данными для двигателя режима S3 (пример 11.8). Если при расчете по уточненной диаграмме выбранный двигатель не проходит по мощности, то выбирают более мощный двигатель данной серии и повторяют поверочный расчет.

Итак, при режиме S4:

- периоды пуска и кратковременной неизменной нагрузки чередуются с периодами отключения;
- как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры всех частей двигателя достигли установившихся значений ($\theta_{max} < \theta_{oon}$);
- пусковые потери оказывают существенное влияние на нагрев двигателя;
- дополнительного нагрева двигателя при его остановке не происходит, так как остановка двигателя осуществляется либо путем выбега, либо путем механического торможения.

Продолжительность включения (рис. 11.7)

$$ПВ = [(t_n + t_{ycm}) / t_u] \cdot 100\% \quad (11.37)$$

В соответствии с ГОСТ 183: нормированные значения ПВ = 15, 25, 40, 60%; число включений в час — 30, 60, 120, 240 при коэффициенте инерции $FI = J_{общ} / J_{\partialв} = 1.2; 1.6; 2.5; 4; 6.3; 10$, где $J_{общ}$ — сумма моментов инерции механической части электропривода и ротора (якоря) двигателя; $J_{\partialв}$ — момент инерции ротора (якоря) двигателя.

Значительная доля энергетически напряженных режимов пуска в коротких циклах S4 приводит к большим погрешностям при использовании упрощенных процедур проверки двигателей. В по-

добных случаях удобно пользоваться приемом, основанном на составлении прямого теплового баланса для «далекого» цикла. Когда тепловой режим двигателя установился, то есть превышения температуры τ в начале и в конце цикла одинаковы (рис. 11.7), то можно считать, что выделившаяся энергия равна энергии, отданной в окружающую среду. Для режима S4 получаем уравнение

$$\Delta W_n + \Delta P \cdot t_{ycm} = (1 + \beta) \cdot \Delta P_{ном} \cdot t_n / 2 + \Delta P_{ном} \cdot t_{ycm} + \Delta P_{ном} \cdot (t_{ост} + t_o) \cdot \beta, \quad (11.38)$$

где в левой части представлены потери при пуске ΔW_n и при работе в установившемся режиме $\Delta P \cdot t_{ycm}$; а в его правой части — энергия, рассеиваемая в окружающую среду при пуске $(1 + \beta) \cdot \Delta P \cdot t_n / 2$, в установившемся режиме $\Delta P_{ном} \cdot t_{ycm}$, при остановке двигателя и в паузе $\Delta P_{ном} \cdot (t_{ост} + t_o) \cdot \beta$; β — коэффициент ухудшения теплоотдачи.

На основе выражения (11.38) получим соотношение для определения допустимого числа включений в час h . Поскольку

$$t_u = 3600/h, \text{ то } t_{ycm} = 3600\varepsilon/h - t_n; t_{ост} + t_o = 3600(1 - \varepsilon)/h,$$

$$\varepsilon = (t_n + t_{ycm}) / t_u, \quad \text{где}$$

Подставляя в (11.37) значения t_{ycm} и $t_{ост} + t_o$ и решая его относительно h , получаем

$$h_{дон} = 3600 \cdot \frac{(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot \varepsilon + \beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n - t_n [\Delta P + (1 + \beta) \Delta P_{ном} / 2 - \Delta P_{ном}]} \quad (11.39)$$

Если пренебречь последним членом в знаменателе в сравнении с большими потерями в переходном режиме, то выражение (11.39) упрощается

$$h_{дон} \approx 3600 \cdot \frac{(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot \varepsilon + \beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n} \quad (11.40)$$

Если в установившемся режиме двигатель работает с номинальной нагрузкой ($\Delta P = \Delta P_{ном}$), то

$$h_{дон} \approx 3600 \cdot \frac{\beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n} \quad (11.41)$$

Анализ выражения (11.40) показывает, что допустимое число включений в час h зависит от статической нагрузки, определяю-

щей мощность потерь ΔP , относительной продолжительности включения ε , коэффициента ухудшения теплоотдачи β и от потерь энергии в переходном режиме.

Поскольку они пропорциональны моменту инерции привода, то с его ростом уменьшается частота включений.

Уменьшение потерь энергии при пуске достигается при использовании полупроводниковых управляемых преобразователей. Так при частотном пуске АД с кз ротором при токах статора приблизительно в 1.5—2 раза больших номинального и оптимальном скольжении максимально допустимое число включений АД оказывается в несколько раз больше, чем при прямом пуске двигателя от сети с неизменной частотой.

Увеличение величины h также достигается независимой вентиляцией двигателя, действующей одинаково интенсивно в течение всего цикла работы двигателя.

Пример 11.9. Выбрать тип трехфазного АД с кз ротором для режима работы S4 в соответствии с диаграммами на

$$n = 1с; t_{ycm} = 10с; t_u = 30с; n_{ycm} = 700 \pm 10об/мин$$

те сопротивления $M_{cn} = 170 \text{ Нм}$ и моменте инерции нагрузки $J_{nn} = 2.0 \text{ кгм}^2$. Для выбранного двигателя определить допустимое число включений в час.

Решение

1. Определим значение пускового момента M_n на участке разгона без учета момента инерции ротора двигателя

$$M_n = J_{nn} \cdot d\omega/dt + M_{cn} = J_{nn} \cdot \omega_{ycm} / t_n + M_{cn} = 2 \cdot 73/1 + 170 = 316 \text{ Нм}$$

2. Определим эквивалентный момент нагрузки (11.27)

$$M_{эkv} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_{cn}^2 t_{ycm}}{t_n + t_{ycm}}} = \sqrt{\frac{316^2 \cdot 1 + 170^2 \cdot 10}{1 + 10}} = 188 \text{ Нм}$$

3. Определим эквивалентную мощность двигателя (11.28)

$$P_{эkv} = 0.105 \cdot M_{эkv} \cdot n_{ycm} = 0.105 \cdot 188 \cdot 700 = 13.8 \text{ кВт}$$

4. Рассчитываем относительную продолжительность рабочего периода (11.37)

$$PB_p = [(t_n + t_{уст})/t_u] \cdot 100\% = [(1 + 10)/30] \cdot 100\% = 36.7\%$$

5. Определяем требуемую мощность двигателя при $PB = 40\%$
(11.31)

$$P_{нкр} = P_{экт} \sqrt{PB_p / 40} = 13.8 \sqrt{36.7 / 40} = 13.2 \text{ кВт}$$

6. Определяем требуемую мощность двигателя с учетом коэф-фициента запаса $k_3 = 1.1$

$$P_{тр} = k_3 P_{нкр} = 1.1 \cdot 13.2 = 14.5 \text{ кВт}$$

7. Из условия $P_{ном} \geq P_{тр}$ выбираем асинхронный двигатель с кз ротором типа МТКН 411-8 краново-металлургической серии. Параметры двигателя: $P_{ном} = 15 \text{ кВт}$ при $PB = 40\%$; $n_{ном} = 695 \text{ об/мин}$ (72.7 рад/с); $J_{дв} = 0.538 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; $M_{max} = 670 \text{ Нм}$; $M_n = 650 \text{ Нм}$; $\cos \phi_{ном} = 0.71$; $\eta = 80\%$; $I_{1ном} = 40 \text{ А}$.

8. Определяем точное значение среднего пускового момента на участке разгона с учетом момента инерции ротора двигателя

$$M_{ср}^{н} = (J_{рн} + J_{дв}) \cdot \omega_{уст} / t_n + M_{сн} = (2 + 0.538) \cdot 73.7 / 1 + 170 = 357 \text{ Нм},$$

где $\omega_{уст} = \omega_o \cdot (1 - s) = 78.5 \cdot (1 - 0.061) = 73.7 \text{ рад/с}$ — величина скольжения в рабочей точке линейного участка механической характеристики асинхронного двигателя

$$s = \frac{M_{сн} \cdot s}{M_{ном}} = \frac{170 \cdot 0.074}{206} = 0.061; s_{ном}$$

$$= \frac{\omega_o - \omega_{ном}}{\omega_o} = \frac{78.5 - 72.7}{78.5} = 0.074$$

$$; M_{ном} = \frac{P_{ном}}{\omega_{ном}} = \frac{15000}{72.7} = 206 \text{ Нм};$$

9. Уточняем величину эквивалентного момента

$$M_{экт} = \sqrt{\frac{M_{нм}^2 t_n + M_{сн}^2 t_{уст}}{t_n + t_{уст}}} = \sqrt{\frac{357^2 \cdot 1 + 170^2 \cdot 10}{1 + 10}} = 194 \text{ Нм}$$

10. Уточняем эквивалентную мощность двигателя

$$P_{экт} = 0.105 M_{экт} \cdot n_{уст} = 0.105 M_{экт} \cdot 30 \omega_{уст} / \pi = 0.105 \cdot 194 \cdot 704 = 14.3 \text{ кВт}$$

11. Определяем требуемую мощность двигателя при $PB = 40\%$

$$P_{нкр} = P_{экт} \sqrt{PB_p / 40} = 14.3 \sqrt{36.7 / 40} = 13.7 \text{ кВт}$$

12. Поскольку $P_{ном} \geq P_{тр}$, двигатель выбран правильно. Если указанное условие не выполняется, то следует выбрать более мощный двигатель и повторить расчеты по пунктам 8-11.

13. Проверяем выбранный двигатель по условиям пуска (11.32) Условие $M_n > M_c$ выполняется, поскольку $650 \text{ Нм} > 170 \text{ Нм}$ Двигатель по пусковому моменту удовлетворяет заданному условию.

14. Проверяем двигатель на перегрузочную способность при работе на максимальную нагрузку (11.33)

$$\lambda_{мр} = 0.8 M_{max} / M_p = 0.8 \cdot 670 / 357 = 1.5$$

Поскольку $\lambda_{мр} > 1$, двигатель проходит по перегрузочной способности.

Окончательно выбираем трехфазный АД с кз ротором типа МТКН 411-8.

Определение допустимого числа включений в час

15. Для выбранного двигателя МТКН 411-8 определим допустимое число включений в час при работе на заданную нагрузку по формуле (11.40)

$$h_{доп} \approx 3600 \cdot \frac{(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot \varepsilon + \beta \Delta P_{ном}}{(1 - \varepsilon)} \approx \Delta W_n$$

$$3600 \frac{(3750 - 3243) \cdot 0.367 + 3750 \cdot (1 - 0.367)}{21800} \approx 420 \frac{\text{вкл}}{\text{час}}$$

Вычислим значения используемых в данной формуле величин 15.1.

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} = \frac{15000 \cdot (1 - 0.8)}{0.8} = 3750 \text{ Вт}$$

15.2. Потери мощности в двигателе в установившемся

$$\text{режиме } \Delta P = K + V = 2163 + 1080 = 3243 \text{ Вт},$$

где полные переменные потери трехфазного АД с кз ротором

$$V = M_{\text{дв}} \omega_0 s \cdot \left(\frac{R_1}{R_2' + 1} + 1 \right) = 170 \cdot 78.5 \cdot 0.061 \cdot \left(\frac{0.16}{0.49 + 1} + 1 \right) = 1080 \text{ Вт}$$

в установившемся режиме $M_{\text{дв}} = M_c = 170 \text{ Нм}$;

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{4} = 78.5 \text{ рад/с}$$

с; величину R_1 определим из выражения (9.8)

$$R_1 = \left[(3U_{1\phi}^2 / 2\omega_0 M_{\text{max}})^2 - X_{\text{к.з.}}^2 \right] / (3U_{1\phi}^2 / \omega_0 M_{\text{max}}) =$$

$$[(3 \cdot 220^2 / 2 \cdot 78.5 \cdot 670)^2 - 1.22^2] / (3 \cdot 220^2 / 78.5 \cdot 670) =$$

0.16 Ом, где: $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$;

$$X_{\text{к.з.}} = U_{1\phi} / I_{1\text{ном}} \cos \phi_{\text{ном}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) = 220 / 40 \cdot 0.71 \cdot (3.25 + \sqrt{3.25^2 - 1}) = 1.22 \text{ Ом};$$

$$\lambda_M = M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 670 / 206 = 3.25;$$

величину R_2' определим из выражения (9.7)

$$R_2' = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} / 3 I_{1\text{ном}}^2 \cos^2 \phi_{\text{ном}} = 206 \cdot 78.5 \cdot 0.074 / 3 \cdot 40^2 \cdot 0.71^2 = 0.49 \text{ Ом}$$

15.3. По формуле (9.6) определяем величину переменных потерь в номинальном режиме работы

$$V_{\text{ном}} = M_{\text{ном}} \omega_0 s_{\text{ном}} \left(\frac{R_1}{R_2' + 1} + 1 \right) = 206 \cdot 78.5 \cdot 0.074 \cdot \left(\frac{0.16}{0.49 + 1} + 1 \right) = 1587 \text{ Вт}$$

15.4. Из выражения (9.1) находим постоянные потери мощности в двигателе

$$K = \Delta P_{\text{ном}} - V_{\text{ном}} = 3750 - 1587 = 2163 \text{ Вт}$$

15.5. В соответствии с таблицей 11.2 принимаем $\beta = 1$, величина $\varepsilon = 0.367$.

15.6. Полные потери энергии при пуске составят

$$\Delta W_n = \Delta W_K + \Delta W_V = K \cdot t_n + \frac{J \omega_n^2}{2} \cdot \left(1 + \frac{R}{R_2'} \right) \cdot (1 - s^2) \cdot \frac{M_{\text{ср}}^n}{M_c^n - M_c^n} =$$

$$= 2163 \cdot 1 + \frac{2.538 \cdot 78.5^2}{2} \cdot (1 + 0.49) \cdot (1 - 0.061) \cdot \frac{357}{357 - 170} = 21800 \text{ Дж}$$

11.5 Выбор типа двигателя для повторно-кратковременного номинального режима работы с частыми пусками и электрическим торможением S5

В режиме S5 работают двигатели в приводах значительного числа металлорежущих станков, прессов, вспомогательных механизмов прокатных станов и другого оборудования.

Периодический кратковременный режим с электрическим торможением (типовой режим S5) — последовательность одинаковых рабочих циклов электродвигателя (рис. 11.8), каждый из которых состоит из периодов пуска t_n , работы с постоянной нагрузкой $t_{\text{уст}}$, быстрого электрического торможения t_m , паузы t_o . Продолжительность цикла t_u недостаточна для достижения теплового равновесия.

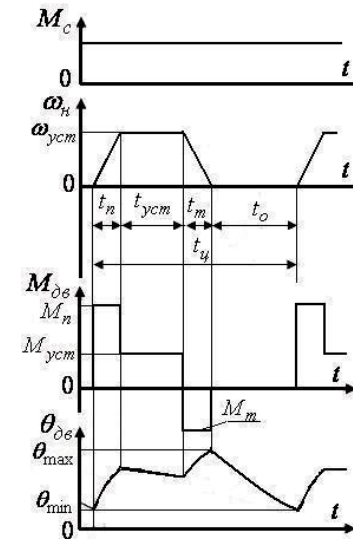


Рис. 11.8 Временные диаграммы для режима S5

(t_m — время электрического торможения,

$M_m = M_c - J d \omega / dt$ — момент двигателя при торможении)

Продолжительность включения

$$ПВ = [(t_n + t_{ycm} + t_m) t_u] \cdot 100\% \quad (11.42)$$

В соответствии с ГОСТ 183: нормированные значения ПВ = 15, 25, 40 и 60%; число включений в час — 30, 60, 120 и 240 при коэф-фициенте инерции $FI = J_{общ} / J_{дв} = 1.2; 1.6; 2.5; 4$.

Для электроприводов, работающих в режиме S5, выбираются двигатели, предназначенные для режима S3. Их выбор осуществляется в той же последовательности, как и для режима S4.

По аналогии с (11.40) определяется допустимое число включений в час

$$h_{доп} \approx 3600 \cdot \frac{(\Delta P_{ном} - \Delta P) \cdot \varepsilon + \beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n + \Delta W_m} \quad (11.43)$$

где ΔW_m — потери энергии при электрическом торможении (разделы 10.1.2 и 10.1.3).

Если в установившемся режиме двигатель работает с номинальной нагрузкой ($\Delta P = \Delta P_{ном}$), то

$$h_{доп} \approx 3600 \cdot \frac{\beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n + \Delta W_m} \quad (11.44)$$

Пример 11.10. Определить допустимую частоту включения ДПТ НВ с самовентилиацией, работающего с номинальным моментом нагрузки $M_c = M_{ном}$ по графику скорости (рис. 11.8), который характеризуется следующими параметрами: $t_n = 0.4c$; $t_{ycm} = 26c$; $t_m = 0.3c$; $t_o = 50c$. Суммарный приведенный момент инерции привода $J = 0.12 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. На участке торможения используется динамическое торможение. ДПТ НВ имеет номинальную мощность $P_{ном} = 2.2 \text{ кВт}$; номинальный момент $M_{ном} = 21 \text{ Нм}$; номинальный ток якоря $I_{яном} = 13 \text{ А}$; $R_{я} = 2 \text{ Ома}$; $\omega_o = 120 \text{ рад/с}$; $\omega_{ном} = 105 \text{ рад/с}$; $\eta = 77\%$.

Решение

Поскольку в установившемся режиме ДПТ НВ работает с номинальным моментом нагрузки $M_c = M_{ном}$, то для расчета допустимой частоты включений используем формулу (11.44). Определим предварительно входящие в нее величины.

1. Номинальные потери мощности

$$\Delta P_{ном} = \frac{P_{ном} (1 - \eta_{ном})}{\eta_{ном}} = 2200 \cdot (1 - 0.77) / 0.77 = 657 \text{ Вт}$$

2. Относительная продолжительность включения

$$\varepsilon = \frac{(t_n + t_{ycm} + t_m)}{(t_n + t_{ycm} + t_m + t_o)} = \frac{(0.4 + 26 + 0.3)}{(0.4 + 26 + 0.3 + 50)} = 0.35$$

3. Определим потери энергии при пуске

$$\Delta W_n = \Delta W_K + \Delta W_V = (\Delta P_{ном} - I_{яном}^2 \cdot R_{я}) \cdot t_n + \frac{J \omega_{ном}^2}{2} \cdot \frac{M_{ср\,днт}^n}{M_{ср\,днт}^n - M_c} =$$

$$= (657 - 13 \cdot 2) \cdot 0.4 + \frac{0.12 \cdot 120^2}{2} \cdot \frac{52.5}{52.5 - 21} = 1440 \text{ Дж}$$

$$\text{где } M_{ср\,днт}^n = J \omega_{ном} / t_n + M_c = 0.12 \cdot 105 / 0.4 + 21 = 52.5 \text{ Нм}$$

4. Определим потери энергии при торможении

$$\Delta W_m = \Delta W_K + \Delta W_V = (\Delta P_{ном} - I_{яном}^2 \cdot R_{я}) \cdot t_m + \frac{J \omega_{ном}^2}{2} \cdot \frac{M_{ср\,днт}^m}{M_{ср\,днт}^m + M_c} =$$

$$= (657 - 13 \cdot 2) \cdot 0.4 + \frac{0.12 \cdot 120^2}{2} \cdot \frac{21}{21 + 21} = 432 \text{ Дж},$$

$$\text{где } M_{ср\,днт}^m = M_c - J \omega_{ном} / t_m = 21 - 0.12 \cdot 105 / 0.3 = -21 \text{ Нм}$$

5. По (11.44) находим $h_{доп}$, принимая $\beta = 1$ (табл. 11.2 и 11.3)

$$h_{доп} \approx 3600 \cdot \frac{\beta \Delta P_{ном} (1 - \varepsilon)}{\Delta W_n + \Delta W_m} \approx 3600 \cdot \frac{1 \cdot 657 \cdot (1 - 0.35)}{1440 + 432} \approx 820 \text{ вкл/час}$$

Выводы

1. Для электроприводов, работающих в режимах S4 и S5, выбираем двигатели, предназначенные для режима S3. Выбор осуществляем в два этапа:

- по диаграмме статических нагрузок (без учета момента инерции ротора двигателя) определяем эквивалентные момент и мощность, как и для режима S3, и с учетом коэффициента запаса по мощности предварительно выбираем по каталогу тип двигателя;
- для выбранного двигателя строим уточненную нагрузочную диаграмму с учетом момента инерции ротора двигателя, по которой проводим поверочный расчет.

2. Для выбранного двигателя определяем допустимое число включений в час с учетом величины статической нагрузки, относительной продолжительности включения ε , коэффициента ухудшения теплоотдачи β и потерь энергии в переходных режимах (формулы (11.40), (11.41) для режима S4 и формулы (11.43), (11.44) для режима S5).

11.6 Выбор типа двигателя для перемежающегося номинального режима работы S6

S6 — это режим, в котором периоды работы с постоянной нагрузкой (рабочие периоды t_p) чередуются с периодами холостого хода t_{xx} , во время которых двигатель не отключается, период покоя отсутствует (рис. 11.9). Потери в переходных режимах пренебрегаем. Продолжительность цикла t_u недостаточна для достижения теплового равновесия, то есть превышение температуры частей двигателя не достигает установившегося значения [3].

Этот режим характеризуется относительной продолжительностью включения нагрузки

$$ПВ = [t_p / (t_p + t_{xx})] \cdot 100\% \quad (11.45)$$

В соответствии с ГОСТ 183 продолжительность включения ПВ = 15, 25, 40 и 60%; продолжительность одного цикла принимают равной 10 мин.

Для работы в режиме S6 выбираем двигатели, предназначенные для работы в режиме S1 (раздел 11.1.2, пример 11.2). При расчете P_{cp} (11.6) используем формулу

$$P_{cp} \approx M_{двр} \omega_{уст} t_p / t_u, \quad (11.46)$$

где полагаем, что мощность в рабочем периоде значительно больше мощности холостого хода, то есть $M_{двр} \omega_{уст} t_p \gg M_{xx} \omega t_{xx} / t_u$;

$\omega_{уст}$ — установившаяся угловая скорость в рабочем периоде.

Тогда, средние потери мощности (11.11) определяем по формуле

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_p t_p / t_u, \quad (11.47)$$

где ΔP_p — средние потери мощности в рабочем периоде, определяемые по формуле (11.9) или (11.10).

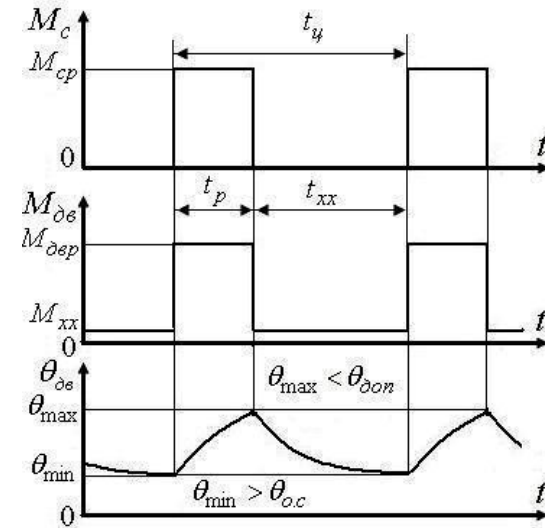


Рис. 11.9 Временные диаграммы для режима S6 (M_{cp} — момент нагрузки в рабочем периоде t_p , $M_{двр}$ — момент двигателя в рабочем периоде, M_{xx} — момент двигателя на холостом ходу).

Если для двигателя, выбранного из условия $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}$, номинальная мощность $P_{ном} < M_{двр} \omega_{уст}$, то требуется проверка двигателя на перегрузочную способность и достаточность пускового момента (раздел 7.1 для ДПТ НВ или раздел 7.2 для трехфазного АД с кз ротором и трехфазного СД).

11.6.1 Выбор двигателя для режима S6 в случае ударной нагрузки [3,5]

Частным случаем режима S6 является режим ударной нагрузки, когда момент статической нагрузки резко увеличивается, оказывая на приводной двигатель ударное действие, а затем снижается до момента холостого хода. К механизмам указанного типа относятся прессы, штампы, ковочные машины, гильотинные ножницы, поршневые насосы, компрессоры, некоторые прокатные станы и т. д.

Обычно в электроприводах, работающих с ударной нагрузкой, маховик устанавливается на валу двигателя. Маховик, раскрученный двигателем до частоты n_{max} , за время отсутствия нагрузки накапливает кинетическую энергию. При резком возрастании на-

грузки часть ее берет на себя маховик, передавая часть запасенной кинетической энергии на вал двигателя. Таким образом, статический момент сопротивления M_c , созданный ударной нагрузкой, лишь частично воздействует на двигатель, снижаясь до значения M_1 (рис. 11.10). График нагрузочной диаграммы получается сглаженным и нагрузка на двигатель практически утрачивает ударное воздействие. За время рабочего цикла t_p частота вращения маховика снижается до значения $n_{\min}$. По окончании рабочего цикла нагрузка на вал двигателя убывает постепенно и к концу паузы t_o достигает величины M_2 , которая превышает значение нагрузки на холостом ходу ($M_2 > M_{xx}$). Часть механической энергии двигателя в этот период расходуется на раскручивание маховика до прежней частоты вращения $n_{\max}$.

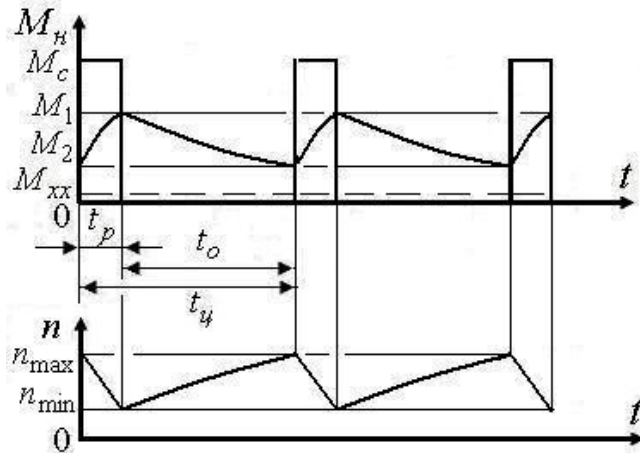


Рис. 11.10 Временные диаграммы для режима S6 при ударной нагрузке (M_n — момент нагрузки на валу двигателя, M_c — момент ударной нагрузки, — соответственно наибольший и наименьший моменты нагрузки на валу двигателя, $n_{\max}$, $n_{\min}$ — соответственно наибольшая и наименьшая частота вращения)

Общий принцип совместного выбора двигателя и маховика для механизмов с ударным характером нагрузки заключается в том, что кинетическая энергия маховика к началу нового цикла должна оставаться неизменной, а скорость двигателя — равной $n_{\max}$. В процессе прохождения пиков нагрузки маховик отдает энергию

на вал, а в период холостого хода, то есть с увеличением скорости, запасает ее. Энергия, отданная маховиком за цикл, должна быть равна энергии, вновь накопленной маховиком. Если это условие не соблюдается, то в последующие периоды начальная скорость цикла не будет оставаться постоянной, двигатель при этом будет перегружен либо — выбран завышенной мощности.

Момент, развиваемый двигателем с маховиком при ударном приложении M_c , выразится как

$$M = (M_2 - M_c)e^{-t/T_m} + M_c$$

Полагая, что при $t = t_p$ момент двигателя имеет максимальное значение $M = M_{\max} = M_1$, получаем зависимость t_p от момента инерции привода

$$t_p = T_m \ln \frac{M_2 - M_c}{M_1 - M_c} = \frac{J_{\Sigma} \omega_{\text{ном}}}{M} \ln \frac{M_2 - M_c}{M_1 - M_c}, \quad (11.48)$$

где для трехфазного АД с кз ротором $T_m = \frac{J_{\Sigma} \omega_{\text{ном}}}{M}$, момент инерции привода $J_{\Sigma} = J_{\text{дв}} + J_{\text{мах}} + J_{\text{м}}'$, $J_{\text{дв}}$, $J_{\text{мах}}$, $J_{\text{м}}'$ — соответственно моменты инерции ротора двигателя, маховика и приведенный момент инерции механизма.

Из (11.48) находим требуемое значение момента инерции привода

$$J_{\Sigma} = \frac{J_{\text{м}}' t_p}{\omega_{\text{ном}} s_{\text{ном}} \ln \frac{M_2 - M_c}{M_1 - M_c}} \quad (11.49)$$

Анализ выражения (11.49) показывает, что требуемый момент инерции J_{Σ} может быть уменьшен при использовании двигателя с повышенным скольжением $s_{\text{ном}}$.

Поэтому в приводах с ударной нагрузкой целесообразно применять двигатели с повышенным скольжением типов ДС, АИРС, 5С и др. [12]

Искомый момент инерции маховика

$$J_{\text{мах}} = J_{\Sigma} - J_{\text{дв}} - J_{\text{м}}' \quad (11.50)$$

Величины $M_1, M_2, n_{\max}, n_{\min}$ при заданных t_p и t_0 определяют-ся величиной момента инерции маховика $J_{\max}$.

Предварительный выбор трехфазного АД с кз ротором для привода с ударной нагрузкой выполняют в следующей последовательности:

1. Вычисляют предварительный номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном}}' \approx 1.2 M_{cp}, \quad (11.51)$$

где $M_{cp} = (M_1 + M_2) / 2$.

2. Рассчитываем предварительное значение требуемой номинальной мощности двигателя

$$P_{\text{ном}} [\text{kBm}] = 0.105 \cdot 10^{-3} M_{\text{ном}}' n_{\text{мах}} \quad (11.52)$$

3. Определяем номинальную частоту вращения двигателя $n_{\text{ном}} \geq n_{\max}$ (рис. 11.10).

4. По каталогу выбираем АД с номинальной мощностью $P_{\text{ном}}$, ближайшей большей к $P_{\text{ном}}'$ с заданными значениями скольжения, частоты вращения, напряжения и т. д.

После соответствующего механического расчета маховика (11.50) и предварительного выбора двигателя необходимо провести проверку правильности выбора двигателя и маховика. Для этого строим уточненные графики момента и скорости за цикл, аналогичные графикам на рис. 11.10. Критерием правильности выбора служит равенство моментов и частоты вращения в начале и конце цикла (M_2 и $n_{\max}$ на рис. 11.10).

По уточненной нагрузочной диаграмме проводится проверка предварительно выбранного двигателя.

1. Проверяем двигатель на:

- перегрузочную способность (7.14) $0.8 M_{\text{ном}} \lambda_M \geq M_1$;
- достаточность пускового момента (7.12) $\lambda_n M_{\text{ном}} > M_c / i \eta_p$

или (7.13) $\lambda_n M_{\text{ном}} > F_c \rho / \eta_p$.

2. Проверяем двигатель по нагреву (11.11) и (11.12)

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_p t_p + \Delta P_o t_o}{t_{\text{ц}}} \quad \text{и} \quad \Delta P_{cp} \leq \Delta P_{\text{ном}},$$

где $\Delta P_p, \Delta P_o$ определяем по формуле (11.10), полагая мощности P_p и P_o соответственно на участках t_p и t_o , равными

$$P_p \approx P_o \approx 0.105 M_{cp} (n_{\max} + n_{\min}) / 2, \quad (11.53)$$

поскольку на участке t_o двигатель раскручивает маховик до прежней скорости $n_{\max}$.

Выводы

1. Выбор двигателя для режима S6 соответствует выбору двигателя для режима S1 при переменной нагрузке (раздел 11.1.2, пример 11.2).

2. Выбор двигателя при ударной нагрузке производят в два этапа:

- на первом этапе по заданным величинам $M_1, M_2, n_{\max}, n_{\min}, t_p, t_0$ выполняют предварительный выбор двигателя по требуемой мощности и механический расчет маховика с целью определения его момента инерции;
- на втором этапе строят уточненные графики изменения момента и частоты вращения и проводят проверку правильности выбора двигателя и маховика.

3. При работе электропривода в режиме S6 с ударной нагрузкой целесообразно использовать трехфазный АД с кз ротором с повышенным скольжением.

11.7 Выбор типа двигателя для перемежающегося номинального режима работы с частыми реверсами S7

Режим S7 — это последовательность одинаковых рабочих циклов, каждый из которых состоит из периода пуска t_n , периода работы с постоянной нагрузкой $t_{\text{уст}}$ и периода электрического торможения t_m (рис. 11.11). Период покоя отсутствует. Продолжительность цикла недостаточна для достижения теплового равновесия. Продолжительность включения ПВ = 100%. В соответствии с ГОСТ 183 число реверсов при электрическом торможении в час 30, 60, 120 и 240 при коэффициенте инерции FI, равном 1,2; 1,6; 2,0; 2,5 и 4,0.

Как и для режима S6 при выборе двигателя используем методику выбора двигателя, работающего в режиме S1 при переменной нагрузке (раздел 11.1.2, примеры 11.2 и 11.3). Однако, поскольку до выбора двигателя невозможно построить точную нагрузочную диаграмму в режимах пуска и электрического торможения, то выбор двигателя осуществляем в два этапа.

На первом этапе по диаграмме нагрузок (без учета момента инерции ротора двигателя) определяем эквивалентные приведен-

ные момент и мощность. При выборе двигателя по мощности вводим коэффициент запаса, учитывающий дополнительные потери при пуске и торможении.

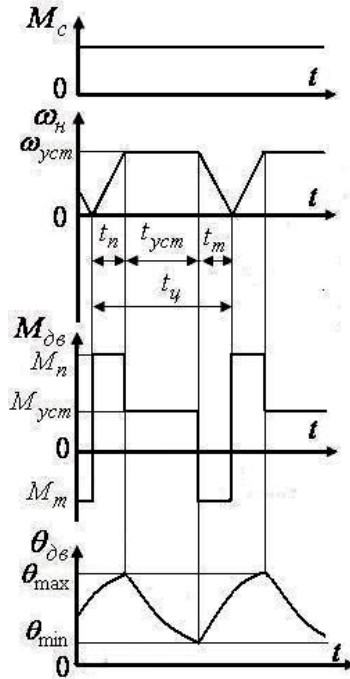


Рис. 11.11 Временные диаграммы для режима S7

На втором этапе для выбранного двигателя строим уточненную нагрузочную диаграмму, по которой проводим проверочный расчет по методике, изложенной в разделе 11.1.2 (примеры 11.2 и 11.3). При этом сначала уточняем величину эквивалентного момента

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_{ycm}^2 t_{ycm} + M_m^2 t_m}{t_u}} = \sqrt{\frac{[(J \omega_{ycm} / t_n) + M_c]^2 t_n + M_c^2 t_{ycm} + (M_c - J \omega_{ycm} / t_m)^2 t_m}{t_u}} \quad (11.54)$$

Затем уточняем величину эквивалентной мощности

$$P_{\text{экв}} = M_{\text{экв}} \omega_{\text{уст}} \quad (11.55)$$

Если при расчете по уточненной диаграмме выбранный двигатель не проходит по мощности ($P_{\text{ном}} < P_{\text{экв}}$), то выбираем более мощный двигатель данной серии и повторяем проверочный расчет.

При выполнении проверки по нагреву мощность при пуске P_n полагаем равной

$$P_n = M_n \omega_{ycm} \approx (M_c + J \omega_{ycm} / t_n) \omega_{ycm}, \quad (11.56)$$

а при торможении

$$P_m = M_m \omega_{ycm} \approx (M_c - J \omega_{ycm} / t_m) \omega_{ycm} \quad (11.57)$$

Выводы

1. Выбор двигателя для режима S7 соответствует выбору двигателя для режима S1 при переменной нагрузке (раздел 11.1.2, примеры 11.2 и 11.3), но с учетом пуска и торможения, то есть выполняется в два этапа.

2. На первом этапе производим предварительный выбор двигателя по мощности с учетом коэффициента запаса, но без учета момента инерции его ротора (якоря).

3. На втором этапе по уточненной нагрузочной диаграмме выполняем проверочный расчет выбранного двигателя с учетом момента инерции его ротора (якоря) (примеры 11.2 и 11.3).

11.8 Выбор типа двигателя для перемежающегося номинального режима работы с двумя или более угловыми скоростями S8

Типовой режим S8 — это последовательность идентичных п, работу с неизменной нагрузкой и скоростью вращения ω_{ycm1} в течение t_{ycm1} , электрическое торможение t_{m1} , работу при другой скорости вращения ω_{ycm2} и нагрузке, электрическое торможение и т. д. (рис. 11.12), период покоя отсутствует. При переходе от одной частоты вращения к другой (при смене нагрузки) двигатель работает в режиме пуска (t_n на рис. 11.12) или в режиме электрического торможения (t_{m1} или t_{m2} на рис. 11.12). Продолжительность циклов, каждый из которых включает время разгона цикла

недостаточна для достижения теплового равновесия, то есть превышение температуры частей двигателя не достигает установившегося уровня.

В соответствии с ГОСТ 183 для данного режима нормируются:

- число циклов в час — 30, 60, 120, 240;
- коэффициент инерции — 1.2, 1.6, 2.0, 2.5, 4.0.

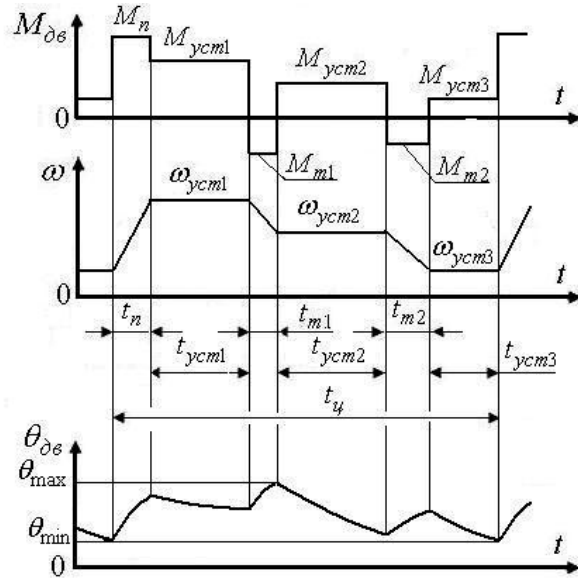


Рис. 11.12 Временные диаграммы для режима S8

Продолжительность включения, % (рис. 11.12):

$$\begin{aligned}
 & \frac{t_n + t_{ycm1}}{t + t_{ycm1}} \\
 ПВ1 = & \frac{t_n + t_{ycm1} + t_{m1} + t_{ycm2} + t_{m2} + t_{ycm3}}{t + t_{m1} + t_{ycm2}} \cdot 100\% \\
 & \frac{t_n + t_{ycm1} + t_{m1} + t_{ycm2} + t_{m2} + t_{ycm3}}{t + t_{m2} + t_{ycm3}} \\
 ПВ2 = & \frac{t_n + t_{ycm1} + t_{m1} + t_{ycm2} + t_{m2} + t_{ycm3}}{t + t_{m2} + t_{ycm3}} \cdot 100\% \\
 & \frac{t_n + t_{ycm1} + t_{m1} + t_{ycm2} + t_{m2} + t_{ycm3}}{t + t_{m2} + t_{ycm3}} \\
 ПВ3 = & \frac{t_n + t_{ycm1} + t_{m1} + t_{ycm2} + t_{m2} + t_{ycm3}}{t + t_{m2} + t_{ycm3}} \cdot 100\%
 \end{aligned}
 \quad (11.58)$$

Эквивалентные моменты для ПВ1, ПВ2 и ПВ3 равны соответственно

$$M_{экв\text{пв}1} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_{ycm1}^2 t_{ycm1}}{t_{ц}}} = \sqrt{\frac{\{[J(\omega_{ycm1} - \omega_{ycm3})/t_n] + M_{c1}\}^2 t + M_{c1}^2 t_{ycm1}}{t_{ц}}}$$

$$M_{экв\text{пв}2} = \sqrt{\frac{M_{m1}^2 t_{m1} + M_{c2}^2 t_{ycm2}}{t_{ц}}} = \sqrt{\frac{\{M_{c2} - [J(\omega_{ycm1} - \omega_{ycm2})/t_{m1}]\}^2 t + M_{c2}^2 t_{ycm2}}{t_{ц}}}$$

$$M_{экв\text{пв}3} = \sqrt{\frac{M_{m2}^2 t_{m2} + M_{c3}^2 t_{ycm3}}{t_{ц}}} = \sqrt{\frac{\{M_{c3} - [J(\omega_{ycm2} - \omega_{ycm3})/t_{m2}]\}^2 t + M_{c3}^2 t_{ycm3}}{t_{ц}}}$$

Величина эквивалентной мощности, используемая при предварительном выборе двигателя

$$P_{экв} = M_{экв\text{пв}1} \omega_{ycm1} + M_{экв\text{пв}2} \omega_{ycm2} + M_{экв\text{пв}3} \omega_{ycm3} \quad (11.59)$$

Как и для режима S7 выбор двигателя осуществляется в два этапа (примеры 11.2 и 11.3).

На первом этапе из условий $P_{ном} \geq P_{экв}$ и $\omega_{ном} \geq \omega_{ycm1}$ осуществляем предварительный выбор двигателя по мощности без учета его момента инерции. При выборе двигателя по номинальной мощности следует ввести коэффициент запаса, учитывающий специфику регулирования скорости ЭП, ухудшение условий охлаждения при снижении скорости, динамические нагрузки при переходе от одной ступени скорости к другой.

На втором этапе строится уточненная нагрузочная диаграмма, по которой осуществляется проверка выбранного двигателя на перегрузочную способность, достаточность пускового момента и на нагрев (примеры 11.2 и 11.3).

Выводы

1. Режим S8 отражает самый общий случай периодического изменения момента M и скорости ω .

2. При работе электропривода в режиме S8, как правило, выбираются двигатели режима S1 при переменной нагрузке и с учетом пуска и торможения.

3. Как и для режима S7 выбор двигателя осуществляется в два этапа:

- предварительный выбор двигателя без учета момента инерции ротора двигателя;
- проверка правильности выбора двигателя по уточненной на-грузочной диаграмме.

12 Выбор шагового двигателя

Исходными данными при выборе шагового двигателя [13] являются:

1. При поступательном движении нагрузки:

- $F_c [H]$ — сила сопротивления;
- $V_{n \max} [м / с]$ — наибольшая линейная скорость нагрузки;
- η и $\rho [м / рад]$ — кпд и коэффициент передачи редуктора;
- $\pm \Delta S [м]$ — ошибка положения нагрузки при отработке

одного шага двигателя.

2. При вращательном движении нагрузки:

- $F_c [H]$ или $M_c [Нм]$ — момент сопротивления;
- $\omega_{n \max} [рад / с]$ ($n_{n \max} [об / мин]$) — наибольшая угловая скорость (частота вращения) нагрузки;
- η и i — кпд и передаточное отношение редуктора;
- $\pm \Delta \phi [рад]$ — ошибка положения нагрузки при отработке одного шага двигателя.

Выбор типа шагового двигателя осуществим в следующем порядке:

1. Предварительный выбор двигателя.

Номинальный момент выбираемого двигателя $M_{ном}$ на заданной частоте управляющих импульсов должен быть не меньше приведенного к валу двигателя максимального момента нагрузки, то есть для поступательного движения нагрузки

$$M_{ном} \geq F_c \rho / \eta \quad (12.1)$$

для вращательного движения

$$M_{ном} \geq M_c / i \eta \quad (12.2)$$

Из условия (12.1) или (12.2) ориентировочно выбираем шаговый двигатель, для которого по каталогу определяем:

- величину шага двигателя $\alpha_{ш} [рад]$;
- наибольшую частоту управляющих импульсов (частоту при-емистости) $f_{np} [Гц]$ при реальном приведенном моменте сопро-

тивления $F_c \rho / \eta$ или $M_c / i \eta$.

2. Проверка обеспечения наибольшей заданной скорости на-грузки $V_{n \max}$ или $\omega_{n \max}$ ($n_{n \max}$).

Должно выполняться условие

$$f_{np} \alpha_{ш} \geq \omega_{n \max} i \quad (12.3)$$

или

$$f_{np} \alpha_{ш} \geq V_{n \max} / \rho \quad (12.4)$$

3. Проверка правильности выбора двигателя, исходя из требо-вания обеспечения заданной точности.

При отработке одного шага двигателя статическая ошибка $\Delta \alpha_{ст}$ обычно не превышает половины шага ($\Delta \alpha_{ст} \leq \alpha_{ш} / 2$). Что-бы в этом случае не превысить заданной величины $\pm \Delta S$ или $\pm \Delta \phi$, для выбранного двигателя величина $\alpha_{ш} [рад]$ должна удо-влетворять условию

$$0.5 \alpha_{ш} \rho \leq \Delta S \quad (12.5)$$

или

$$0.5 \alpha_{ш} / i \leq \Delta \phi \quad (12.6)$$

Если при точной остановке ШД используется дробление шага, то в формулах (12.5) и (12.6) используется величина реального «мелкого» шага.

Если условия пунктов 2 или 3 не выполняются, то следует вы-брать другой двигатель, удовлетворяющий условию (12.1) или (12.2) и для него повторить проверки по пунктам 2 и 3.

Проблемы обеспечения требуемого теплового режима элек-трических шаговых двигателей не существует, так как они рас-считываются на длительный режим отработки импульсов задан-ной частоты. Поэтому проверка выбранного шагового двигателя на нагрев не требуется.

13 Выбор преобразователя частоты

От правильного выбора преобразователя частоты (ПЧ) зависит эффективность и ресурс работы ПЧ и всего электропривода в целом. Если мощность ПЧ будет завышена, он не сможет в должной мере обеспечить защиту двигателя. Если мощность ПЧ мала, он не сможет обеспечить высокودинамичный режим работы и из-за перегрузок может выйти из строя.

При выборе ПЧ надо руководствоваться не только мощностью подключаемого двигателя, но и диапазоном рабочих скоростей двигателя, диапазоном рабочих моментов вращения, характером нагрузки и циклограммой работы [14]. В табл. 13.1 перечислены факторы, которые надо рассмотреть при выборе ПЧ.

Таблица 13.1

Факторы, учитываемые при выборе ПЧ

Классификация		Связанные характеристики			
		Скорость и момент	Параметры времени	Перегруз. способность	Пусковой момент
Тип нагрузки	Фрикционная нагрузка и подъем груза. Вязкая нагрузка. Высокоинерционная нагрузка. Нагрузка с передачей и накоплением энергии.	+			+
Характеристики скорости и момента	Постоянный момент. Постоянная скорость. Уменьшающийся момент. Уменьшающаяся скорость.	+	+		
Характер нагрузки	Постоянная нагрузка. Ударная нагрузка. Периодически изменяющаяся нагрузка Высокий начальный момент. Низкий начальный момент.	+	+	+	+
Продолжительный режим на номинальной скорости. Продолжительный режим на низкой/средней скорости. Повторно-кратковременный режим.			+	+	

Продолжение таблицы 13.1

Классификация	Связанные характеристики			
	Скорость и момент	Параметры времени	Перегруз. способность	Пусковой момент
Максимальная частота. Номинальная частота.	+			
Мощность или импеданс источника питания Скачки напряжения или дисбаланс фаз. Число фаз, частота.			+	+
Механическое трение, потери в проводниках.			+	+
Изменение рабочего цикла		+		

13.1 Выбор ПЧ по электрической совместимости с двигателем

13.1.1 Выбор ПЧ при работе с одним двигателем

1. Предварительный выбор ПЧ выполняем из условия

$$P_{номПЧ} > S_{номр}, \quad (13.5)$$

где $P_{номПЧ}$ — номинальная мощность ПЧ; $S_{номр}$ — полная потребляемая двигателем мощность.

Для расчета полной потребляемой двигателем мощности используем следующую формулу

$$S_{номр} [кВА] = \frac{k \cdot P_{ном}}{\eta \cdot \cos \phi}, \quad (13.6)$$

где $k = 0.95 \div 1.05$ — коэффициент искажения тока при ШИМ (широтно-импульсной модуляции напряжения на двигателе), в

первом приближении можно принять $k = 1$; $P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя по паспорту, кВт; η — номинальный КПД двигателя; $\cos \phi$ — паспортный коэффициент мощности двигателя.

2. Для предварительно выбранного двигателя определяем ток $I_{номр}$, потребляемый двигателем от ПЧ в установившемся режиме при напряжении сети 220/380 В

$$I_{номр} [A] = \frac{k \cdot n \cdot M_{см}}{9.55 \cdot \eta \cdot \cos \phi \cdot U \sqrt{3}}, \quad (13.7)$$

где $n[\text{об/мин}]$ — частота вращения вала двигателя;
 $M_{ст} [Hм]$ — момент нагрузки на валу двигателя; U — действующее значение напряжения на обмотках двигателя.

При выборе ПЧ для его номинального тока $I_{номПЧ}$ должно соблюдаться условие

$$I_{номПЧ} > I_{номпр}, \quad (13.8)$$

то есть потребляемый двигателем ток должен быть меньше номинального тока ПЧ.

3. Проверка выбираемого ПЧ в пусковом режиме.

Пусковой ток двигателя ограничивается преобразователем по уровню (120—200% от номинального тока ПЧ) и по времени действия (обычно до 60 с). Поэтому, условия пуска двигателя при питании напрямую от сети и при питании от ПЧ отличаются. При плавном пуске двигателя от ПЧ (с плавным нарастанием частоты питающего напряжения) пусковой ток может быть снижен до номинального или реально потребляемого двигателем в установившемся режиме установкой времени разгона. Если требуется быстро разогнать инерционную нагрузку, потребуется ПЧ большей номинальной мощности.

Пусть требуется разогнать двигатель при питании его от ПЧ от меньшей скорости до большей за заданное время t_p . Тогда, ток $I_{номпр.р}$, который двигатель потребляет при линейном разгоне, определим из выражения

$$I_{номпр.р} [A] = \frac{k \cdot n}{9.55 \cdot \eta \cdot \cos \phi \cdot U \sqrt{3}} \cdot (M_{ст} + M_{дин}), \quad (13.4)$$

где $M_{дин} [Hм] = \frac{J}{9.55} \cdot \frac{n}{t_p}$ — динамический момент нагрузки, возникающий при разгоне инерционной нагрузки, $J [кгм^2]$ — сумма моментов инерции ротора двигателя и приведенного к валу двигателя момента инерции нагрузки, t_p — время, в течение которого двигатель разгоняется до частоты вращения n .

Для выбираемого ПЧ должно соблюдаться условие

$$I_{пускПЧ} \geq I_{номпр.р}, \quad (13.5)$$

где $I_{пускПЧ}$ — допустимая величина пускового тока, приведенная в паспорте на данный ПЧ.

Как правило, время разгона двигателя при $I_{пускПЧ} = 1.5 \cdot I_{номПЧ}$ ($I_{пускПЧ} = 1.2 \cdot I_{номПЧ}$ для «насосных» ПЧ) обычно не должно превышать 60 с,

Пример 13.1. Выбрать ПЧ для асинхронного двигателя с кз ротором типа МТКН 411-6, являющегося исполнительным двигателем электропривода с приведенным моментом сопротивления $M_{ст} = 220 Hм$; приведенным моментом инерции нагрузки $J_n = 2 кгм^2$; установившейся скоростью $\omega_{уст} = 98.1 \text{ рад/с}$; ($n_{уст} = 935 \text{ об/мин}$); временем разгона до установившейся скорости $t_p = 2.4 \text{ с}$. Параметры двигателя: $P = 22 \text{ кВт}$; $\eta = 87\%$; $\cos \phi = 0.8$; $J_{дв} = 0.52 кгм^2$; $U = 220 \text{ В}$.

1. Определяем полную потребляемую двигателем мощность

$$S_{номпр} [кВА] = \frac{P_{ном}}{\eta \cdot \cos \phi} = \frac{22}{0.87 \cdot 0.8} = 31.6 \text{ кВА}$$

2. Ориентировочно выбираем ПЧ типа Е S024-04-0750А с номинальной мощностью $P_{номПЧ} = 37 \text{ кВт}$ ($P_{номПЧ} > S_{номпр}$) и номинальным выходным током $I_{номПЧ} = 75 \text{ А}$. Перегрузочная способность: 150% $I_{номПЧ}$ в течение 60 с.; 180% $I_{номПЧ}$ в течение 10 с.

3. Проверяем соблюдение условия $I_{номПЧ} > I_{номпр}$, $I_{номпр}$ — ток, потребляемый двигателем от ПЧ в установившемся режиме

$$I_{номпр} [A] = \frac{\omega_{уст} \cdot M_{ст}}{\eta \cdot \cos \phi \cdot U \sqrt{3}} = \frac{98.1 \cdot 220}{0.87 \cdot 0.8 \cdot 220 \cdot \sqrt{3}} = 81.4 \text{ А}$$

Условие $I_{номПЧ} > I_{номпр}$ не выполняется, т.к. $75 \text{ А} < 81.4 \text{ А}$

4. Выбираем следующий по мощности ПЧ типа Е S024-04-0900А с номинальной мощностью $P_{номПЧ} = 45 \text{ кВт}$ ($P_{номПЧ} > S_{номпр}$) и номинальным выходным током $I_{номПЧ} = 90 \text{ А}$. Условие $I_{номПЧ} > I_{номпр}$ выполняется, так как $90 \text{ А} > 81.4 \text{ А}$.

5. Проверяем выбранный ПЧ на перегрузочную способность. Поскольку время разгона $t_p < 10 \text{ с}$, то допустимая перегрузочная способность составляет 180% $I_{номПЧ}$, то есть допустимый выходной ток ПЧ при разгоне $I_{рПЧ} \leq 1.8 I_{номПЧ} \leq 1.8 \cdot 90 \leq 162 \text{ А}$

Ток $I_{номпр.р}$, который двигатель потребляет при линейном разгоне, определим из выражения

$$I_{\text{нотр.р}} [A] = \frac{\omega_{\text{уст}}}{\eta \cdot \cos \phi \cdot U \sqrt{3} \cdot (M_{\text{ст}} + M_{\text{дин}})} =$$

$$= \frac{98.1}{0.87 \cdot 0.8 \cdot 220 \cdot \sqrt{3} \cdot (220 + 103)} = 119.5 A,$$

$$\text{где } M_{\text{дин}} [H\cdot m] = \frac{(J_{\text{н}} + J_{\text{дв}}) \omega_{\text{уст}}}{t_p} = \frac{(2 + 0.52) \cdot 98.1}{2.4} = 103 H\cdot m$$

Поскольку $I_{\text{р ПЧ}} > I_{\text{нотр.р}}$ ($162 A > 119.5 A$), то окончательно вы-бираем ПЧ типа ES024-04-0900A.

13.1.2 Выбор ПЧ при работе с несколькими двигателями При работе ПЧ с несколькими двигателями выбор ПЧ производится на основании соблюдения неравенств, приведенных в табл. 13.2.

Таблица 13.2

Условия выбора ПЧ при работе с несколькими двигателями

Параметр	Формула, условие	
Полная пусковая мощность, требуемая двигателю	$S_{\text{пуск дв}} = S_{\text{ном}} \cdot [1 + \frac{N_S}{N} (\lambda_n - 1)]$	
Пусковой ток, требуемый двигателю	$I_{\text{пуск дв}} = N \cdot I_{\text{ном}} \cdot [1 + \frac{N_S}{N} (\lambda_n - 1)]$	
	При разгоне до 60 с	При разгоне свыше 60 с
	$S_{\text{пуск дв}} \leq 1.5 \cdot P_{\text{ном ПЧ}}$	$S_{\text{пуск дв}} \leq P_{\text{ном ПЧ}}$
	$I_{\text{пуск дв}} \leq 1.5 \cdot I_{\text{ном ПЧ}}$	$I_{\text{пуск дв}} \leq I_{\text{ном ПЧ}}$

N — количество двигателей, параллельно подсоединенных к одному ПЧ, шт.;

N_S — количество одновременно запускаемых двигателей, шт.;

$\lambda_n = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$ — коэффициент кратности пускового момента двигателя;

$S_{\text{ном}}$ — полная номинальная мощность двигателя по паспорту, кВА;

$I_{\text{ном}}$ — номинальный ток двигателя по паспорту, А.

13.1.3 Замечания по выбору и эксплуатации

ПЧ Замечания по выбору

1. Если используется специальный двигатель или более одного двигателя, подключенных параллельно к одному ПЧ, следует вы-бирать ПЧ с номинальным током не меньшим 1.25 номинального тока специального двигателя или суммы номинальных токов всех подключенных в параллель двигателей.

2. Характеристики пуска и разгона/торможения двигателя ограничиваются номинальным током и перегрузочной способностью ПЧ. Если требуется высокий пусковой момент (например, для подъемников, центрифуг и т. д.), выбирайте ПЧ с запасом по мощности или используйте и ПЧ и двигатель большей мощности.

3. Если произойдет отключение ПЧ из-за срабатывания одной из его защит, то напряжение с выхода инвертора будет снято, а двигатель будет тормозиться на свободном выбеге. При необходимости быстрой остановки двигателя при аварийном отключении следует использовать внешний механический тормоз.

4. Количество повторных пусков ПЧ командами ПУСК/СТОП неограниченно, если инвертор не перегружается. Иначе каждый последующий пуск двигателя от ПЧ должен осуществляться не ранее, чем через 10—15 мин. (время, необходимое для охлаждения полупроводникового IGBT модуля). При необходимости осуществления пуска двигателя чаще, чем 1 раз за 5—10 мин., нужно выбрать ПЧ большего номинала или работать при менее тяжелом режиме (меньший пусковой ток, работа с выходным током меньше номинального, низкая температура окружающего воздуха).

Замечания по установке параметров

1. Большинство ПЧ может выдать выходную частоту до 400 Гц при задании ее с цифровой панели. Ошибочное задание высокой частоты может привести к разрушению механизма. Для предотвращения таких ситуаций рекомендуется устанавливать в параметрах жесткое ограничение выходной частоты.

2. Длительная работа двигателя на низкой частоте или высокий уровень напряжения торможения постоянным током может привести к перегреву двигателя. Рекомендуется использовать в таких случаях дополнительную вентиляцию двигателя.

3. Если активизирована функция ограничения перенапряжения в звене постоянного тока, то время торможения может автоматически увеличиваться. При необходимости быстрого торможения высокоинерционных нагрузок надо использовать тормозной резистор или выбрать ПЧ большей мощности.

Замечания по эксплуатации

При работе ПЧ со стандартным трехфазным АД следует иметь в виду следующие особенности:

1. При питании АД от ПЧ потери в двигателе меньше, чем при его непосредственном питании от сети переменного тока, за счет снижения реактивной составляющей тока.

2. При работе стандартного АД на скорости ниже номинальной (особенно с моментом близким к номинальному) возможен перегрев двигателя из-за уменьшения охлаждения за счет снижения скорости обдува собственным вентилятором. Возможное решение проблемы — применение внешнего независимого вентилятора.

3. Стандартный АД может обеспечить длительный максимальный момент (из условий теплового режима) только на номинальной частоте вращения. Поэтому, при снижении скорости вращения необходимо уменьшать нагрузку на валу двигателя. Допустимые нагрузки для стандартного АД приведены на рис. 13.1.

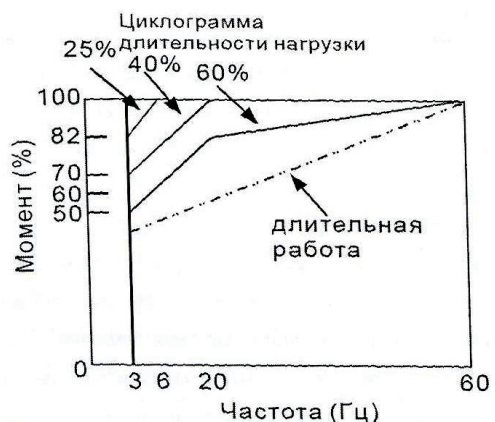


Рис. 13.1 Допустимые нагрузки для стандартного АД при скоростях вращения, меньших номинальной

5. Для обеспечения длительных номинальных моментов при низких скоростях вращения следует использовать специальные двигатели (возможно успешное применение стандартных двигателей с номинальными частотами 750, 1000, 1500 об/мин).

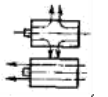
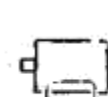
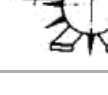
6. При использовании стандартного АД на больших частотах, которые обеспечивает ПЧ, следует учитывать ограничения, связанные с ресурсом подшипников и повышенной вибрации из-за остаточного дисбаланса ротора и исполнительного механизма.

Библиографический список

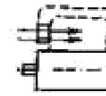
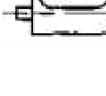
1. Белов, М. П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов / М. П. Белов, В. А. Новиков, Л. Н. Рассудов. — 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2004.—576 с.: ил.
2. Москаленко, В. В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов / В. В. Москаленко. — М.: Энергоатомиздат, 1986.—416 с.: ил.
3. Чиликин, М. Г. Общий курс электропривода: Учебник для вузов / М. Г. Чиликин, А. С. Сандлер. — 6-е изд., доп. и перераб. — М.: Энергоиздат, 1981. —576 с.: ил.
4. Ильинский, Н. Ф. Основы электропривода: Учеб. пособие для вузов / Н. Ф. Ильинский. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство МЭИ, 2003.—224 с.: ил.
5. Кацман, М. М. Электрический привод: учебник для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М. М. Кацман. — 4-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2011.—384 с.: ил.
6. Мейстель, А. М. Электроприводы с полупроводниковым управлением. Динамическое торможение приводов с асинхронными двигателями: Под редакцией М. Г. Чиликина / А. М. Мейстель. — М.: Л.: Издательство «Энергия», 1967.—136 с.: ил.
7. ГОСТ 14254-96 (МЭК 529-89). Межгосударственный стандарт «Степени защиты, обеспечиваемые оболочками (код IP)».
8. ГОСТ 20459-87. Машины электрические вращающиеся. Методы охлаждения. Обозначения.
9. ГОСТ 2479-79. Машины электрические вращающиеся. Условные обозначения конструктивных исполнений по способу монтажа.
10. ГОСТ 15150-69. Исполнение для различных климатических районов.
11. Бесекерский, В. А. Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. — Изд. 4-е, перераб. и доп. — СПб.: Профессия, 2007.—752 с.: ил.
12. Лихачев, В.Л. Электродвигатели асинхронные / В.Л. Лихачев. — М.: СОЛОН-Р, 2002.—304 с.
13. Кенио, Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления: Пер. с англ. / Т. Кенио. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 200 с.: ил.
14. [www.privod.Su/content/file S/vybrat_P.pdf](http://www.privod.Su/content/file/S/vybrat_P.pdf)

Приложение А

Устройства цепи для циркуляции хладагента

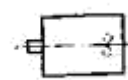
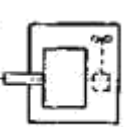
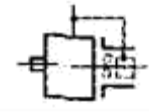
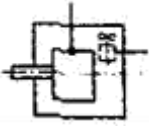
Первая характеристическая цифра	Устройство	Краткая характеристика	Определение
0		Свободная циркуляция	Хладагент свободно попадает в машину из окружающей среды и свободно возвращается в эту среду
1		Вентиляция при помощи входной трубы или входного канала	Хладагент попадает в машину не из окружающей среды, а из другого источника через входную трубу или канал и затем свободно возвращается в окружающую среду
2		Вентиляция при помощи выходной трубы или выходного канала	Хладагент свободно попадает из окружающей среды в машину и удаляется из нее через выходную трубу или канал на некотором расстоянии от машины
3		Вентиляция при помощи входной и выходной трубы или канала	Хладагент попадает в машину не из окружающей среды, а из другого источника через входную трубу или канал, а затем удаляется из машины через выходную трубу или канал на некотором расстоянии от машины
4		Охлаждение внешней поверхности машины (с использованием окружающей среды)	Первичный хладагент циркулирует в замкнутой цепи и отдает свое тепло вторичному хладагенту, которым является окружающая машину среда. Для улучшения коэффициента теплопередачи поверхность может быть ребристой
5		Встроенный охладитель (использующий окружающую среду)	Первичный хладагент циркулирует в замкнутой цепи и отдает свое тепло в охладителе вторичному хладагенту, которым является окружающая машину среда; встроенный в машину охладитель является неотъемлемой ее частью

Продолжение

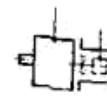
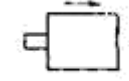
Первая характеристическая цифра	Устройство	Краткая характеристика	Определение
6		Охладитель, установленный на машине (использующий окружающую среду)	Первичный хладагент циркулирует в замкнутой цепи и отдает свое тепло в охладителе вторичному хладагенту, которым является окружающая машину среда; охладитель — самостоятельное устройство, монтируемое непосредственно на машине
7		Встроенный охладитель (не использующий окружающую среду)	Первичный хладагент циркулирует в замкнутой цепи и отдает свое тепло вторичному хладагенту, которым не является окружающая среда; встроенный в машину охладитель является неотъемлемой ее частью
8		Охладитель, установленный на машине (не использующий окружающую среду)	Первичный хладагент циркулирует в замкнутой цепи и отдает свое тепло вторичному хладагенту, которым не является окружающая среда. Охладитель представляет собой самостоятельное устройство, установленное непосредственно на машине
9		Охладитель, установленный отдельно от машины	Первичный хладагент циркулирует в замкнутой цепи и отдает свое тепло вторичному хладагенту в охладителе, являющемся самостоятельным устройством, устанавливаемым отдельно от машины

Приложение Б

Способы перемещения хладагента

Вторая характеристическая цифра	Устройство	Краткая характеристика	Определение
0		Свободная конвекция	Движение хладагента осуществляется за счет разницы температур. Вентилирующее действие ротора незначительно
1		Самовентиляция	Движение хладагента осуществляется либо за счет вентилярующего действия ротора, либо при помощи специального устройства, смонтированного на валу ротора машины
2		Вентиляция при помощи встроенного устройства	Движение хладагента осуществляется при помощи встроенного устройства, смонтированного непосредственно на валу машины, например, внутреннего вентилятора с зубчатой передачей или ременным приводом
3		Вентиляция при помощи независимого устройства, установленного на машине	Движение хладагента осуществляется при помощи независимого промежуточного электрического или механического устройства, установленного непосредственно на машине, например вентилятора, вращаемого электродвигателем, получающим питание от зажимов охлаждаемой машины. Оставляется для будущего использования
5		Вентиляция при помощи встроенного независимого устройства	Движение хладагента осуществляется при помощи встроенного устройства, которое получает энергию независимо от основной машины, например внутреннего вентилятора, приводимого в движение электродвигателем, питаемым независимо от охлаждаемой машины

Продолжение

Вторая характеристическая цифра	Устройство	Краткая характеристика	Определение
6		Вентиляция при помощи независимого устройства, установленного на машине	Движение хладагента осуществляется при помощи промежуточного устройства, установленного на машине, питаемого независимо от охлаждаемой машины
7		Вентиляция при помощи независимого от машины устройства или путем подачи хладагента под давлением	Движение хладагента осуществляется при помощи отдельного устройства, не установленного на машине и независимого от нее, или под давлением в системе циркуляции хладагента, например, путем подачи от водопроводной сети или от газовой магистрали
8		Вентиляция при помощи относительно движения машины	Движение хладагента осуществляется при помощи относительного движения машины через хладагент, например тяговый двигатель, охлаждаемый окружающим воздухом, или двигатель, приводящий в движение вентилятор и охлаждаемый основным воздушным потоком
9	-	Циркуляция при помощи любого другого устройства	Цифра 9 может стоять за первой характеристической цифрой, если устройство цепей охлаждения оговорено; одна, если не оговорено устройство системы охлаждения; вместо первой цифры ставится черточка

Электронное учебное издание

Леонов Анатолий Петрович

**ВЫБОР ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ МЕХАНИЗМОВ**

ЭЛЕКТРОННОЕ МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

Филиал «Протвино»
государственного университета «Дубна»
142281 г. Протвино Московской обл.,
Северный проезд, д. 9

