

## Тема № 6:

---

### *Нагрев и охлаждение электродвигателей*

1. Нагрев и охлаждение электродвигателей. Причины нагрева. Постоянные и переменные потери, коэффициент потерь. Понятие установившегося, допустимого и номинального превышения температуры
2. Уравнение нагрева и охлаждения электродвигателей. Вывод, анализ входящих величин.
3. Постоянная времени нагрева ее физический смысл и способы определения.
4. Зависимость потерь мощности и установившегося превышения температуры от нагрузки.
5. Влияние температуры окружающей среды на мощность электродвигателя.

## ***1. Причины нагрева. Постоянные и переменные потери, коэффициент потерь. Понятие установившегося, допустимого и номинального превышения температуры***

При всяком преобразовании одного вида энергии в другой часть потребляемой энергии теряется и преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой мощностью и отдаваемой называют потерями и для удобства при сравнении с мощностью машины оценивают в единицах мощности (*Вт* или *кВт*). **Потери в электродвигателях в зависимости** от вызывающих их физических процессов подразделяют на электрические, магнитные, механические, вентиляционные и добавочные. **Электрические потери** обусловлены протеканием тока по сопротивлениям обмоток, соединительных проводов, скользящих контактов; магнитные потери связаны с наличием вихревых токов и гистерезиса на участках магнитопроводов с переменным магнитным потоком. **Механические потери**, возникают в результате трения в подшипниках, щеток о коллектор, вращающихся частей двигателя о воздух. Потери энергии в двигателе вызывает нагрев отдельных его частей. Особенностью электрических машин является тесное конструктивное сочетание металлов и изоляции, т.е. материалов, имеющих резко различные тепловые характеристики. В то время как металлы сохраняют свои рабочие свойства при температурах до 400... 500 °С и выше, верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении, в зависимости от класса их нагревостойкости составляет 90... 180 °С. Чем больше нагревостойкость изоляционных материалов, тем меньше размеры двигателя при одинаковой мощности, или больше мощность при тех же его размерах. Лучшему использованию двигателя способствует так же более совершенная система его охлаждения.

**Оценка нагревостойкости и классификация** изоляционных материалов, применяемые в электрических машинах согласно ГОСТ 8865-93.

Стандарт распространяется на электротехнические изделия и устанавливает систему классификации электроизоляции электротехнических изделий по нагревостойкости.

Стойкость изоляции электротехнических изделий зависит от многих факторов, таких как

***температура, электрические и механические воздействия, вибрация, агрессивность среды, химические воздействия, влажность, загрязнение и радиационное излучение.***

Классы нагревостойкости и соответствующие им температуры приведены в таблице:

Обозначение класса	Температура, °С
--------------------	-----------------

нагревостойкости	
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
200	200
220	220
250	250

**Температура, приведенная в настоящем стандарте, является фактической температурой изоляции.**

Электродвигатели конструируются так, что предельные температуры обмоток с изоляцией различных классов достигаются при номинальной нагрузке на высоте до 1000 м. над уровнем моря и температуре окружающей среды +40 °С, принимаемой за расчетную. Когда температура окружающей среды превышает +40 °С или высота над уровнем моря более 1000 м нагрузка двигателя должна снижаться. **За номинальное принимается превышение температуры** двигателя, равное разности между допустимой температурой нагрева для данного класса изоляции и расчетной температурой окружающей среды, равной +40 °С.

При длительной эксплуатации изоляция усыхает, снижается ее диэлектрическая и механическая прочность, уменьшается пробивное напряжение. Основным фактором **старения изоляции** является температура. Чем выше рабочая температура двигателя, тем быстрее происходит старение изоляции и уменьшается срок службы двигателя. Соблюдение установленных ограничений по температуре нагрева обеспечивает срок службы изоляции для новых серий двигателей 15...20 лет. Нагрев выше допустимых температур ведет к разрушению изоляции и сокращению срока службы двигателя. Так, для изоляции класса А превышение допустимой температуры нагрева на каждые 8...10 °С сокращает срок службы изоляции вдвое.

## 2. Уравнения нагрева и охлаждения электродвигателей.

Условия нагрева и охлаждения отдельных частей двигателя определяются законами тепловыделения, теплового излучения, теплопроводности и конвекции. Метод расчета реального теплового процесса такого неоднородного тела, каким является двигатель, весьма затруднителен. Поэтому для упрощения тепловых расчетов электродвигателей принимается ряд допущений, не оказывающих существенного влияния на конечные результаты: 1. двигатель рассматривается как однородное тело, (обладающее бесконечно большой проводимостью, обуславливающей одинаковую температуру во всех точках внутри тела и на поверхности), теплоотдача в окружающую среду пропорциональна первой степени превышения температуры двигателя, 2. температура окружающей среды постоянна, 3. удельные теплоемкость и теплоотдача не зависят от температуры двигателя.

При работе двигателя с неизменной во времени нагрузкой  $P$  процесс нагрева описывается уравнением теплового баланса

$$\Delta P dt = C d\tau + A \tau dt, \quad (\text{T.1})$$

где  $\Delta P$ —потери мощности при данной нагрузке, Дж/с;

$\Delta P dt$ —потери тепла за бесконечно малый отрезок времени, Дж;

$C$ —теплоемкость двигателя, т.е. количество тепла, необходимое для повышения температуры двигателя на  $1^\circ\text{C}$ , Дж/ $^\circ\text{C}$ ;

$A$ —теплоотдача двигателя;

$\tau$ —превышение температуры двигателя над температурой окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ :

$$\tau = \theta_d - \theta_o \quad (\text{T.1})$$

Здесь  $\theta_d$ ,  $\theta_o$ —соответственно температура двигателя и окружающей среды.

Теплоемкость двигателя определяется как  $C = c_o \cdot m$ , (T.1)

где  $c_o$ —удельная теплоемкость, обычно принимаемая по стали, Дж/кг  $^\circ\text{C}$ ;

$m$ — масса двигателя, кг.

Теплоотдача двигателя—это количество тепла, отдаваемое с поверхности двигателя в единицу времени при разности температур в  $1^\circ\text{C}$ :

$$A = aF \quad (\text{T.1})$$

где  $a$ —удельная теплоотдача, Дж/ $\text{m}^2 \text{c}^\circ\text{C}$

$F$ —поверхность теплоотдачи,  $\text{m}^2$ .

Для решения уравнения ( $\Delta P dt = C d\tau + A \tau dt$ ) разделяем переменные

$$dt = \frac{C d\tau}{\Delta P - A \tau} \quad (\text{T.1})$$

Интегралом левой и правой части этого уравнения является:

$$t = -\frac{C}{A} \ln(\Delta P - A \tau) + k \quad (\text{T.1})$$

Отношение теплоемкости к теплоотдаче в этом выражении есть величина постоянная для данного электродвигателя, имеет размерность

$$\text{времени и называется постоянной времени нагрева, } C = T = \frac{C}{A} \quad (\text{T.2})$$

Произвольная постоянная интегрирования  $k$  определяется из начальных условий: при  $t=0$ ,  $\tau=\tau_{нач}$ . Тогда с учетом (4.4)

$$k = T \ln(\Delta P - A\tau_{нач}) \quad (\text{T.2})$$

Подставим выражение  $k$  в  $(t = -\frac{C}{A} \ln(\Delta P - A\tau) + k)$ :

$$t = -T[\ln(\Delta P - A\tau) - \ln(\Delta P - A\tau_{нач})] \quad (\text{T.2})$$

Разделим обе части выражения на  $T$  и, учитывая, что разность логарифмов есть логарифм дроби, получим:  $-\frac{t}{T} = \ln \frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_{нач}}$  (T.2)

и после потенцирования  $e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\Delta P - A\tau}{\Delta P - A\tau_{нач}}$  (T.2)

Отсюда находим зависимость изменения превышения температуры двигателя от времени при работе с постоянной нагрузкой

$$\tau = \frac{\Delta P}{A}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач}e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{T.3})$$

Из полученного выражения следует, что при работе двигателя с постоянной нагрузкой в течение большого промежутка времени ( $t \rightarrow \infty$ ) превышение стремится к некоторому пределу, которое называется установившимся превышением  $\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}$  (T.3)

Окончательно уравнение нагрева двигателя в переходном режиме при работе с постоянной нагрузкой запишется как

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач}e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{T.3})$$

**Зависимость превышения температуры двигателя от времени охлаждения называется уравнением охлаждения.** Из уравнения следует, что изменение превышения температуры двигателя происходит по закону экспоненты, т. е. по тому же закону, что и изменение  $M(t)$ ,  $I(t)$ ,  $\omega(t)$  и  $s(t)$  при механических переходных процессах.

При включении двигателя, температура которого равна температуре окружающей среды ( $\tau_{нач}=0$ ), уравнение принимает вид:

$$\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (\text{T.4})$$

Если отключить нагретый двигатель, то его температура начнет снижаться. Зависимость превышения температуры двигателя от времени охлаждения называется уравнением охлаждения. Это уравнение вытекает из  $(\Delta P dt = C d\tau + A\tau dt)$ , если принять в нем  $\Delta P=0$ :

$$\tau = \tau_{нач}e^{-\frac{t}{T_0}} \quad (\text{T.4})$$

Здесь  $T_o$ —постоянная времени охлаждения двигателя

Теоретически согласно уравнениям  $(\tau = \tau_{\text{оно}}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{\text{нач}}e^{-\frac{t}{T}})$  и  $(\tau = \tau_{\text{нач}}e^{-\frac{t}{T_o}})$  превышение температуры достигает установившегося значения при работе двигателя в течение времени  $t = \infty$ . Практически можно считать, что температура достигает установившегося значения при нагреве за время  $t = (4 \dots 5)T$ , а при охлаждении за время  $t = (4 \dots 5)T_o$ .

Постоянная времени нагрева и постоянная времени охлаждения равны между собою лишь в том случае, когда теплоотдача  $A$  при нагреве работающего двигателя с нагрузкой равна теплоотдаче  $A_o$  при охлаждении. Это возможно в том случае, когда двигатели имеют независимую вентиляцию или когда ротор или якорь вращаются с постоянной скоростью во время работы и охлаждения. При отключении и остановке самовентилируемого двигателя его теплоотдача уменьшается, постоянная времени охлаждения  $T_o$  оказывается значительно больше, чем постоянная времени нагрева  $T$ . Коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе (якоре)

$$\beta_o = \frac{A_o}{A} \quad (\text{Т.4})$$

где  $A_o$ — теплоотдача при неподвижном роторе;

$A$ — то же при номинальной угловой скорости.

Примерные значения коэффициента ухудшения охлаждения для двигателей: закрытых с независимой вентиляцией  $\beta_o = 1,0$ ; закрытых без принудительного охлаждения  $\beta_o = 0,95 \dots 0,98$ ; закрытых самовентилируемых  $\beta_o = 0,45 \dots 0,55$ ; самовентилируемых защищенных  $\beta_o = 0,25 \dots 0,35$ .

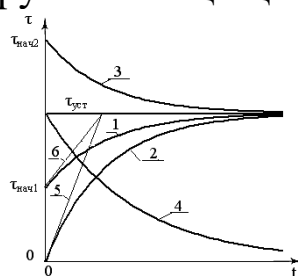


Рис Т.5

На рис Т.5 показаны графические зависимости превышения температуры от времени при нагреве и охлаждении двигателя. Кривая 1 соответ-

ствует уравнению  $(\tau = \tau_{уст}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{нач}e^{-\frac{t}{T}})$ , когда при включении двигателя в работу его температура была выше температуры окружающей среды на величину  $\tau_{нач1}$ . Кривая 2 построена для случая, когда  $\tau_{нач} = 0$ . Изменение превышения температуры происходит по кривой 3, при начальном превышении  $\tau_{нач2}$  выше установившегося и кривая 4 характеризует процесс охлаждения двигателя согласно  $(\tau = \tau_{нач}e^{-\frac{t}{T_o}})$  при начальном превышении, равном в данном случае  $\tau_{уст}$ .

### 3. Постоянная времени нагрева ее физический смысл и способы определения

Постоянная времени нагрева характеризует тепловую инерцию двигателя; она показывает с какой скоростью происходит изменение температуры при постоянной нагрузке. Ее физический смысл можно выявить, воспользовавшись уравнением ( $\Delta P dt = C d\tau + A \tau dt$ ), если принять в нем теплоотдачу, равной нулю. Тогда уравнение теплового баланса приобретает вид:

$$\Delta P dt = C d\tau \quad (\text{T.6})$$

После интегрирования при постоянных потерях получим:

$$t = \frac{C}{\Delta P} \tau. \quad (\text{T.6})$$

Отсюда следует, что при отсутствии обмена теплом с окружающей средой нагрев двигателя происходит не по экспоненте, а по закону прямой линии (прямые 5 и 6 на рис T.5).

Если в выражении ( $t = \frac{C}{\Delta P} \tau$ ) превышение температуры принять равным установившемуся ( $\tau_{уст} = \Delta P / A$ ), то:

$$t = \frac{C}{\Delta P} \cdot \frac{\Delta P}{A} = \frac{C}{A} = T. \quad (\text{T.6})$$

Следовательно, Постоянная времени нагрева есть время, за которое двигатель, работающий с постоянной нагрузкой, нагреется до установившегося превышения температуры при отсутствии отдачи тепла в окружающее пространство.

Из выражения ( $T = \frac{C}{A}$ ) следует, что постоянная времени нагрева не зависит от нагрузки, а зависит только от геометрических размеров и конструктивных особенностей двигателя. Теплоемкость двигателя  $C$  возрастает пропорционально его объему или кубу линейных размеров, а охлаждающая поверхность увеличивается пропорционально квадрату линейных размеров. Таким образом, в первом приближении можно считать, что постоянная времени нагрева растет пропорционально линейным размерам двигателя. Известно, что расчетная мощность двигателя может быть выражена через его геометрические размеры:

$$P = k D^2 l \omega \quad (\text{T.6})$$

где  $k$ —коэффициент пропорциональности;

$D$ —диаметр якоря или ротора, м ;

$l$ —длина активной части железа, м;

$\omega$ —угловая скорость ротора, 1/с.

Таким образом постоянная времени нагрева пропорциональна линейным размерам машины  $T = C/A \equiv l^3/l^2 = l$ . (T.6)

Двигатели одинаковой мощности открытого и защищенного типа имеют большую теплоотдачу чем двигатели закрытого исполнения, поэтому их постоянная времени нагрева меньше. Теплоотдача двигателя в большой степени зависит от системы охлаждения. У двигателей с самовентиляцией при регулировании скорости постоянная времени нагрева изменяется в широких пределах и при остановке двигателя постоянная времени может достигать 4...4,5 кратного значения постоянной при вращении. У электродвигателей независимого возбуждения постоянная времени нагрева и охлаждения одинаковы и не зависят от скорости.

Изменение температуры двигателя во времени по закону экспоненты справедливо при принятых ранее допущениях. В реальных условиях процесс проходит значительно сложнее. Медная обмотка с относительно малой массой и большой теплопроводностью нагревается скорее, чем железо сердечников, которое, имея меньшие потери и большую массу и поверхность теплоотдачи в начале нагревается медленнее. В дальнейшем по мере возрастания разности температур между железом и обмоткой количество передаваемого тепла от обмотки к стали увеличивается и при  $\tau \geq (0,5 \dots 0,6) \tau_{уст}$  процесс нагрева приобретает экспоненциальный характер.

В связи с тем, что постоянная времени нагрева зависит от линейных размеров двигателей, у закрытых двигателей, имеющих большую массу, она будет больше, чем у двигателей открытого или защищенного исполнения. Высокоскоростные двигатели при одной и той же мощности имеют меньшую массу и теплоемкость, и, следовательно, меньшую постоянную времени нагрева по сравнению с тихоходными.

Числовые значения постоянной времени нагрева не приводятся в паспорте или каталогах на электродвигатели, поэтому при необходимости их определяют расчетными или экспериментальными методами.

**Расчетный метод.** Для определения ориентировочного значения постоянной времени нагрева можно воспользоваться паспортными данными двигателя.

Как следует из ( $T = \frac{C}{A}$ ) постоянная времени нагрева

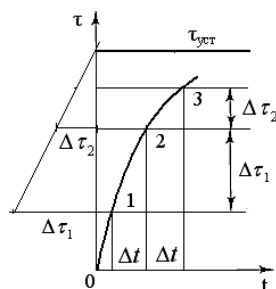
Из паспорта двигателя и каталогов известны:  $P_n$ ,  $\eta_n$ ,  $\tau_n$ , и  $m$ . (Т.7) По этим данным и выражению ( (Т.7)) определяется теплоемкость двигателя  $C$ .

Теплоотдача двигателя определяется из ( $\tau_{\text{обд}} = \frac{\Delta P}{A}$  (Т.7)) для номинальных потерь и номинальному превышению температуры как  $A = \frac{\Delta P_n}{\tau_n}$  (Т.7).

Здесь номинальные потери мощности  $\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$ . (Т.7)



Более точно постоянную времени нагрева определяют одним из экспериментальных методов. При их использовании проводится опыт нагрева двигателя при постоянной нагрузке и определяется установившееся превышение температуры. По данным опыта нагрева, строится график  $\tau(t)$ , на оси абсцисс откладываются два одинаковых отрезка времени  $\Delta t$  (**рис. Т.8**). На границах этих отрезков проводятся вертикали до пересечения с кривой нагрева. Через полученные точки 1, 2 и 3 проводятся горизонтальные линии, между которыми заключены приращения температуры  $\Delta\tau_1$  и  $\Delta\tau_2$ , соответствующие приращениям времени.

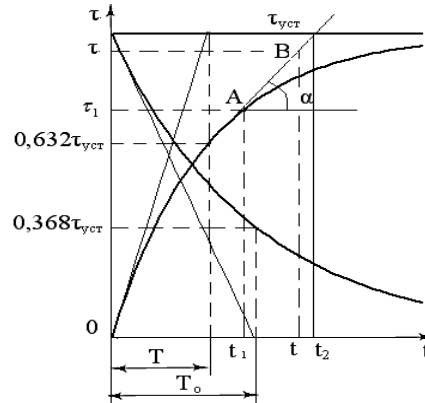


**Рис Т.8**

На нижней и средней горизонтальных линиях влево (или вправо) от оси ординат откладывается произвольное, но одинаковое число этих отрезков и через концы полученных горизонталей проводится наклонная прямая до пересечения с осью ординат. Точка пересечения этой прямой с осью ординат определяет величину установившегося превышения температуры  $\tau_{уст}$ . Достоверность определения  $\tau_{уст}$  будет тем выше, чем большими на опытной кривой  $\tau(t)$  будут приняты отрезки времени  $\Delta t$ .

**Метод начального нагрева.** Нагрев двигателя при  $\tau_{нач}=0$  происходит в

соответствии с уравнением ( $\tau = \tau_{i\dot{a}} e^{-\frac{t}{T_i}}$ ) и по истечении времени  $t=T$  превышение температуры достигает  $0,638\tau_{уст}$ . Следовательно, Если это значение превышения отложить на оси ординат опытного графика нагрева, провести горизонтальную линию до пересечения с кривой нагрева и точку пересечения спроецировать на ось абсцисс (**рис. Т.9**), то отрезок на этой оси определит постоянную времени  $T$ . Аналогично по графику кривой охлаждения можно определить постоянную времени охлаждения. Для этого на оси ординат следует отложить величину  $0,368\tau_{уст}$ , провести горизонтальную линию до пересечения с кривой охлаждения и точку пересечения спроецировать на ось абсцисс. Отрезок на оси времени от нуля до проекции точки пересечения дает искомую величину постоянной времени охлаждения  $T_o$ .



**Рис Т.9** Определение постоянной  $T$  методом начального генератора

**Метод касательных.** Метод касательных основан на том свойстве экспоненты, что в любой точке кривой величина отрезка на оси абсцисс, заключенная между проекцией точки касания и проекцией точки пересечения касательной с линией  $\tau_{уст}$  на эту ось есть постоянная времени нагрева.

Для доказательства проведем касательную к кривой нагрева в произвольной точке  $A$  с координатами  $t_1$  и  $\tau_1$  и на этой касательной примем точку  $B$  с текущими координатами  $t$  и  $\tau$ . Как следует из **рис Т.9**

$$tg \alpha = \frac{\tau - \tau_1}{t - t_1}. \quad (\text{T.10})$$

С другой стороны  $tg \alpha$  есть производная от уравнения нагрева (  $\tau = \tau_{\text{н}\delta} (1 - e^{-\frac{t}{T}})$  (**T.10**)) по времени, т.е.

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \tau_{\text{н}\delta} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \right] = \frac{\tau_{\text{н}\delta}}{T} e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{T.10})$$

Следовательно, 
$$\frac{\tau - \tau_1}{t - t_1} = \frac{\tau_{\text{н}\delta}}{T} e^{-\frac{t}{T}}. \quad (\text{T.10})$$

Если точка  $B$  будет иметь координатами  $\tau = \tau_{уст}$  и  $t = t_2$ , то, после подстановки этих значений в выражение ( $tg \alpha = \frac{\tau - \tau_1}{t - t_1}$ ), и решения его относительно разности  $t_2 - t_1$ , получим:

$$t_2 - t_1 = \frac{\tau_{\text{н}\delta} - \tau_1}{\frac{\tau_{\text{н}\delta}}{T} e^{-\frac{t_1}{T}}} = T \frac{\tau_{\text{н}\delta} - \tau_1}{\tau_{\text{н}\delta} e^{-\frac{t_1}{T}}} \quad (\text{T.11})$$

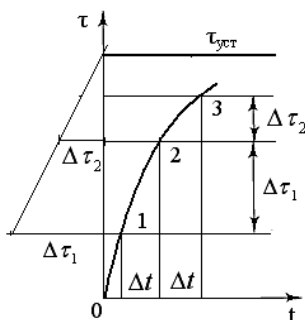
Но из уравнения нагрева следует, что

$$\tau_{\text{н}\delta} - \tau_1 = \tau_{\text{н}\delta} e^{-\frac{t_1}{T}} \quad (\text{T.11})$$

Подставляя это значение разности температур в числитель выражения (  $t_2 - t_1 = T \frac{\tau_{\text{н}\delta} - \tau_1}{\tau_{\text{н}\delta} e^{-\frac{t_1}{T}}}$  ), получим:

$$t_2 - t_1 = T \quad (\text{T.11})$$

**Метод трех точек.** Определение постоянной времени нагрева этим методом не требует проведения вспомогательных построений для нахождения установившегося превышения температуры.



Имея часть опытной кривой нагрева (рис. Т.8), запишем значения превышения температур в точках 2 и 3:

$$\tau_2 = \tau_{\text{онд}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right) + \tau_1 e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad \text{и} \quad \tau_3 = \tau_{\text{онд}} \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}\right) + \tau_2 e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad (\text{Т.12})$$

Из этих выражений находим  $\tau_{уст}$  и сравниваем между собою:

$$\tau_{\text{онд}} = \frac{\tau_2 - \tau_1 e^{-\frac{\Delta t}{T}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}} = \frac{\tau_3 - \tau_2 e^{-\frac{\Delta t}{T}}}{1 - e^{-\frac{\Delta t}{T}}} \quad (\text{Т.12}) \quad \text{отсюда}$$

$$\tau_2 - \tau_1 e^{-\frac{\Delta t}{T}} = \tau_3 - \tau_2 e^{-\frac{\Delta t}{T}} \quad \text{или} \quad (\tau_2 - \tau_1) e^{-\frac{\Delta t}{T}} = \tau_3 - \tau_2. \quad (\text{Т.12})$$

Решая полученное выражение относительно постоянной времени, получим

$$T = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_2}} = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\Delta \tau_1}{\Delta \tau_2}} \quad (\text{Т.13})$$

Для определения постоянной времени охлаждения достаточно по кривой охлаждения определить температуру в двух точках, тогда:

$$T_i = \frac{\Delta t}{\ln \frac{\tau_1}{\tau_2}} \quad (\text{Т.13})$$

где  $\Delta t$  – приращение времени между точками на опытной кривой охлаждения с температурами  $\tau_1$  и  $\tau_2$ .

#### 4. Зависимость потерь мощности и установившегося превышения температуры от нагрузки.

Как вы уже знаете, потери мощности в двигателях, определяющие его нагрев, складываются из потерь в обмотках, сердечниках, подшипниках и дополнительных. Потери в обмотках двигателей обуславливаются протеканием токов по их омическим сопротивлениям. При постоянном напряжении токи в обмотках изменяются пропорционально мощности, определяемой нагрузкой на его валу, следовательно, изменяются и потери в них. Эти потери принято называть переменными. Потери в сердечниках определяются магнитной индукцией, которая при постоянном напряжении остается практически неизменной, не зависящей от нагрузки. Независящими от нагрузки можно считать также потери на трение в подшипниках двигателей с жесткой механической характеристикой и добавочные потери. Эти потери называются постоянными. Таким образом, суммарные потери в двигателях складываются из переменных, зависящих от нагрузки, и постоянных, не зависящих от нагрузки потерь, то есть:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v . \quad (\text{T.14})$$

Здесь  $\Delta P_{\Sigma}$ ,  $\Delta P_c$  и  $\Delta P_v$  – суммарные, постоянные и переменные потери соответственно.

При номинальной нагрузке по обмоткам двигателя протекают номинальные токи и потери в двигателе, в том числе и переменные, будут номинальными

$$\Delta P_H = \Delta P_c + \Delta P_{vH} . \quad (\text{T.14})$$

Вынесем номинальные переменные потери в выражении за скобки:

$$\Delta P_H = \Delta P_{vH} \left( \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{vH}} + 1 \right) \quad (\text{T.14})$$

Отношение постоянных потерь к номинальным переменным потерям называется коэффициентом потерь

$$\alpha = \frac{\Delta P_c}{\Delta P_{vH}} \quad (\text{T.14})$$

С учетом потери в двигателе можно записать как:

$$\Delta P_H = \Delta P_{vH} (\alpha + 1) \quad (\text{T.15})$$

Переменные потери мощности в выражении ( $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_c + \Delta P_v$ ) выразим через токи и сопротивления

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_c + mI^2 r , \quad (\text{T.15})$$

где  $m$  – число обмоток в двигателе;

$I$  – ток, протекающий по обмоткам;

$r$  – активное сопротивление обмоток.

Умножим переменные потери выражения ( $\Delta P_i = \Delta P_{v_i}(\alpha + 1)$ ) на квадрат отношения номинальных тока и напряжения:

$$\Delta P_x = \Delta P_c + mI_x^2 r \left( \frac{I_H U_H}{I_H U_H} \right)^2, \quad (\text{T.15})$$

где  $\Delta P_x$  и  $I_x$  – суммарные потери и ток при данной нагрузке.

Поменяв местами токи в числителе, получим:

$$\Delta P_x = \Delta P_c + mI_H^2 r x^2, \quad (\text{T.15})$$

где  $mI_H^2 r$  – номинальные переменные потери,  $\Delta P_{vH}$ ;

$x$  – коэффициент загрузки:

$$x = \frac{I_x U_H}{I_H U_H} = \frac{P_x}{P_H} = \frac{I_x}{I_H}. \quad (\text{T.15})$$

Вынесем за скобки в выражении ( $\Delta P_\delta = \Delta P_c + mI_H^2 r x^2$ ) номинальные переменные потери

$$\Delta P_x = \Delta P_{vH}(\alpha + x^2). \quad (\text{T.16})$$

Разделим выражение ( $\Delta P_i = \Delta P_{v_i}(\alpha + 1)$ ) на ( $\Delta P_\delta = \Delta P_{v_i}(\alpha + x^2)$ ) и решим его

относительно суммарных потерь:  $\frac{\Delta P_x}{\Delta P_H} = \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}$

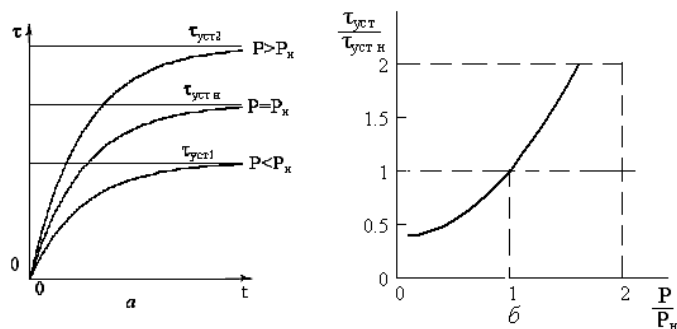
$$\Delta P_x = \Delta P_H \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1} \quad (\text{T.16})$$

Полученное выражение показывает, что потери мощности в большой степени определяются коэффициентом загрузки двигателя и даже небольшие перегрузки могут привести к значительному увеличению потерь.

Если пренебречь постоянными потерями, то из ( $\Delta P_x = \Delta P_H \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}$ ) следует, что потери в двигателе прямо пропорциональны квадрату мощности или квадрату тока

$$\Delta P \approx kP^2 = k_1 I^2 \quad (\text{T.16})$$

Как следует из ( $\tau_{уст} = \frac{\Delta P}{A}$ ) установившееся превышение температуры двигателя находится в прямой зависимости от потерь мощности. Если в это выражение подставить значение потерь из ( $\Delta P_x = \Delta P_H \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}$ ), получим:



**Рис Т.17** Кривые нагрева (а) и зависимость установившегося превышения температуры (б) от нагрузки

$$\tau_{уст.х} = \frac{\Delta P_n}{A} \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1} \quad (\text{Т.16})$$

При номинальных потерях имеет место номинальное установившееся превышение:

$$\tau_{уст.н} = \frac{\Delta P_n}{A}. \quad (\text{Т.16})$$

Подставляя это значение установившегося превышения в ( $\tau_{\text{обд.}\delta} = \frac{\Delta P_i}{A} \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}$ ), можно записать:

$$\tau_{уст.х} = \tau_{уст.н} \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}. \quad (\text{Т.16})$$

Из ( $\tau_{\text{обд.}\delta} = \tau_{\text{обд.}i} \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}$ ) видно, что установившееся превышение температуры находится в той же зависимости от нагрузки, что и потери мощности. Характер нагрева двигателя при различных нагрузках  $\alpha$  и графическая зависимость установившегося превышения от нагрузки  $\beta$  в относительных единицах показаны на рисунке Т.17.

Из приведенного анализа следует, что электродвигатели весьма чувствительны к перегрузкам и даже незначительное увеличение нагрузки сверх номинальной может привести к опасным перегревам.

### **Коэффициент полезного действия электродвигателей**

Номинальный к.п.д. электродвигателей достаточно высок, он приводится в паспорте двигателя. При нагрузках, отличных от номинальных, к.п.д. изменяется в довольно широких пределах от максимального значения при нагрузках, близких к номинальной до нуля при холостом ходе. Зависимость к.п.д. от нагрузки в виде графиков или таблиц в обобщенной форме приводится в некоторых справочниках, для конкретного двигателя она может быть вычислена по формулам.

Потери мощности при номинальной нагрузке двигателя определяются по данным паспорта как

$$\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H}, \quad (\text{T.18})$$

при нагрузках, отличных от номинальных  $\Delta P_x = P_x \frac{1 - \eta_x}{\eta_x}$  (T.18)

Разделив выражение  $(\Delta P_H = P_H \frac{1 - \eta_H}{\eta_H})$  на  $(\Delta P_x = P_x \frac{1 - \eta_x}{\eta_x})$ , получим:

$$\frac{\Delta P_x}{\Delta P_H} = \frac{P_x}{P_H} \cdot \frac{\frac{1}{\eta_x} - 1}{\frac{1}{\eta_H} - 1} \quad (\text{T.18})$$

или, с учетом  $(\Delta P_x = \Delta P_H \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1})$   $\frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1} \left( \frac{1}{\eta_H} - 1 \right) = x \left( \frac{1}{\eta_x} - 1 \right)$  (T.18)

где  $x$  – коэффициент загрузки.

Отсюда:

$$\eta_x = \frac{\eta_H (\alpha + 1)}{\eta_H (\alpha + 1) + (1 - \eta_H) \left( \frac{\alpha}{x} + x \right)} \quad (\text{T.19})$$

Полученное выражение показывает, что к.п.д. двигателя зависит от коэффициента загрузки и коэффициента потерь. Характер этой зависимости от степени загрузки двигателя можно выявить, приравняв нулю первую производную функции т. е.

$$\frac{d\eta_x}{dx} = 0 \quad (\text{T.19})$$

Отсюда находим, что к.п.д. достигает своего максимума при  $x = \sqrt{\alpha}$  (T.19). На рис T.20 показана зависимость к.п.д. от коэффициента загрузки. Из графика этой зависимости видно, что наибольшего значения

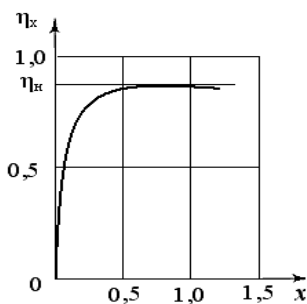


Рис T.20 Зависимость к.п.д. от коэффициента загрузки двигателя

коэффициент полезного действия достигает максимального значения при нагрузке несколько меньше номинальной мощности. Благодаря этому двигатели, выбираемые в реальных условиях с некоторым запасом, работают при максимальном к.п.д.

## 5. Влияние температуры окружающей среды на мощность электродвигателя

В процессе работы двигатель получает тепло от окружающей среды и внутренних потерь мощности. Суммарный нагрев ограничивается допустимой температурой изоляции. Расчетная температура окружающей среды принимается равной  $+40^{\circ}\text{C}$ . Номинальная мощность электродвигателя это мощность нагрузки, при работе с которой двигатель, работающий в установленном для него режиме при расчетной температуре окружающей среды и высоте над уровнем моря до 1000 м, нагревается до допустимой для данного класса изоляции температуры. Превышение температуры при работе с номинальной нагрузкой называется номинальным. Номинальное превышение не зависит от температуры окружающей среды. При отклонении температуры окружающей среды от расчетной допустимое установившееся превышение определяется как разность между допустимой температурой нагрева изоляции и температурой окружающей среды

$$\tau_{уст} = \theta_{доп} - \theta_0 \quad (\text{Т.21}).$$

При температуре окружающей среды меньше  $40^{\circ}\text{C}$  двигатель может быть нагружен несколько выше номинальной мощности. При температуре окружающей среды выше расчетной нагрузка должна быть снижена относительно номинальной.

Для достижения предельно допустимой температуры нагрева изоляции при отклонении температуры окружающей среды от расчетной на  $\Delta\tau$  допустимое превышение должно быть уменьшено на эту величину (при  $\theta_0 > +40^{\circ}\text{C}$ ) или может быть увеличено (при  $\theta_0 < +40^{\circ}\text{C}$ ).

Допустимое установившееся превышение при отклонении температуры окружающей среды от расчетной можно выразить как:

$$\tau_{уст} = \tau_n + \Delta\tau. \quad (\text{Т.21})$$

С другой стороны, учитывая зависимость установившегося превышения от потерь,

$$\tau_{уст} = \frac{\Delta P_x}{A}. \quad (\text{Т.21})$$

Следовательно,

$$\tau_n + \Delta\tau = \frac{\Delta P_x}{A}, \quad (\text{Т.21})$$

где  $\Delta\tau$ —отклонение температуры окружающей среды от расчетной,  $\Delta\tau = 40 - \theta_0$ ;

$\Delta P_x$ — допустимые потери мощности.

При расчетной температуре окружающей среды установившееся превышение равно номинальному:



$$\tau_H = \frac{\Delta P_H}{A}. \quad (\text{T.22})$$

Поделив выражение  $(\tau_H + \Delta\tau = \frac{\Delta P_x}{A})$  на  $(\tau_H = \frac{\Delta P_H}{A})$  получим:

$$\frac{\tau_H + \Delta\tau}{\tau_H} = \frac{\Delta P_x}{\Delta P_H}. \quad (\text{T.22})$$

В этом выражении значение  $\Delta P_x$  введем из  $(\Delta P_\sigma = \Delta P_i \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1})$ , тогда

$$\frac{\tau_H + \Delta\tau}{\tau_H} = \frac{\alpha + x^2}{\alpha + 1}. \quad (\text{T.22})$$

Отсюда

$$x = \sqrt{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_H}(\alpha + 1)} \quad (\text{T.22})$$

Здесь  $x$ –коэффициент загрузки двигателя,  $x = P_x/P_H$ .

Подставляя значение  $x$  в полученное выражение, находим значение допустимой мощности нагрузки при данном отклонении температуры окружающей среды от расчетной:

$$P_x = P_H \sqrt{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_H}(\alpha + 1)} \quad (\text{T.22})$$

Специально увеличивать нагрузку сверх номинальной при температуре среды ниже 40° С не рекомендуется, так как разность между температурой обмотки в наиболее нагретой части (в пазу статора) и средней температурой двигателя возрастает примерно пропорционально квадрату коэффициента загрузки, что может привести к появлению опасных пиковых температур.