

Тема 18. РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

1. Исходные данные для расчета мощности электропривода
2. Потери энергии в электроприводах
3. Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

9.1. Общие положения

Исходными данными для правильного расчета мощности и выбора типа электропривода являются технологические и конструктивные требования, которые возникают в связи с эффективным использованием производственных механизмов, а именно обеспечения высокой производительности, надежности и точности их работы. Так как одним из главных элементов электропривода, определяющим в значительной степени его технические и экономические показатели, является электродвигатель, то в данной главе прежде всего рассматриваются вопросы расчета мощ-

325

ности электродвигателей, работающих в различных режимах.

Применение двигателей недостаточной мощности может вызвать нарушение в нормальной работе механизма, понижение его производительности, аварию и выход из строя двигателя. Использование же двигателя завышенной мощности приводит к неоправданному увеличению капитальных затрат, снижению электрических показателей электропривода, уменьшению КПД двигателя, а в установках переменного тока, кроме того, ухудшению коэффициента мощности, что в свою очередь влияет на непроизводительную загрузку преобразовательного устройства и распределительной сети. Кроме как по мощности, нужно еще правильно выбрать двигатель по исполнению, т. е. по степени защиты (защищенный, закрытый, взрывозащищенный), по способу охлаждения (самовентилируемый, с естественным охлаждением, с независимой или принудительной вентиляцией) и по климатическому исполнению (для умеренного, тропического, холодного климата и т. п.). Это можно сделать, зная назначение электропривода и условия, в которых ему придется работать. От правильного выбора двигателя по исполнению существенным образом зависит надежность его работы. В то же время необоснованный выбор, например, закрытого двигателя вместо защищенного приводит к увеличению капитальных затрат и утяжелению конструкции. Выбор двигателя по способу охлаждения особенно важен для регулируемых электроприводов, так как неправильный выбор в этом случае может привести к значительному завышению установленной мощности двигателя, т. е. к увеличению капитальных затрат, утяжелению конструкции и к резкому снижению КПД и коэффициента мощности (для переменного тока).

Если учитывать огромное число механизмов в народном хозяйстве, значение правильного расчета мощности электродвигателей и выбора их по исполнению очень велико.

Выбор мощности электродвигателя обуславливается характером изменения статической нагрузки на его валу, а также условиями протекания переходных процессов в электроприводе.

В отношении характера изменения статического момента производственные механизмы могут быть разделены на следующие группы:

Первая группа. Механизмы, у которых статический момент остается постоянным, не зависящим от ско-

рости. К этим механизмам относятся шахтный подъемник с уравновешенным канатом, прокатный стан, механизмы подъема мостового крана, лифт, механизмы, основная работа которых связана с преодолением сил трения, например механизмы подачи металлорежущих станков и т. п.:

$$M_c = \text{const.} \quad (9.1)$$

Однако значение этого момента, оставаясь независимым от скорости, может меняться в широких пределах.

Вторая группа. Механизмы, статический момент которых зависит от угловой скорости, например центробежный вентилятор, центрифуга, дымосос, центробежный насос и т. п.:

$$M_c = M_0 + k\omega^2, \quad (9.2)$$

где M_0 — момент холостого хода механизма.

Характеристика таких механизмов представлена на рис. 9.1.

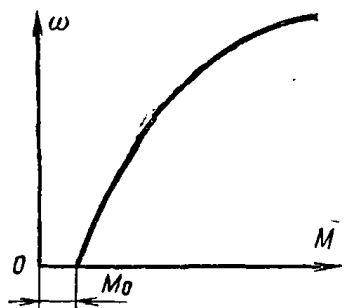


Рис. 9.1. Механическая характеристика центробежных механизмов (II группа механизмов).

К этой же группе могут быть отнесены тяговые транспортные механизмы, главные приводы металлорежущих станков и т. п., для которых характерным является постоянство мощности нагрузки, т. е. $M\omega = \text{const.}$

Третья группа. Механизмы, у которых статический момент зависит от пути. Сюда относятся устройства с кривошипными передачами, где нагрузки изменяются в зависимости от угла поворота кривошипа φ (рис. 9.2), — это ножницы для разрезания металла, поворотные столы с мальтийским крестом, прессы, поршневые компрессоры, шахтные подъемники с неуравновешенным канатом и т. п. Для этой группы механизмов справедливо при указании области (задания функции) уравнение

$$M_c = M_0 + M_A \sin \varphi, \quad (9.3)$$

здесь M_0 , M_A — соответственно момент холостого хода механизма и максимальный момент.

Другим примером механизмов этой группы может служить механизм копания роторного экскаватора.

Четвертая группа. В эту группу входят механизмы, у которых статический момент зависит от скорости и пути. Здесь примером может служить гребной винт судовой установки. Для установившейся скорости движения судна момент сопротивления на валу двигателя гребного винта пропорционален

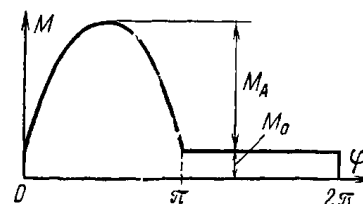


Рис. 9.2. Механическая характеристика кривошипных механизмов (III группа механизмов).

квадрату угловой скорости двигателя (кривая 1 на рис. 9.3). При задании команды на реверсирование винта судно продолжает вначале двигаться в том же направлении, и момент сопротивления, зависящий от скорости движения судна, оказывается не пропорциональным в этот период квадрату угловой скорости

винта. Результирующая статическая характеристика имеет сложную форму и показана для разных установившихся скоростей движения судна на рис. 9.3 (кривая 2 — для меньшей скорости движения судна, 3 — для большей). В этом случае момент на валу гребного винта зависит от скорости движения судна, а поскольку судно тормозится, т. е. скорость движения снижается, то, следовательно, момент зависит и от пути, пройденного судном и винтом (эти пути разные), и от угловой скорости самого винта. К этой группе относятся также рулевые устройства.

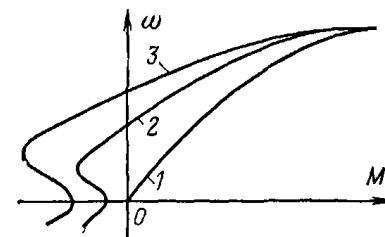


Рис. 9.3. Механические характеристики гребного винта (IV группа механизмов).

Пятая группа. Сюда можно отнести механизмы, у которых статический момент характеризуется случайным изменением во времени. Это, например, камнедробилки, шаровые мельницы в цементной промышленности и т. п.

Приведенные характеристики производственных механизмов позволяют оценить, какую нагрузку будет нести двигатель в установившемся режиме при различных угловых скоростях, которые необходимо задавать механизму с целью регулирования его производительности в соответствии с изменяющимися технологическими условиями.

Однако нагрузка на валу электропривода изменяется не только в связи с регулированием скорости механизма, но и вследствие изменения режима работы механизма или из-за зависимости момента нагрузки от пути, т. е. от времени. Например, в клети прокатного стана в течение одного пропуска металла через валки момент прокатки, обусловленный объемом деформируемого металла и давлением, практически остается постоянным. Однако момент прокатки от пропуска к пропуску изменяется, и переменной оказывается также длительность пропусков. Нагрузка в течение времени прокатки одного слитка меняется, а затем полностью повторяется при возобновлении прокатки следующего слитка.

Изменение момента нагрузки и угловой скорости во времени характерно для весьма большого числа механизмов, называемых механизмами циклического действия. Это изменение статического момента и угловой скорости от времени обычно представляют в виде графиков.

Графическое изображение зависимости статического момента механизма, приведенного к валу двигателя, от времени $M_c = f(t)$ называют нагрузочной диаграммой механизма.

Графическое изображение зависимости скорости исполнительного органа механизма (в виде угловой скорости, приведенной к валу двигателя) от времени $\omega = f(t)$ называют диаграммой скорости электропривода (или механизма).

Примерная нагрузочная диаграмма нереверсивной клети прокатного стана, построенная с целью упрощения для двух пропусков металла через валки, приведена на рис. 9.4. Число пропусков зависит от типа стана и может достигать 13—15 и более. Здесь характерным является чередование резкого возрастания нагрузки с холостым ходом.

Примером, когда изменение статического момента механизма во времени связано с зависимостью этого момента от пути, может служить нагрузочная диаграмма поршневого компрессора. Вид ее зависит от типа компрессора,

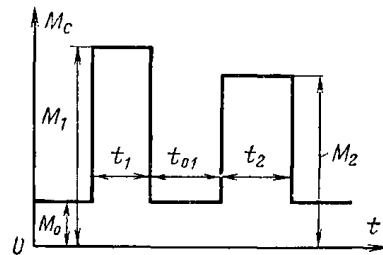


Рис. 9.4. Примерная нагрузочная диаграмма (для двух пропусков) нереверсивной клети прокатного стана.

числа его цилиндров и угла сдвига их кривошипов. С некоторым упрощением кривая статического момента $M_c(t)$ для компрессора двойного действия может быть выражена следующей формулой:

$$M_c = M_0 + M_A |\sin \Omega t|, \quad (9.4)$$

где $\Omega = 2\pi/t_{ц} = \omega/i$ — круговая частота вращения кривошипа; $t_{ц}$ — время цикла; i — передаточное число от вала двигателя к валу кривошипа.

Примерная нагрузочная диаграмма поршневого компрессора двойного действия, на которой M_0 — момент потерь (холостого хода) механизма, приведена на рис. 9.5. Используя разложение в тригонометрический ряд, можно кривую статического момента представить в виде

$$M_c = M_{c,ср} + 0,43M_A \sin \Omega' t, \quad (9.4a)$$

где $M_{c,ср} = M_0 + 0,64 M_A$ — постоянная составляющая нагрузки (средний момент нагрузки); $\Omega' = 2\Omega$.

Формулой, аналогичной (9.4a), представляется момент нагрузки (нагрузочная диаграмма) целого ряда механизмов,

в частности, уже упоминавшегося механизма копания роторного экскаватора.

Циклически изменяется также нагрузка главного привода продольно-строгального станка (механизм возвратно-поступательного движения стола с деталью).

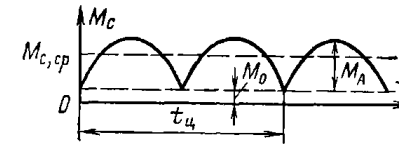


Рис. 9.5. Примерная нагрузочная диаграмма поршневого компрессора двойного действия.

При работе этого механизма статический момент на большей части прямого хода соответствует неизменному моменту резания и на меньшей его части — моменту холостого хода. Статический момент при обратном ходе также постояен, но равен моменту холостого хода. При этом скорости прямого и обратного ходов стола различны.

Можно привести еще много аналогичных примеров, иллюстрирующих нагрузочные диаграммы других механизмов, работающих в циклическом детерминированном режиме, т. е. обладающих свойством воспроизводимости при повторении условий их возникновения. В этом числе существуют, как уже указывалось, режимы, обусловленные случайной нагрузкой.

Под случайными понимаются такие режимы, при которых одна или несколько переменных, характеризующих их, меняются заранее непредсказуемым образом, т. е. являются случайными величинами. Например, для лифтовых установок не удается выделить участки нагрузочной диаграммы, где графики $M_c(t)$ были бы идентичны. Действительно, если лифтовая установка управляется командами, поступающими от пассажиров, то нагрузочные диаграммы работы лифта получаются в результате действия некоторой случайной последовательности команд, поданных случайным количеством пассажиров, случайно следующих в одном направлении одновременно или в разных направлениях разновременно. Для данного примера число включений в час двигателей лифта также является случайной величиной.

Другим примером служит характер изменения усилия в тяговых канатах экскаватора-драглайна в режиме наполнения ковша. Здесь случайный характер нагрузки вызван наличием неоднородного грунта в каждом цикле копания, различной реакцией машиниста при встрече ковша с препятствием. В данном случае время цикла практически постоянно, а изменение нагрузки случайное.

Среди механизмов, для которых режим работы электропривода является случайным, могут быть названы еще многие другие: электроприводы следящих, экстремальных и адаптивных систем, приводы врубовых машин, шаровые мельницы, буровые машины и т. д.

В процессе проектирования систем электропривода различных механизмов возникает необходимость в учете факторов, определяющих случайный режим работы двигателя. Это связано с тем, что постоянно расширяются функции электропривода, в системе которого возникают случайные режимы, а также с необходимостью учитывать при проектировании электропривода недетерминированные составляющие режимов, так как расчет на наибольшую нагрузку или на наихудший режим, как правило, приводит к неоправданному завышению мощности элементов системы, ухудшению их энергетических показателей и возрастанию капитальных затрат.

При работе двигателя в любом режиме, с той или иной нагрузкой в нем возникают потери энергии, определяющие нагревание двигателя, а следовательно, его мощность и габариты. Поэтому прежде всего необходимо уделить внимание нахождению потерь энергии в электроприводах с двигате-

лями постоянного и переменного тока как в установившемся, так и в переходном режимах.

9.2. Потери энергии в электроприводах постоянного и переменного тока

Потери в двигателе складываются из переменных, зависящих от нагрузки, и постоянных потерь, не зависящих от нагрузки.

Для электропривода постоянного тока суммарные потери мощности равны:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\kappa} + \Delta P_{\nu} = \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + I^2 R, \quad (9.5)$$

где ΔP_{κ} — постоянные потери, $\Delta P_{\kappa} = \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}}$; $\Delta P_{\text{в}}$, $\Delta P_{\text{ст}}$, $\Delta P_{\text{мех}}$ — соответственно потери на возбуждение, потери в стали и механические; $I^2 R = \Delta P_{\nu}$ — потери в силовой (якорной) цепи двигателя.

Аналогично для асинхронного двигателя

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{мех}} + 3(I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2'). \quad (9.6)$$

Переменные потери ΔP_{ν} могут быть выражены также через электромагнитный момент и относительную скорость (или скольжение), а именно:

1) для двигателя постоянного тока независимого возбуждения

$$\Delta P_{\nu} = M(\omega_0 - \omega) = M\omega_0 \frac{\Delta\omega}{\omega_0} = P_{12} \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \quad (9.7)$$

где P_{12} — электромагнитная мощность; $\Delta\omega$, ω_0 — соответственно перепад угловой скорости, обусловленный моментом M , и угловая скорость идеального холостого хода;

2) для асинхронного двигателя

$$\Delta P_{\nu} = M\omega_0 s(1 + R_1/R_2') = P_{12} s(1 + R_1/R_2'). \quad (9.8)$$

Выше при рассмотрении различных способов регулирования угловой скорости электроприводов постоянного и переменного тока приводились необходимые соотношения для определения потерь в двигателях при установившемся режиме.

Более подробно остановимся на определении потерь и расходе энергии в переходных процессах. Здесь целесообразно находить не среднее значение потерь мощности, а расход и потери энергии за время переходного процесса.

9.5. Расчет мощности двигателя при продолжительном режиме работы (S1)

а) Неизменная нагрузка

Существует значительное число механизмов, работающих продолжительно с неизменной или мало меняющейся нагрузкой без регулирования скорости. Примером таких механизмов могут служить насос, вентилятор и т. п. Расчет мощности двигателя для подобных случаев весьма прост, если известна мощность, потребляемая механизмом.

Выбрав двигатель на указанную мощность, можно быть уверенным, что он окажется полностью использованным по допустимому превышению температуры. Если в каталоге нет двигателя по мощности, полученной по расчету, выбирается ближайший больший по мощности.

Так как в продолжительном режиме двигатель пускается редко, то пусковые потери не могут заметно сказаться на нагреве двигателя. Иногда, однако, приходится проверять достаточность пускового момента, развиваемого двигателем, учитывая, что некоторые механизмы имеют повышенное сопротивление трения в начале трогания с места.

Мощность, кВт, двигателя для насоса определяем по формуле

$$P = \frac{V\gamma Hg}{\eta_{нас}\eta_{пер}} \cdot 10^{-3}, \quad (9.91)$$

где V — подача насоса, м³/с; γ — плотность перекачиваемой жидкости, кг/м³; 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 — ускорение силы тяжести, $g = 9,8$ м/с².

370

Мощность, кВт, двигателя для вентилятора

$$P = \frac{Vp}{\eta_{вент}\eta_{пер}} \cdot 10^{-3}; \quad (9.92)$$

здесь 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).

б) Переменная нагрузка (режим перемежающийся S6 и подобные ему)

При продолжительной переменной нагрузке, ступенчатый график которой в общем виде показан на рис. 9.28, проверку предварительно выбранного двигателя продолжительного режима работы следует производить по нагреву путем определения наибольшего превышения температуры τ_{max} за цикл и сравнить его с допустимым превышением $\tau_{доп}$. При этом должно быть соблюдено условие

$$\tau_{max} \leq \tau_{доп}.$$

Проверка мощности двигателя, таким образом, связана с построением кривой нагрева, что требует большой за-

траты времени. На практике пользуются хотя и менее точными, но более простыми методами проверки мощности двигателя. Часто она производится по методу средних потерь. Сущность метода заключается в том, что превышение температуры двигателя при неизменной теплоотдаче определяется средними потерями за цикл:

$$\Delta P_{cp} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i / t_{ц}, \quad (9.93)$$

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

Найденные средние потери за цикл сопоставляются с номинальными, и если $\Delta P_{cp} \leq \Delta P_{ном}$, то среднее превы-

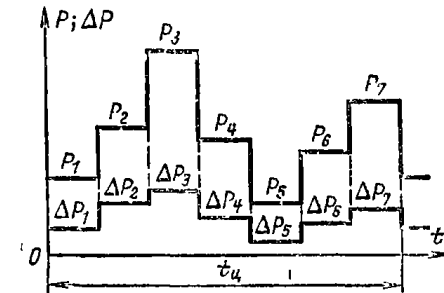


Рис. 9.28. Ступенчатый график мощности на валу двигателя и потерь в нем при продолжительной переменной нагрузке.

шение температуры не больше допустимого значения, т. е.

$$\tau_{\text{ср}} \leq \tau_{\text{ном}} = \tau_{\text{доп}}$$

Если средние потери за цикл $\Delta P_{\text{ср}} > \Delta P_{\text{ном}}$, то двигатель будет перегреваться; наоборот, при условии, что $\Delta P_{\text{ср}} < \Delta P_{\text{ном}}$, двигатель недоиспользуется по нагреву. В обоих случаях необходимо выбрать другой двигатель, построить новую зависимость $\Delta P = f(t)$ и вновь проверить двигатель методом средних потерь.

Действительное максимальное превышение температуры отличается от среднего, но при $t_{\text{ц}} \ll T_{\text{н}}$ и $qt_{\text{ц}} > 4T_{\text{н}}$, где q — число циклов, это расхождение незначительно, и только при соблюдении этих условий можно пользоваться методом средних потерь.

В том случае, когда на протяжении цикла теплоотдача двигателя на отдельных интервалах различна, например в случае изменения угловой скорости самовентилируемого двигателя, средние эквивалентные потери подсчитывают по формуле

$$\Delta P_{\text{ср.э}} = \sum_{i=1}^m \Delta P_i t_i / \sum_{i=1}^m \beta_i t_i, \quad (9.93a)$$

где β_i — коэффициент ухудшения теплоотдачи на i -м интервале, соответствующий значению угловой скорости на этом интервале.

Приближенно зависимость коэффициента ухудшения теплоотдачи от угловой скорости можно считать линейной:

$$\beta = \beta_0 + (1 - \beta_0) \omega / \omega_{\text{ном}},$$

где β_0 — коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном якоре (роторе).

Порядок расчета мощности по методу средних потерь

1) По нагрузочной диаграмме механизма определяем среднюю мощность на валу двигателя в случае постоянства теплоотдачи и угловой скорости двигателя

$$P_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^m P_i t_i / t_{\text{ц}}, \quad (9.94)$$

в случае самовентилируемого двигателя при разных угловых скоростях на интервалах

$$P_{\text{ср.э}} = \frac{\sum_{i=1}^m P_i \frac{\omega_{\text{ном}}}{\omega_i} t_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i t_i}. \quad (9.94a)$$

Если двигатель с независимой вентиляцией, то в (9.94a) принимаем $\beta_i = 1$. Затем $P_{\text{ср.э}}$ умножаем на коэффициент запаса $k_3 = 1,1 \div 1,3$, учитывающий отличие нагрузочной диаграммы двигателя от диаграммы механизма; при наличии заметных динамических нагрузок, связанных с изменением угловой скорости, следует принимать большие значения k_3 .

2. На основании полученной расчетной мощности по каталогу выбираем соответствующий двигатель.

3. Располагая кривыми КПД двигателя в функции нагрузки при разных угловых скоростях, находим потери мощности для каждого интервала нагрузочной диаграммы и строим график $\Delta P = f(t)$ (рис. 9.28).

4. По (9.93) или (9.93a) определяем средние потери за цикл, которые и сопоставляем с номинальными:

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

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

В случае возникновения затруднений с определением КПД в зависимости от нагрузки, но при наличии графика тока, потребляемого двигателем, можно воспользоваться для проверки выбранного двигателя методом эквивалентного тока. Эквивалентный ток — это ток постоянного значения, который вызывает в двигателе те же потери, что и фактически протекающий в нем ток. На рис. 9.29 показан пример графика $i = f(t)$ при продолжительной переменной нагрузке.

Если используется двигатель постоянного тока, то выделяющаяся в нем средняя мощность потерь при загрузке его эквивалентным током I_3 равна:

$$\Delta P_{\text{ср}} = \Delta P_{\text{с}} + I_3^2 R, \quad (9.95)$$

где $\Delta P_{\text{с}} = K$ — мощность постоянных потерь; $I_3^2 R$ — переменные потери, зависящие от нагрузки.

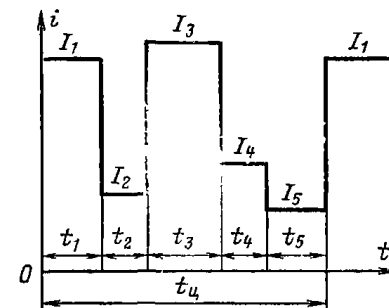


Рис. 9.29. График тока двигателя $i = f(t)$ при продолжительной переменной нагрузке.

Средняя мощность потерь за цикл в соответствии с (9.93) может быть рассчитана следующим образом:

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

Заменяя потери мощности на каждом участке через соответствующие постоянную и переменную составляющие, получаем:

$$K + I_3^2 R = \frac{(K + I_1^2 R) t_1 + (K + I_2^2 R) t_2 + \dots + (K + I_n^2 R) t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n},$$

или

$$K + I_3^2 R = \frac{K(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{R(I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

Отсюда эквивалентный ток

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}. \quad (9.96)$$

В общем случае при произвольной форме графика тока

$$I_3 = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}} \int_0^{t_{\text{ц}}} i^2(t) dt}. \quad (9.97)$$

При использовании самовентилируемого двигателя и изменяющейся угловой скорости на участках цикла в (9.96)

и (9.97) вместо $t_{\text{ц}}$ следует подставлять $\sum_{i=1}^n \beta_i t_i$.

После нахождения эквивалентного тока сопоставляем его с номинальным током двигателя: при $I_3 \leq I_{\text{ном}}$ двигатель отвечает условиям полного использования по нагреву.

Следует отметить, что метод эквивалентного тока предполагает независимость (постоянство) потерь на возбуждение, потерь в стали и механических потерь от нагрузки и постоянство сопротивления главной цепи двигателя на всех участках графика нагрузки.

Часто для проверки двигателя по нагреву и особенно при предварительном его выборе приходится пользоваться графиками момента или мощности, развиваемых двигателем.

При неизменном магнитном потоке, когда момент двигателя $M = cI$, можно для проверки двигателя воспользоваться методом эквивалентного момента. Для ступенчатого

графика эквивалентный момент определяем по формуле

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}. \quad (9.98)$$

При изменяющейся теплоотдаче вместо $t_{\text{ц}}$ в (9.98) подставляем $\sum_{i=1}^n \beta_i t_i$. Эквивалентный момент сопоставляем с номинальным моментом двигателя, и если $M_3 \leq M_{\text{ном}}$, то двигатель полностью используется по нагреву.

Этот метод применим для двигателей постоянного тока с независимым возбуждением, а также асинхронных и синхронных двигателей, работающих с номинальным магнитным потоком. Кроме того, для применения и этого метода должно выполняться условие неизменности постоянных потерь и активных сопротивлений двигателя.

Когда нагрузочная диаграмма электропривода и механизма задана графиком мощности, развиваемой двигателем, выбор и проверка его по нагреву могут быть произведены методом эквивалентной мощности, но лишь в том случае, если между мощностью и током существует прямая пропорциональность, т. е. при $\Delta P_c = \text{const}$, $R = \text{const}$, $\Phi = \text{const}$, $\omega = \text{const} = \omega_{\text{ном}}$.

Эквивалентную мощность для ступенчатого графика определяем по формуле

$$P_3 = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_{\text{ц}}}}. \quad (9.99)$$

и сравниваем с номинальной мощностью двигателя, при этом должно быть $P_3 \leq P_{\text{ном}}$.

Метод эквивалентной мощности может быть применен для проверки по нагреву асинхронных и синхронных двигателей, а также двигателей постоянного тока независимого возбуждения, работающих с номинальным потоком и постоянной или мало меняющейся угловой скоростью.

Методом эквивалентной мощности можно воспользоваться и в случае переменной угловой скорости, если привести мощность при угловой скорости ω_i к эквивалентной мощности при $\omega = \omega_{\text{ном}}$, используя соотношение $P_{3i} = P_i \omega_{\text{ном}} / \omega_i$. Тогда формула эквивалентной мощности для

случая переменных угловой скорости и теплоотдачи примет вид:

$$P_3 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i \omega_{\text{ном}} / \omega_i)^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i t_i}}. \quad (9.99a)$$

Следует отметить, что все рассмотренные методы проверки двигателя по нагреву при переменной нагрузке представляют собой методы эквивалентного преобразования нагрузочной диаграммы к стандартной диаграмме для режима S1, на который рассчитан двигатель продолжительного режима. Этими методами (при выполнении соответствующих ограничений) могут быть проверены двигатели продолжительного режима, работающие в режимах S7, S8 и подобных им и в режимах S3, S4, S5. Наиболее универсальным и точным из всех рассмотренных методов является метод средних или эквивалентных потерь.

Если методы средних потерь и эквивалентного тока пригодны только для проверки по нагреву предварительно выбранного двигателя, то методами эквивалентного момента и мощности можно воспользоваться для предварительного выбора двигателя по нагрузочной диаграмме механизма (или по упрощенной нагрузочной диаграмме двигателя, построенной без учета момента инерции двигателя), считая, что момент (мощность) двигателя равен соответствующим статическим значениям. Такой выбор является более точным, чем выбор по средней мощности. Предварительный выбор производят по формулам

$$M_{\text{ном}} \geq k_3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_{ci}^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i t_i}};$$

$$P_{\text{ном}} \geq k_3 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{ci} \omega_{\text{ном}} / \omega_i)^2 t_i}{\sum_{i=1}^n \beta_i t_i}}.$$