

13. Основы электропривода

Большинство современных машин, механизмов, агрегатов приводится в движение электрическими двигателями, т.е. имеет *электрический привод*. В каждом таком устройстве требуется обеспечить линейное, вращательное или более сложное движение рабочего органа с заданными координатами: положением, скоростью и/или ускорением. Это создаёт бесконечное разнообразие задач, решение которых осуществляется очень ограниченным набором серийно изготавливаемых двигателей. В общем случае получение требуемых характеристик возможно путём регулирования параметров электрической энергии источника питания двигателя и регулирования параметров механической энергии, передаваемой рабочему органу. Управление потоком электрической энергии осуществляется различными преобразователями: трансформаторами, выпрямителями, инверторами, преобразователями частоты и т.п. Преобразование параметров движения ротора двигателя осуществляется системой механической передачи: редукторами, кулисными, кулачковыми, кривошипно-шатунными и др. механизмами, различными фиксирующими и тормозными устройствами. Для управления требуется также информация о регулируемых координатах и параметрах, а также устройство её обработки, формирующее воздействия на регулируемые объекты. Таким образом, современный электрический привод является сложной электромеханической системой, состоящей из электродвигателя, преобразовательного, передаточного и управляющего устройств, предназначенных для приведения в движение рабочего органа машины и управления этим движением.

В последнее время в связи с развитием полупроводниковых преобразователей электрической энергии наметилась тенденция к отказу от использования механических передач для формирования и управления движением. Во многих случаях такой *безредукторный привод* позволяет получить характеристики, которые сложно или невозможно получить в приводах с механическими передачами. Кроме того, отказ от сложной механики позволяет существенно уменьшить стоимость, массу и габариты привода, повысить надёжность и срок службы.

Теория электропривода является самостоятельной инженерной дисциплиной и специальностью, поэтому в данном курсе мы ограничимся только ознакомлением с основными вопросами.

13.1. Уравнение движения электропривода

При работе двигателя на его вал действуют электромагнитный момент M , момент нагрузки M_c и динамический момент $M_d = Jd\Omega/dt$

$$M - M_c = Jd\Omega/dt \quad (13.1)$$

где: J – момент инерции движущихся тел, присоединённых к валу двигателя; Ω – угловая скорость вращения.

Выражение (13.1) называется *уравнением движения привода*. Если момент, развиваемый двигателем, больше момента нагрузки $M > M_c$, то

$d\Omega/dt > 0$ и привод ускоряется. В случае $M < M_c \Rightarrow d\Omega/dt < 0$ и происходит замедление привода. При равенстве моментов $M = M_c$ ускорение привода равно нулю и он работает в установившемся режиме.

В общем случае вращающие моменты двигателя и нагрузки могут иметь любые знаки, и их выбор зависит от условий работы привода. Момент считается положительным, если он действует в направлении вращения. Поэтому при переходе двигателя в режим рекуперативного торможения знак момента M в (13.1) будет отрицательным. В то же время, момент нагрузки может быть положительным, например, при спуске груза, подвешенного на валу двигателя, т.к. в этом случае он действует в направлении вращения.

Динамический или инерционный момент проявляется в переходных режимах работы и всегда действует встречно, препятствуя ускорению или замедлению привода.

Уравнение (13.1) позволяет определить скорость вращения Ω , а также угловое ускорение $d\Omega/dt$ и угловое положение $\vartheta = \int \Omega dt$ вала двигателя, если известен момент инерции движущихся тел и вращающие моменты двигателя и нагрузки. Если рабочий орган присоединён непосредственно к валу двигателя, то момент инерции в (13.1) будет равен сумме моментов инерции

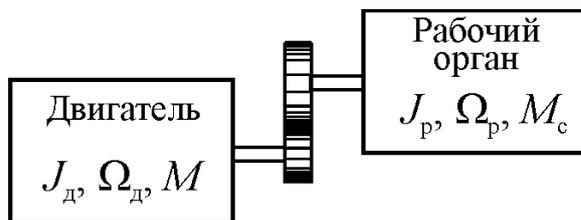


Рис. 13.1

ротора двигателя и рабочего органа, а момент нагрузки – моменту, создаваемому рабочим органом. Сложнее дело обстоит, если рабочий орган присоединён к двигателю через механическую передачу, например, через одноступенчатый редуктор (рис. 13.1). В

этом случае момент инерции и вращающий момент рабочего органа нужно привести к валу двигателя.

Пренебрегая потерями энергии в редукторе, из условия сохранения мощности получим значение приведённого или расчётного момента нагрузки

$$M'_c \Omega_d = M_c \Omega_p \Rightarrow M'_c = M_c \Omega_p / \Omega_d = M_c / k, \quad (13.2 \text{ а})$$

где $k = \Omega_d / \Omega_p$ – передаточное число редуктора.

Если рабочий орган перемещается поступательно со скоростью v_p и создаёт при этом нагрузку на передачу в виде силы F_c , то таким же образом можно определить величину создаваемого им момента на валу двигателя

$$M'_c \Omega_d = F_c v_p \Rightarrow M'_c = F_c v_p / \Omega, \quad (13.2 \text{ б})$$

Момент инерции рабочего органа приводится к валу двигателя при условии сохранения кинетической энергии

$$J'_p \Omega_d^2 / 2 = J_p \Omega_p^2 / 2 \Rightarrow J'_p = J_p \left(\Omega_p / \Omega_d \right)^2 = J_p / k^2. \quad (13.3 \text{ а})$$

При поступательном движении к валу двигателя приводится движущаяся масса рабочего органа

$$J'_p \Omega_d^2 / 2 = m_p v_p^2 / 2 \Rightarrow J'_p = m_p (v_p / \Omega_d)^2. \quad (13.3 б)$$

Полный момент инерции привода равен $J = J_d + J'_p$.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое уравнение движения привода?
2. Что такое динамический вращающий момент?
3. Что такое передаточное число редуктора?
4. Как приводится к валу двигателя вращающий момент, действующий на рабочий орган механизма, приводимого во вращение?
5. Как приводится к валу двигателя сила, действующая на поступательно движущийся рабочий орган?
6. Как приводится к валу двигателя момент инерции (масса) рабочего органа?

13.2. Ускорение и замедление привода

Длительность переходных режимов привода имеет большое значение для практики. Она может быть определена интегрированием уравнения (13.1). Разделяя переменные, получим

$$dt = J d\Omega / (M - M_c). \quad (13.4)$$

Отсюда время изменения скорости вращения от Ω_1 до Ω_2

$$t = \int_{\Omega_1}^{\Omega_2} J d\Omega / (M - M_c). \quad (13.5)$$

В общем случае вращающие моменты и момент инерции в (13.5) являются функциями скорости вращения, и интегрирование может быть сложной задачей. В простейшем же случае при $M \approx \text{const}$, $M_c \approx \text{const}$, $J = \text{const}$ –

$$t = J(\Omega_2 - \Omega_1) / (M - M_c). \quad (13.6)$$

На рис. 13.2 показаны графики пуска *а* и торможения *б* привода при постоянных значениях

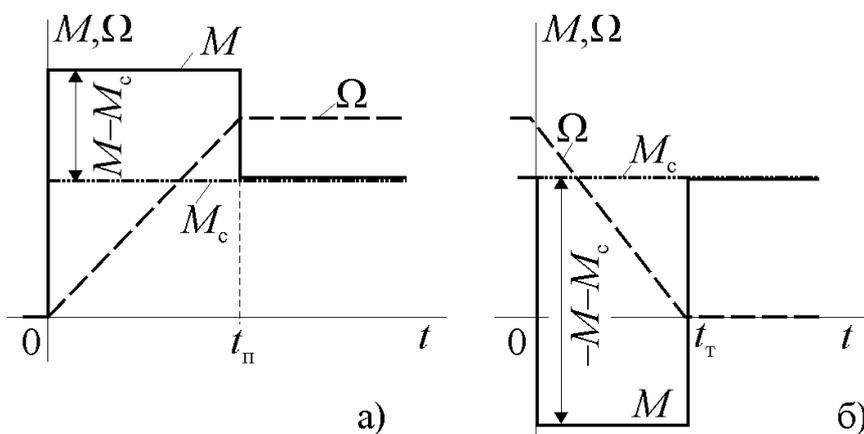


Рис. 13.2

постоянных значений моментов двигателя и нагрузки. При торможении момент двигателя действует встречно по отношению к направлению вращения и поэтому имеет отрицательный знак.

Выражением (13.6) можно восполь-

зоваться и в более сложных случаях. Например, при расчёте времени пуска асинхронного двигателя. Для этого нужно разделить механическую характеристику на участки $\Delta\Omega$, в пределах которых можно считать динамический момент постоянным $M_{dk} = M - M_c$ (рис. 13.3), а затем, рассчитав для каж-

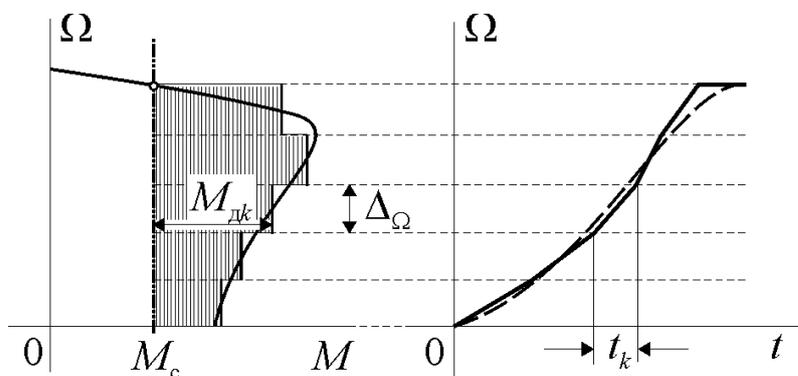


Рис. 13.3

дого участка время $t_k = J\Delta\Omega / M_{dk}$, построить ломаную линию разгона. Для сравнения на рис. 13.3 штриховой линией показана также кривая, полученная интегрированием (13.5). Погрешность дискретизации здесь меньше погрешности представления механической характери-

ки двигателя по справочным данным.

Вопросы для самопроверки

1. От чего зависит время разгона (торможения) привода?
2. Как определяются знаки вращающихся моментов в уравнении движения привода?
3. Как построить линию разгона двигателя графоаналитическим методом?

13.3. Нагрев и охлаждение двигателей

В процессе работы двигателя происходит нагрев различных элементов его конструкции, связанный с потерями энергии при преобразовании. Нагревается магнитопровод в результате перемагничивания и протекания вихревых токов, нагреваются обмотки протекающим по ним током, нагреваются от трения подшипники и вал. Увеличение нагрузки двигателя приводит к увеличению потерь в его обмотках и к увеличению их нагрева.

Способность материалов выдерживать нагревание без существенного изменения свойств называется термостойкостью. Она определяется допустимой температурой нагрева или допустимым превышением температуры над температурой окружающей среды. Наихудшей термостойкостью из всех элементов конструкции двигателя обладает электрическая изоляция, поэтому именно она определяет допустимую нагрузку машины. Чем выше термостойкость изоляции, тем больше удельная мощность двигателя, т.е. тем большую нагрузку допускает двигатель при тех же габаритах. С другой стороны, температура двигателя определяется выделяющимся в нём теплом и условиями теплоотвода. Поэтому нагрузку двигателя можно увеличить, если улучшить теплоотвод, например, за счёт принудительной вентиляции.

По термостойкости изоляция электрических машин делится на семь классов. В настоящее время в двигателях применяется изоляция классов *E*, *B* и *F* с предельно допустимыми температурами 120 °С, 130 °С и 155 °С соответственно.

Теплообмен в машине является сложнейшим часто неформализуемым физическим процессом и может рассматриваться в общем виде только при определённых упрощениях, главным из которых является представление двигателя однородным телом с бесконечной теплопроводностью. В этом случае уравнение теплового баланса имеет вид

$$Qdt = A\theta dt + Cd\theta, \quad (13.7)$$

где $Q = \Delta P$ – количество теплоты, выделяемое двигателем в единицу времени (мощность потерь в двигателе); A – теплоотдача, т.е. количество теплоты, отдаваемой двигателем в окружающую среду в единицу времени при разности температур двигателя и среды в 1 °С; C – теплоёмкость двигателя, т.е. количество теплоты, необходимое для повышения температуры двигателя на 1 °С; $\theta = \vartheta_d - \vartheta_c$ – превышение температуры двигателя ϑ_d над температурой окружающей среды ϑ_c .

Решением уравнения (13.7) является функция

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-t/T}) + \theta_0 e^{-t/T}, \quad (13.8)$$

где: θ_0 , $\theta_y = Q/A$ – начальное и установившееся (конечное) значения превышения температуры двигателя над температурой окружающей среды; $T = C/A$ – тепловая постоянная времени двигателя.

Выражение (13.8) соответствует как процессу нагревания, так и охлаждения двигателя. Необходимо только подставлять в него соответствующие значения. В случае нагревания от температуры окружающей среды ($\theta_0 = 0$) и охлаждения до этой температуры ($\theta_y = 0$) выражение (13.8) упрощается и принимает вид

$$\theta = \theta_y (1 - e^{-t/T_n}), \quad (13.9 \text{ а})$$

$$\theta = \theta_0 e^{-t/T_o}. \quad (13.9 \text{ б})$$

Длительность нагревания или охлаждения не зависит от начальных и конечных значений температуры и определяется только постоянной времени, т.е. соотношением теплоёмкости двигателя и теплоотдачи. На рис. 13.4 показаны кривые нагрева *a* и охлаждения *б* двигателя при разных начальных условиях и мощности потерь. При изменении нагрузки (кривые 1), а также при включении и отключении двигателя с различной нагрузкой (кривые 2 и 3) нагрев и охлаждение происходит за время $\approx 3T_n$ и $\approx 3T_o$. У машин малой и средней мощности постоянная времени составляет несколько минут или десятков минут, а у машин большой мощности – несколько часов.

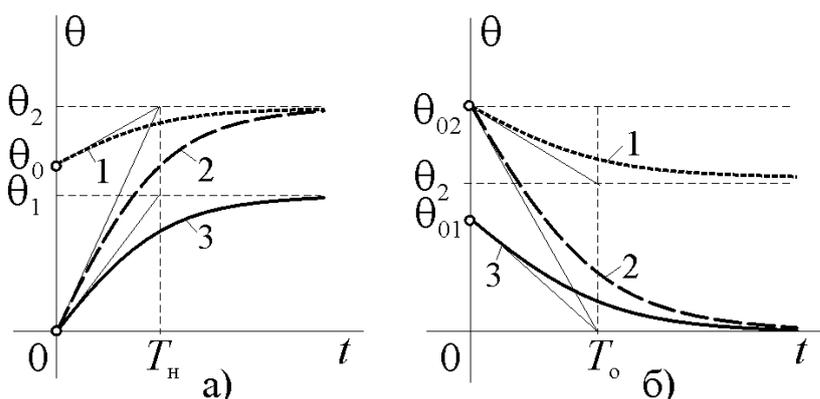


Рис. 13.4

Основной теплоотвод у двигателей происходит с помощью естественной и искусственной вентиляции. Естественная вентиляция создаётся перемещением воздуха за счёт изменения его плотности при нагревании. Возникающий таким образом воздушный поток

не может обеспечить эффективный теплоотвод и во всех машинах используют те или иные устройства, создающие движение воздуха механическим способом. Чаще всего для этого используется крыльчатка, установленная на валу машины и создающая воздушный поток при вращении ротора. Такие двигатели относятся к классу самовентилируемых машин. При значительном снижении скорости вращения или остановке вентиляция в них прекращается и условия теплоотвода существенно ухудшаются $A_o \ll A_n$. Это явление оценивают коэффициентом ухудшения теплоотдачи

$$\beta_o = A_o / A_n = T_o / T_n \leq 1,0 \quad (13.10)$$

У самовентилируемых машин коэффициент ухудшения теплоотдачи составляет около 0,25...0,35. У машин с принудительной вентиляцией, осуществляемой системой вентиляции независимой от режима работы двигателя, например, отдельным двигателем-вентилятором, условия нагрева и охлаждения одинаковы и $\beta_o = 1$.

Вопросы для самопроверки

1. Какой элемент электрической машины обладает наименьшей термостойкостью?
2. Как можно увеличить нагрузку машины?
3. Чем определяется рабочая температура машины?
4. Чем определяется время нагрева машины до установившейся температуры?
5. Чем определяется установившееся значение температуры при нагреве машины?
6. Как изменяются кривые нагрева и охлаждения машины при изменении нагрузки?
7. Какие машины называются самовентилируемыми?
8. Как учитывается при расчётах ухудшение теплоотвода при снижении скорости вращения?

13.4. Номинальные режимы работы двигателей

Процесс теплообмена зависит не только от величины нагрузки и тепловых параметров двигателя, но также и от характера нагрузки, т.е. от её распределения во времени. Характер нагрузки имеет столь существенное значение, что двигатели изготавливаются с расчётом на работу в определённых условиях. Стандартом предусмотрено восемь номинальных режимов работы $S1 \dots S8$, но мы остановимся на первых трёх, т.к. остальные, по сути, являются развитием и уточнением режима $S3$ и до недавнего времени они не входили в нормативные документы.

Продолжительный режим (S1) соответствует работе двигателя с постоянной нагрузкой $P = \text{const}$ и мощностью потерь $\Delta P = \text{const}$. При этом двигатель нагревается до установившейся температуры θ_y . В таком режиме обычно работают приводы насосов, вентиляторов, компрессоры, бумагоделательные машины и др.

При *кратковременном режиме (S2)* время работы t_p двигателя меньше $3T_n$, поэтому он не успевает нагреться до установившейся температуры. Длительность паузы в работе при кратковременном режиме такова, что двигатель охлаждается до температуры окружающей среды. Этот режим характерен для приводов различных механизмов: шлюзов, разводных мостов, серводвигателей бортовых систем и др.

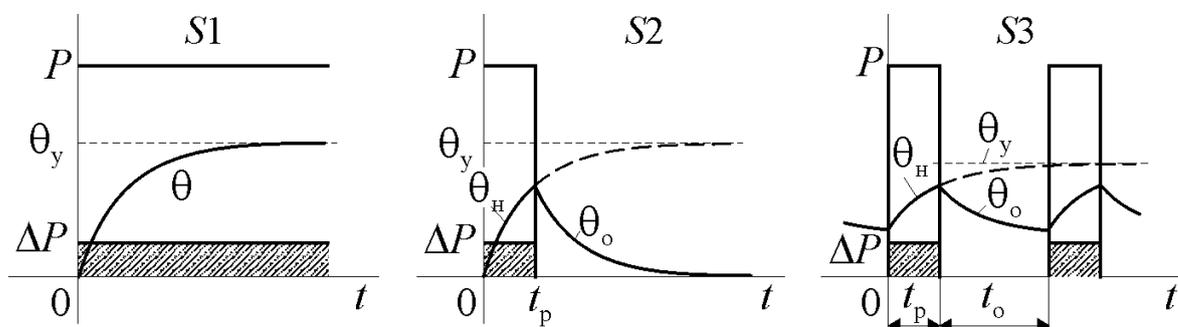


Рис. 13.5

Повторно-кратковременный режим (S3) соответствует циклической работе двигателя, при которой за время работы t_p он не достигает установившейся температуры θ_y , а за время паузы t_o – не охлаждается до температуры окружающей среды. Главной характеристикой повторно-кратковременного режима является продолжительность включения двигателя

$$\text{ПВ}\% = \frac{t_p}{t_p + t_o} 100. \quad (13.11)$$

Номинальными продолжительностями включения являются 15%, 25%, 40% и 60%. Мощность, ток и скорость вращения, указанные в справочных данных двигателей, рассчитанных на работу в повторно-кратковременном режиме, соответствуют определённой продолжительности включения. Типичными

механизмами с повторно-кратковременным режимом работы являются краны, различные металло- и деревообрабатывающие станки и т.п.

Вопросы для самопроверки

1. По какому признаку определяют режим работы двигателя?
2. До какой температуры нагревается двигатель в длительном режиме работы?
3. До какой температуры охлаждается двигатель в кратковременном режиме работы?
4. До какой температуры нагревается и охлаждается двигатель в повторно-кратковременном режиме работы?
5. Что такое продолжительность включения двигателя?
6. Какие продолжительности включения установлены стандартом?

13.5. Выбор мощности двигателей

Выбор мощности двигателя для привода является важнейшей задачей, т.к. завышение мощности приводит не только к лишним затратам при его приобретении, но также к дополнительным эксплуатационным расходам, связанным с работой двигателя при низком КПД. С другой стороны, занижение мощности уменьшает производительность оборудования и может привести к отказу двигателя в работе. Кроме того, даже небольшое занижение мощности приводит к повышению рабочей температуры, что существенно уменьшает надёжность привода и сокращает время наработки на отказ. Например, повышение рабочей температуры изоляции на 8...10 °С вызывает её ускоренное старение и вдвое сокращает срок службы.

При длительном режиме работы мощность двигателя P_d выбирают по

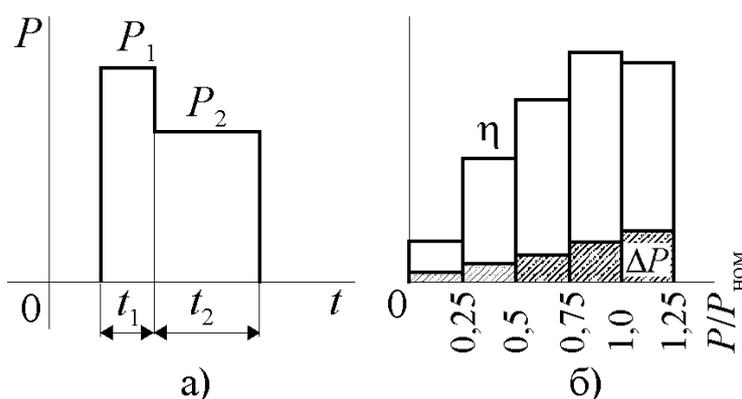


Рис. 13.6

мощности приводимого в движение механизма P из условия $P_d \geq P$. При этом мощность P_d должна быть ближайшей из серии двигателей данного типа.

В случае длительного режима работы с переменной нагрузкой мощность двигателя рассчитывают методом средних потерь по нагрузочной диаграмме (рис. 13.6, а).

Для этого сначала по среднему значению мощности нагрузки

$$P_{cp} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (13.12)$$

выбирают двигатель $P_d \approx (1,1 \dots 1,3) P_{cp}$.

Затем по справочным данным зависимости КПД двигателя от нагрузки $\eta(P/P_{\text{ном}})$ (рис. 13.6, б) определяют потери в двигателе для каждого интервала работы с постоянной мощностью нагрузки

$$\Delta P_k = P_{\text{ном}} \frac{1 - \eta_k}{\eta_k} \quad (13.13)$$

где η_k – КПД двигателя на k -м интервале, и рассчитывают среднее значение потерь

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (13.14)$$

В случае существенного ухудшения теплоотдачи на всех или на некоторых интервалах это учитывается введением в (13.14) коэффициента β_k

$$\Delta P_{\text{ср}} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \dots + \Delta P_n t_n}{\beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \dots + \beta_n t_n}. \quad (13.15)$$

Коэффициент ухудшения теплоотдачи для самовентилируемых двигателей можно считать линейно зависящим от скорости вращения n , т.е. $\beta_k = \beta_0 + (1 - \beta_0)n/n_{\text{ном}}$, где β_0 – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

Если $\Delta P_{\text{ср}} \approx \Delta P_{\text{ном}}$, то выбор сделан правильно. В противном случае выбирают следующий двигатель из серии и повторяют расчёт.

Метод средних потерь точен, но трудоёмок. Его можно заменить приближёнными методами, если выполняются какие-либо дополнительные условия работы привода.

Если потери в стали, механические потери и сопротивления обмоток существенно изменяются при изменении нагрузки, что эквивалентно условиям $\Phi \approx \text{const}$, $n \approx \text{const}$ и $R \approx \text{const}$, то средние потери будут пропорциональны квадрату тока, потребляемого двигателем. Тогда двигатель можно выбрать *методом эквивалентного тока*

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \leq I_{\text{ном}}.$$

В случае, если момент двигателя пропорционален току, например, в двигателе постоянного тока с магнитоэлектрическим возбуждением и нагрузка задана вращающим моментом, то выбор удобнее производить по *эквивалентному моменту нагрузки*

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \leq M_{\text{ном}}.$$

Методы эквивалентного тока и момента используются в основном для предварительного выбора двигателя. Для этой цели, если $n \approx \text{const}$, можно использовать также *метод эквивалентной мощности*

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \leq P_{\text{ном}}. \quad (13.16)$$

При кратковременном режиме работы двигатель в течение времени t_p работает с нагрузкой мощностью P (рис. 13.7), а затем отключается и охлаждается до температуры окружающей среды.

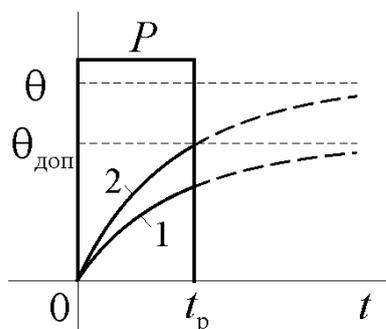


Рис. 13.7

При выборе двигателя по условию $P_d = P$ он не успеет за время работы t_p достичь допустимого превышения температуры $\theta_{\text{доп}} = \Delta P_{\text{ном}} / A$ (кривая 1 на рис. 13.7), т.е. двигатель будет недоиспользован по нагреву. Поэтому нужно выбрать двигатель меньшей мощности $P_d < P$ так, чтобы за время работы он достиг допустимой температуры $\theta(t_p) = \Delta P(1 - e^{-t_p/T_H}) / A = \theta_{\text{доп}}$ (кривая 2 на рис.

13.7). Отсюда коэффициент тепловой перегрузки двигателя

$$\alpha_T = \frac{\Delta P}{\Delta P_{\text{ном}}} = \frac{1}{1 - e^{-t_p/T_H}} > 1. \quad (13.17)$$

Таким образом, коэффициент тепловой перегрузки определяется соотношением времени работы t_p и постоянной времени нагрева T_H .

Из выражения (13.17) несложно найти время работы, в течение которого допускается перегрузка

$$t_p = T_H \ln \frac{\alpha_T}{\alpha_T - 1}.$$

Двигатели, предназначенные для кратковременной работы, выпускаются с нормированным значением продолжительности работы $t_p = 10, 30, 60, 90$ мин. Следовательно, выбранный по каталогу двигатель может быть загружен номинальной мощностью в течение указанного времени и будет полностью использован по нагреву.

При повторно-кратковременном режиме работы выбор мощности двигателя производится в соответствии с продолжительностью включения. Если продолжительность включения меньше минимального стандартного значения 15%, то выбор двигателя производится так же, как для кратковременного режима. В случае продолжительности включения больше, чем 60%, двигатель выбирают как для продолжительного режима работы. При соответствии нагрузочной диаграммы режиму S3 и стандартном значении продолжительности включения выбор двигателя производится просто по каталогу.

На практике часто встречаются режимы работы, когда за время включения меняется мощность нагрузки (рис. 13.8, а). Тогда нагрузочная диаграмма вначале приводится к стандартному виду S3. Для этого по выражению (13.16)

подсчитывают эквивалентную мощность $P_э$, а также суммарное время включённого Σt_p и отключённого Σt_o состояний. Затем определяется расчётная продолжительность включения

$$\varepsilon_p = \frac{\Sigma t_p}{\Sigma t_p + \Sigma t_o}.$$

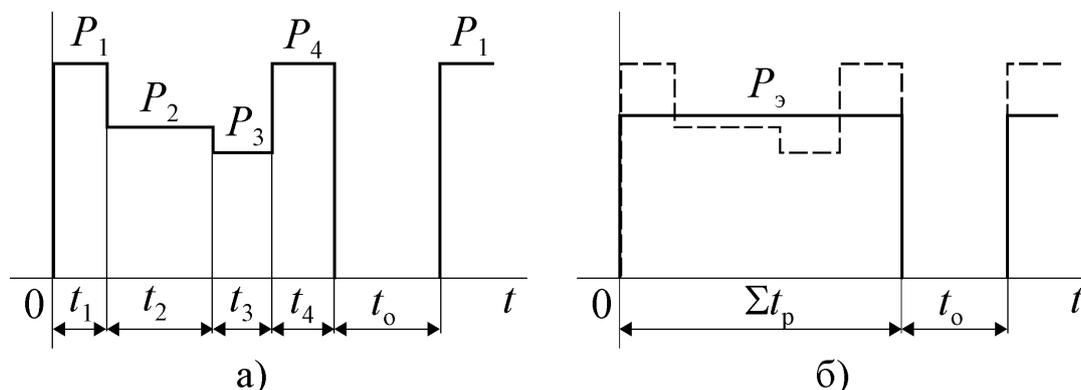


Рис. 13.8

Если двигатель самовентилируемый и в переходных режимах теплоотвод ухудшается, то продолжительность включения рассчитывают по уточнённой формуле

$$\varepsilon_p = \frac{\Sigma t_p + \Sigma t_{п} + \Sigma t_{т}}{\Sigma t_p + \beta_{п} \Sigma t_{п} + \beta_{т} \Sigma t_{т} + \beta_0 \Sigma t_o},$$

где: $\Sigma t_p, \Sigma t_{п}, \Sigma t_{т}$ – суммарное время работы, пусков и торможений за цикл; $\beta_{п}, \beta_{т}, \beta_0$ – коэффициенты ухудшения охлаждения при пуске, торможении и остановке.

Пересчёт мощности на стандартное значение производится по формуле

$$P_{ст} = P_э \sqrt{\varepsilon_p / \varepsilon_{ст}},$$

где $\varepsilon_{ст} = 0,15; 0,25; 0,4; 0,6$. Например, при $\varepsilon_p = 0,3$ значения мощности двигателя для ближайших стандартных продолжительностей включения будут равны $P_{0,25} = P_э \sqrt{0,3/0,25} = 1,1P_э$; $P_{0,4} = P_э \sqrt{0,3/0,4} = 0,86P_э$. По этим величинам по каталогу выбирают двигатель с ближайшим большим или равным значением мощности.

Вопросы для самопроверки

1. Почему нельзя использовать в приводе двигателя с завышенной и заниженной мощностью?
2. Как выбирается мощность двигателя при длительном режиме работы с постоянной нагрузкой?
3. Как выбирается мощность двигателя при длительном режиме работы с переменной нагрузкой?

4. Как учитывается ухудшение теплоотдачи при выборе мощности двигателя?
5. Как выбирается мощность двигателя методом средних потерь?
6. При каких условиях при выборе мощности двигателя можно пользоваться методами эквивалентного тока, момента и мощности?
7. Как производится выбор мощности двигателя для кратковременного режима работы?
8. Укажите стандартные значения продолжительности работы двигателей, используемых в кратковременном режиме.
9. Как учитываются условия охлаждения двигателя при выборе мощности для повторно-кратковременного режима работы?
10. Как производится пересчёт мощности на стандартное значение продолжительности включения?

13.6. Выбор типа двигателя

При разработке приводов помимо мощности приходится решать задачу выбора типа и конструктивного исполнения двигателя. В случае необходимости длительной работы двигателя с постоянной нагрузкой и скоростью вращения выбор типа двигателя обычно не вызывает затруднений. Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендуется в этих случаях использовать синхронные двигатели, т.к. они экономичнее в эксплуатации, чем асинхронные, и обладают лучшими массогабаритными показателями. Однако для приводов малой и средней мощности часто применяют асинхронные короткозамкнутые двигатели, т.к. они дешевле и проще в эксплуатации.

Для приводов механизмов с частыми и тяжёлыми пусками или требующих регулирования скорости вращения применяют все типы двигателей, но двигатели постоянного тока допускается применять только в тех случаях, когда бесколлекторные двигатели не могут обеспечить требуемые технические параметры или неэкономичны. Это требование связано с тем, что двигатели постоянного тока существенно дороже, менее надёжны и требуют обязательного ухода при эксплуатации. В то время как бесколлекторные двигатели свободны от этих недостатков, а в сочетании с полупроводниковыми преобразователями они позволяют получить практически те же или лучшие технические показатели.

По конструкции двигатели условно делятся на двигатели открытого, защищённого и закрытого исполнения. Степень защиты двигателей обозначается в документации латинскими буквами *IP* и следующими за ними двумя цифрами.

Первая цифра 0...6 обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с движущимися или находящимися под напряжением частями двигателя, а также самого двигателя от попадания в него посторонних предметов. Нулевое значение обозначает отсутствие защиты. Увеличение значения

соответствует увеличению степени защиты вплоть до цифры 6, означающей пыленепроницаемое исполнение.

Вторая цифра 0...8 обозначает защиту двигателя от воздействия влаги и соответствует диапазону от полного отсутствия защиты (0) до способности двигателя длительно работать при погружении в воду (8).

Двигатели с высокой степенью защиты, изготавливаются в защитных оболочках, исключающих попадание внутрь пыли и влаги. Для теплоотвода они снабжаются герметичными воздуховодами, присоединяемыми к системе вентиляции.

Двигатели, работающие в закрытых помещениях с нормальной средой могут иметь степень защиты от *IP00* до *IP20*. Работающие на открытом воздухе двигатели должны иметь степень защиты не менее *IP44*. В общем случае степень защиты двигателей, используемых в приводах различных установок, определяется соответствующей нормативно-технической документацией.

Вопросы для самопроверки

1. Какими принципами следует руководствоваться при выборе типа двигателя?
2. Как обозначается степень защиты двигателя?
3. Что означает первая (вторая) цифра в обозначении степени защиты двигателя?