

Тема 7

Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей

1. Классификация режимов работы электродвигателей.
2. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с постоянной нагрузкой.
3. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с переменной нагрузки методом максимального нагрева.
4. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при кратковременном режиме работы.
5. Выбор мощности двигателей и расчет оптимальных размеров инерционных масс при ударных нагрузках.

От правильного выбора мощности электродвигателя зависят его надежность, экономичность и энергетические показатели в процессе эксплуатации. В тех случаях, когда нагрузка двигателя существенно меньше номинальной, он недоиспользуется по мощности, что ведет к росту капитальных вложений, а к.п.д. и коэффициент мощности двигателя заметно снижаются.

При нагрузках, превышающих номинальную мощность двигателя, увеличиваются токи и потери мощности сверх соответствующих номинальных значений. Вследствие этого температура двигателя в процессе работы может превысить допустимое значение. В свою очередь, рост температуры выше допустимой приводит к быстрому старению изоляции, уменьшению срока службы и снижению надежности привода в целом. Поэтому нагрев является одним из основных параметров, с учетом которого следует выбирать двигатели. Задача выбора мощности электродвигателя осложняется тем обстоятельством, что нагрузка на его валу в процессе работы, как правило, изменяется по величине, в результате чего изменяются токи в обмотках, потери мощности и соответственно температура нагрева. Для обоснованного выбора мощности электродвигателя необходимо знать величину нагрузки на его валу, характер ее изменения во времени, продолжительность работы, то есть график нагрузки. График нагрузки позволяет определять потери мощности в электродвигателе, что в свою очередь дает возможность рассчитывать его температуру нагрева. Нагрев зависит от нагрузки, режима работы двигателя, т.е. от соотношения длительности периодов работы и пауз между ними, от периодов работы с полной или частичной нагрузкой, от частоты включения машины, характера протекания переходных процессов и т. д.

Таким образом, в основе расчета и выбора номинальной мощности электродвигателя лежит его нагрев: правильно выбранный по мощности двигатель в процессе работы в заданном режиме должен нагреваться до температуры, близкой к допустимой, не превышая ее.

Различные условия работы производственных механизмов обуславливают собою режимы работы электродвигателей.

Номинальным режимом работы электрической машины согласно ГОСТ 17154-71 называют режим работы, для которого машина предназначена заводом-изготовителем и который указан на ее щитке. Для этого режима в каталогах и паспорте двигателя указываются: номинальная полезная механическая мощность на валу, номинальное напряжение, номинальный ток, номинальная частота вращения, номинальный к.п.д., номинальный коэффициент мощности. В соответствии с ГОСТ 183-74 установлено восемь номинальных режимов с условными обозначениями от S1 до S8.

1. Классификация режимов работы электродвигателей

1. *Продолжительный номинальный режим (S1)*. Это режим, при котором время работы двигателя при практически неизменной нагрузке и температуре окружающей среды. Время работы достаточно для нагрева всех его частей до практически установившейся температуры.

Графики нагрузки, потерь мощности и превышения температуры приведены на **рис. М.1**.

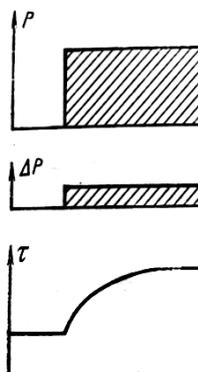


Рис. М.1. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при продолжительном режиме

2. *Кратковременный номинальный режим работы (S2)*. Это режим, при котором периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, причем за время работы температура его частей не успевает достигнуть установившегося значения, а за время пауз (отключения) успевает снизиться до температуры окружающей среды. (**рис.М.2**). Установленная ГОСТ длительность периодов работы в данном режиме 10, 30, 60 и 90 мин. Она указывается в условном обозначении режима работы на щитке двигателя, например $S2-30$ мин, $S2-60$ мин.

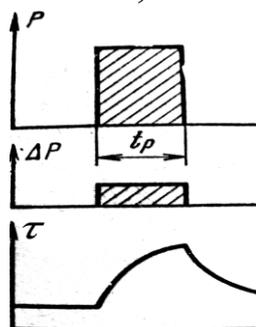


Рис. М.2. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при кратковременном режиме

3. *Повторно-кратковременным номинальным режимом работы (S3)* называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами отключения двигателя (паузами), причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений (**рис. М.3**).

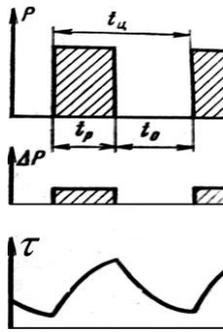


Рис. М.3. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при повторно-кратковременном режиме

В этом режиме продолжительность цикла установлена не менее 10 мин. Режим характеризуется продолжительностью включения, $ПВ$ –отношением времени работы к времени цикла, в %:

$$\hat{I\dot{A}} = \frac{t_{\delta}}{t_{\delta} + t_i} 100\% = \frac{t_{\delta}}{t_{\delta}} 100\% , \quad (M1)$$

или относительной продолжительностью: $\varepsilon = \frac{t_{\delta}}{t_{\delta} + t_i} \quad (M1),$

где t_p –время работы;
 t_o –время паузы;
 $t_{ц}$ – время цикла.

Продолжительность включения для повторно-кратковременных режимов принята 15, 25, 40 и 60 %. В этом режиме потери при пуске практически не оказывают влияния на нагрев машины, так как продолжительность пускового периода много меньше периода работы.

4. *Повторно - кратковременным режимом работы с частыми пусками (S4)* называется режим, при котором периоды пуска и кратковременной неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения двигателя, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры его частей могли достигнуть установившихся значений (**рис. М.4.**).

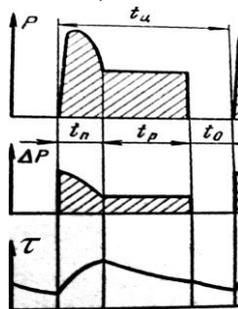


Рис. М.4. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при повторно-кратковременном режиме с частыми пусками

В этом режиме пусковые потери оказывают существенное влияние на превышение температуры частей машины. Здесь остановка двигателя

после его отключения осуществляется путем выбега либо посредством механического торможения, поэтому после отключения дополнительного нагрева не происходит. Данный режим характеризуется продолжительностью включения, числом пуска и коэффициентом инерции привода. Продолжительность включения определяется как:

$$\hat{i}A = \frac{t_i + t_\delta}{t_i + t_\delta + t_i} 100, \% . \quad (M1)$$

Нормируемое значение ПВ=15, 25, 40 и 60 %. Нормируемое число пусков в час– 30, 60, 120 и 240.

Коэффициент инерции –это отношение суммы приведенного к валу двигателя момента инерции привода и момента инерции ротора (якоря) к моменту инерции ротора (якоря):

$$FI = \frac{J_\Sigma}{J_\delta} \quad (M1),$$

Нормированные значения коэффициента инерции: 1,2; 1,6; 2,5; 4; 6,3; 10.

В условном обозначении режима указывается продолжительность включения, число включений в час и коэффициент инерции, например S4–25%,120 включений в час, FI–2. Это означает, что двигатель при коэффициенте инерции FI=2 рассчитан на работу при 120 включений в час, длительность каждого цикла составляет 60/120=0,5 мин, из которых время пуска и время работы составляют 25 % т.е. 7,5 мин, а время паузы 22,5 мин.

5. *Повторно-кратковременным номинальным режимом с частыми пусками и электрическим торможением (S5)* называется режим, при котором периоды пуска, кратковременной неизменной номинальной нагрузки и электрического торможения чередуются с периодами отключения двигателя, причем как рабочие периоды, так и паузы не настолько длительны, чтобы превышения температуры могли достигнуть установившихся значений (рис. М.5.).

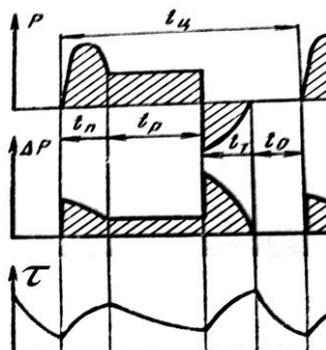


Рис. М.5. Зависимость P(t), ΔP(t) и τ(t) при повторно-кратковременным номинальным режимом с частыми пусками и электрическим торможением (S5)

В этом режиме потери в переходных режимах пуска и электрического торможения оказывают существенное влияние на нагрев двигателя. Продолжительность включения определяется как:

$$\hat{I}\hat{A} = \frac{t_i + t_\delta + t_\delta}{t_i + t_\delta + t_\delta + t_i} 100\% \quad (\text{M.2})$$

Режим характеризуется теми же значениями продолжительности включения, числа пусков в час и коэффициента инерции, включая $FI=1,2$, но исключая $FI=6,3$ и 10 .

б. *Перебегающим номинальным режимом работы (S6)* называется режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода, причем как рабочие периоды, так и периоды холостого хода не настолько длительны, чтобы превышения температуры частей машины могли достигнуть установившихся значений (**рис. М.6**). Продолжительность цикла в этом режиме не должна превышать 10 мин. Потери при пуске и торможении не учитываются. Продолжительность нагрузки определяется как

$$\hat{I}\hat{I} = \frac{t_\delta}{t_\delta + t_{\delta,0}} 100\% \quad (\text{M.2})$$

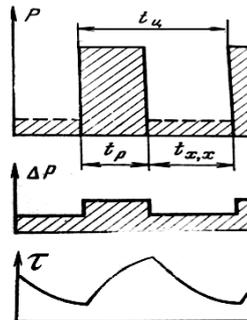


Рис. М.6. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при перебегающим номинальным режимом работы (S6)

Нормируемые значения продолжительности нагрузки 15, 25, 40 и 60 %
 7. *Перебегающим номинальным режимом работы с частыми реверсами (S7)* называется режим, при котором периоды реверса с электрическим торможением чередуются с периодами неизменной номинальной нагрузки, причем периоды нагрузки не настолько велики, чтобы превышения температуры частей машины могли достигать установившихся (**рис. М.7**).

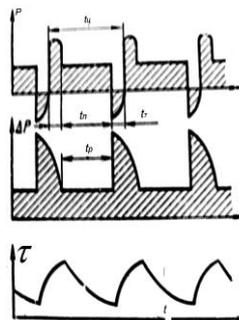
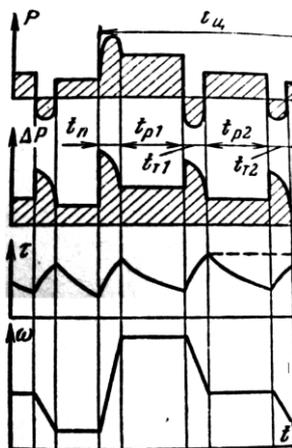


Рис. М.7. Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при перебегающим номинальным режимом работы с частыми реверсами (S7)

Длительность цикла работы определяется числом включений в час—30, 60, 120 или 240 при определенном коэффициенте инерции $FI=1,2; 1,6; 2,0; 2,5;$ или 4,0. Из-за малой длительности неизменной нагрузки потери в периоды пусков и реверсов оказывают существенное влияние на нагрев частей двигателя.

8. *Переменяющийся номинальный режим работы с двумя или более угловыми скоростями (S8).* Это режим, при котором периоды работы с неизменной нагрузкой на одной угловой скорости чередуются с периодами работы на другой угловой скорости соответствующей этой скорости нагрузкой (рис. М.8)



(М.8) Зависимость $P(t)$, $\Delta P(t)$ и $\tau(t)$ при переменяющемся номинальным режим работы с двумя или более угловыми скоростями

Режим определяется числом циклов в час 30, 60, 120 или 240, коэффициентом инерции $FI=1,2; 1,6; 2,0; 2,5;$ и 4,0 и относительной продолжительностью нагрузки на каждой из угловых скоростей. В этом режиме потери при переходе с одной угловой скорости на другую оказывают существенное влияние на превышения температуры частей машины. Продолжительность нагрузки определяется по формулам:

$$\ddot{I} = \frac{t_i + t_{\delta 1}}{t_i + t_{\delta 1} + t_{\delta 1} + t_{\delta 2} + t_{\delta 2} + t_{\delta 3}} 100\% \quad (\text{М.2})$$

$$\ddot{I}_2 = \frac{t_{\delta 1} + t_{\delta 2}}{t_i + t_{\delta 1} + t_{\delta 1} + t_{\delta 2} + t_{\delta 2} + t_{\delta 3}} 100\% \quad (\text{М.2})$$

$$\ddot{I}_3 = \frac{t_{\delta 2} + t_{\delta 3}}{t_i + t_{\delta 1} + t_{\delta 1} + t_{\delta 2} + t_{\delta 2} + t_{\delta 3}} 100\% \quad (\text{М.2})$$

где t_{p1}, t_{p2}, t_{p3} —время работы на каждой угловой скорости;

t_{m1}, t_{m2} — время электрического торможения;

t_n — время пуска.

Ведение Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при продолжительном режиме работы

При работе двигателей в продолжительном режиме нагрузка на валу двигателя может оставаться неизменной или изменяться иногда в довольно широких пределах. При постоянной нагрузке потери в двигателе так же постоянные и выбор номинальной мощности не представляет больших трудностей: номинальная мощность двигателя должна быть равна мощности нагрузки с учетом потерь в передаточном механизме.

При переменной нагрузке изменяется ток двигателя и потери мощности в его обмотках. Потери в сердечниках при этом остаются практически неизменными. При регулировании угловой скорости, изменении ее в процессе разбега и торможения, при остановках двигателя в период пауз изменяется его теплоотдача, что оказывает существенное влияние на нагрев электродвигателя. Учет всех этих факторов при переменной нагрузке приводит к несколько более сложным методам расчета и выбора номинальной мощности двигателя.

2. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с постоянной нагрузкой

*В различных отраслях производства довольно много машин и механизмов, которые создают на валу двигателя продолжительную во времени постоянную или мало меняющуюся по величине нагрузку. К ним относятся вентиляторы, центробежные и вихревые насосы, сепараторы, гребные винты, центрифуги и т. п. Основанием к выбору номинальной мощности двигателя для привода машин, при продолжительном режиме работы с постоянной нагрузкой, могут служить: **мощность, указанная в паспорте машины; нагрузочные диаграммы, снятые каким-либо регистрирующим прибором (ваттметром, амперметром, динамометром и т.п.), нормы потребления энергии на единицу перерабатываемой продукции, результаты расчетов по теоретическим или эмпирическим формулам.** Разделив найденную мощность нагрузки на коэффициент полезного действия передачи, определяют потребную мощность двигателя, по которой следует выбирать его номинальную мощность. При продолжительной работе двигатель запускается редко, поэтому потери в переходном режиме пуска не оказывают заметного влияния на его нагрев и могут не учитываться.*

Если температура окружающей среды не равна расчетной, мощность двигателя следует пересчитать по формуле $(P_o = P_i \sqrt{1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_i}(\alpha + 1)})$ (М.3).

В соответствии с полученными результатами по каталогу выбирается номинальная мощность двигателя из условия:

$$P_i \geq P_n$$

где P_n – номинальная мощность двигателя;

P_c – мощность нагрузки (мощность сопротивления рабочей машины на валу двигателя).

Это условие означает, что номинальную мощность двигателя следует выбирать равной мощности нагрузки; при отсутствии двигателя такой мощности выбирается двигатель ближайшей большей номинальной мощности.

Выбранный электродвигатель необходимо проверить по условиям пуска

$$k_u^2 M_i \mu_i \geq M_{n.од} + 0,25 M_i \quad (\text{М.3})$$

Здесь k_u – коэффициент понижения напряжения;

M_n – номинальный момент двигателя;

$M_{c.тр}$ – момент сопротивления при трогании рабочей машины;

μ_n – кратность пускового момента.

Выражение ($k_u^2 M_i \mu_i \geq M_{n.од} + 0,25 M_i$) говорит о том, что пусковой момент при пониженном напряжении – в левой части уравнения должен равняться сумме момента сопротивления при трогании рабочей машины ($M_{c.тр}$) и момента, необходимого для преодоления инерционных масс при разбеге ($0,25 M_n$).

Следует учитывать, что У многих машин сопротивление трения в момент трогания с места может быть повышено из-за стекания масла в подшипниках (сухое трение), или застывания смазки при низких температурах.

3. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателя при продолжительном режиме работы с переменной нагрузки методом максимального нагрева

Примерами машин, создающими переменные нагрузки на валу электродвигателей, могут служить молотильные барабаны, пресса для сена и соломы, кормоприготовительные и сортировальные машины, электропахотные агрегаты и т.д. Величина нагрузки этих машин может изменяться в широких пределах в зависимости от технологических особенностей машины, количества и характера поступления перерабатываемого материала, его физико-механических свойств и др. Выбор мощности двигателя для продолжительного режима работы с переменной нагрузкой представляет собою более сложную задачу чем при постоянной нагрузке.

Производить выбор мощности двигателя по максимальной нагрузке было бы неправильно, так как при работе с меньшими нагрузками, двигатель будет недогружен. Очевидно, что выбирать двигатель с номинальной мощностью, равной минимальной мощности нагрузки также недопустимо, так как при работе с другими нагрузками он будет перегружаться и его температура превысит допустимую. Выбор мощности двигателя по среднему значению нагрузки иногда может дать значительную ошибку. Это объясняется тем, что средняя мощность не учитывает квадратичной зависимости потерь в двигателе от тока, протекающего по обмоткам.

Электродвигатель должен выбираться так, чтобы при максимальной нагрузке температура изоляции не превышала допустимой. Этому требованию наиболее полно отвечает метод максимального нагрева, который позволяет определять превышение температуры двигателя при максимальном нагреве и сравнивать его с допустимым. Для расчета номинальной мощности электродвигателей могут применяться метод максимального нагрева, метод средних потерь, метод эквивалентных величин. Каждый из этих методов имеет свои положительные стороны и недостатки и выбирается тот из них, который наиболее полно отвечает требованиям поставленной задачи.

Метод максимального нагрева

Для решения задачи по расчету номинальной мощности двигателя любым из перечисленных методом необходимо с помощью приборов-самописцев получить нагрузочную диаграмму рабочей машины для нормального режима работы так, чтобы в нее вошли наиболее характерные для данного технологического процесса изменения нагрузки (рис. М.4). Таким образом, В основе расчета номинальной мощности двигателя лежит нагрузочная диаграмма.

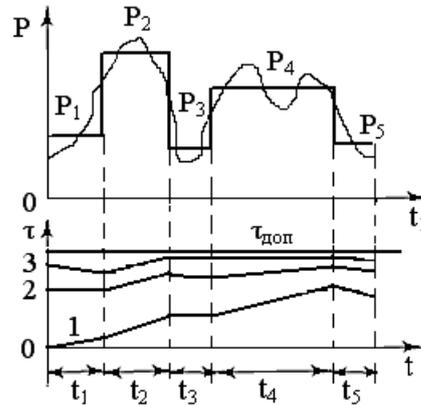


Рис М.10 График нагрузки и нагрева двигателя в продолжительном режиме с переменной нагрузкой

Расчет следует начинать с того, что график нагрузки разбивается на отдельные участки по времени, в пределах которых реальная нагрузка заменяется постоянной, а нагрузочная диаграмма представляется в виде ступенчатой линии с отрезками времени t_1, t_2, \dots, t_n и соответствующими мощностями P_1, P_2, \dots, P_n . При замене реальной нагрузки постоянной на участках следует руководствоваться правилом равенства площадей: площадку над линией постоянной нагрузки должна равняться площади под прямой. По диаграмме со ступенчатой нагрузкой определяется средняя мощность двигателя:

$$P_{\bar{n}\delta} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i} \quad (\text{М.3})$$

При расчете средней мощности самовентилируемых двигателей необходимо учитывать изменение теплоотдачи, вызванное изменениями угловой скорости. В этом случае средняя мощность находится из выражения:

$$P_{\bar{n}\delta} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j} \quad (\text{М.5})$$

где β_j – коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи, вызванное снижением угловой скорости;

n – число участков с постоянной скоростью;

m – число участков, с изменяющейся скоростью.

Теплоотдача двигателя находится в линейной зависимости от угловой скорости

$$\beta_j = \beta_i + (1 - \beta_i) \frac{\omega_j}{\omega_i}, \quad (\text{М.5})$$

где β_o – коэффициент ухудшения теплоотдачи при неподвижном роторе.

При $\omega = \omega_n$ коэффициент ухудшения охлаждения $\beta_o = 1$, а среднее его значение при изменении скорости от 0 до номинальной определяется как:

$$\beta_{\bar{n}\delta} = \frac{1 + \beta_i}{2} \quad (\text{М.5})$$

Учитывая квадратичную зависимость потерь в обмотках двигателя от протекающих по ним токов, определяем расчетную мощность

$$P_{рас}=(1,2\dots 1,3)P_{ср} \quad (\text{М.6})$$

По каталогу выбираем номинальную мощность двигателя по условию:

$$P_{н} \geq P_{рас} \quad (\text{доска!})$$

Имея график нагрузки и номинальную мощность двигателя, определяем коэффициенты загрузки на каждом участке графика нагрузки

$$x_i = \frac{P_i}{P_i} \quad (\text{М.6})$$

а, используя выражение $(\tau_{\text{о\ddot{n}\ddot{o}.i} = \tau_{\text{о\ddot{n}\ddot{o}.i} \frac{\alpha + x_i^2}{\alpha + 1})$, находим установившееся превышение температуры на участках

$$\tau_{\text{о\ddot{s}\ddot{o}.i} = \tau_i \frac{\alpha + x_i^2}{\alpha + 1}, \quad (\text{М.6})$$

где $\tau_{н}$ – номинальное превышение температуры, определяемое из выражения $(\tau_{\text{о\ddot{n}\ddot{o}.i} = \frac{\Delta P_i}{A} \quad (\text{М.12})$. Номинальные потери мощности в $(\tau_{\text{о\ddot{n}\ddot{o}.i} = \frac{\Delta P_i}{A})$ для выбранного двигателя определяются как:

$$\Delta P_i = P_i \frac{1 - \eta_i}{\eta_i} \quad (\text{М.7})$$

Превышение температуры в конце каждого участка определяется по

$$\text{уравнению нагрева} \quad \tau_i = \tau_{\text{о\ddot{n}\ddot{o}.i} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t}{T}} \quad (\text{М.7})$$

Здесь T – постоянная времени нагрева выбранного электродвигателя.

Расчеты, выполненные по уравнению нагрева $(\tau_i = \tau_{\text{о\ddot{n}\ddot{o}.i} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t}{T}})$ на всех участках за достаточно большой отрезок времени, позволяют выявить максимальное превышение температуры. Если это превышение окажется выше допустимого, или значительно ниже его, следует взять двигатель соответственно большей или меньшей номинальной мощности и расчеты повторить. На **рис. М.4** показаны превышение температуры в начале работы двигателя, кривая 1, по истечении времени работы $t=3T$, кривая 2 и кривая 3 по истечении времени работы $t=5T$, когда двигатель практически достигает установившегося теплового режима.

Учитывая, большой объем работы по вычислению превышения температуры в конце каждого участка графика нагрузки за довольно продолжительный отрезок времени, расчеты по выявлению максимального нагрева целесообразно производить с помощью персонального компьютера (в математическом пакете типа EXCEL). Для этого в память машины вводятся параметры нагрузочной диаграммы за расчетный период работы двигателя, выражения, позволяющие рассчитать среднюю и расчетную мощности (

$P_{\dot{n}\dot{d}} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}$) и ($P_{pac} = (1, 2 \dots 1, 3) P_{cp}$ (M.5)), номинальные параметры вы-

бранного по расчетной мощности двигателя: P_n , η_n , τ_n и m (M.8), выражения для определения теплоемкости ($C = c_i \cdot m$), теплоотдачи ($A = aF$ (M.8)),

постоянной времени нагрева ($T = \frac{C}{A}$ (M.8)), коэффициентов загрузки на от-

дельных участках нагрузочной диаграммы ($x_i = \frac{P_i}{P_i}$ (M.6)), установившегося

превышения температуры на участках ($\tau_{\acute{o}c\grave{o}.i} = \tau_i \frac{\alpha + x_i^2}{\alpha + 1}$ (M.6)) и превышения

температуры в конце каждого участка ($\tau_i = \tau_{\acute{o}n\grave{o}.i} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \tau_{i-1} e^{-\frac{t}{T}}$ (M.8)). Пу-

тем многократного копирования параметров нагрузочной диаграммы можно увеличить расчетное время до необходимой продолжительности, чтобы получить значения превышений температуры двигателя, близкими к установившемуся. Если в результате расчетов возникнет необходимость выбора двигателя с другой номинальной мощностью, достаточно в память машины вместо прежних ввести номинальные параметры вновь выбранного двигателя.

После выбора номинальной мощности двигателя по условиям нагрева его необходимо проверить по условиям пуска в соответствии с выражением ($k_u^2 M_i \mu_i \geq M_{\dot{n}\dot{d}} + 0,25 M_i$ (M.7)).

Метод средних потерь

Метод максимального нагрева позволяет непосредственно рассчитывать превышение температуры двигателя в период его наибольшего нагрева и поэтому является наиболее точным. Однако без применения вычислительной техники вычисления многих параметров за продолжительный отрезок времени сопряжены с большими трудностями и затратами времени.

Учитывая, что постоянная времени нагрева даже у двигателей малой мощности исчисляется десятками минут, а периоды изменения переменной нагрузки колеблются в пределах от нескольких секунд до десятых долей секунды, можно сделать заключение, что электродвигатели обладают большой тепловой инерцией, поэтому изменения температуры двигателя не успевают следовать за быстрыми изменениями нагрузки (кривая 3 на рис. M.4) и при продолжительной работе двигателя превышение температуры можно считать установившимся, пропорциональным средним потерям мощности. Сущность метода средних потерь заключается в том, что превышение температуры двигателя, определяемое средними потерями

мощности за цикл, сравнивается с номинальным превышением. И, если выполняется условие $\Delta P_{cp} < \Delta P_n$, то среднее превышение температуры не превышает номинального, т.е.

$$\tau_{\bar{n}\delta} \leq \tau_i$$

В том случае, если средние потери превышают номинальные, двигатель будет перегреваться и, наоборот, при $\Delta P_{cp} \ll \Delta P_n$, двигатель недоиспользуется по нагреву.

Порядок расчета мощности двигателя аналогичен предыдущему. Вначале производится замена реального графика нагрузки ступенчатой линией (рис. М.9), затем рассчитываются по $(P_{\bar{n}\delta} = \frac{\sum_1^n P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j})$ средняя и по $(P_{рас} = (1,2 \dots 1,3) P_{cp} \text{ (М.10)})$ расчетная мощности.

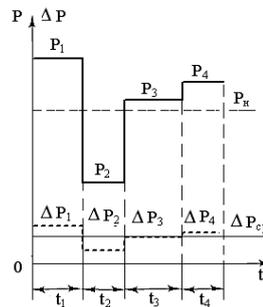


Рис. М.9 График нагрузки на валу двигателя и потерь мощности

По расчетной мощности из каталога выбирается номинальная мощность двигателя и рассчитываются коэффициенты загрузки $(x_i = \frac{P_i}{P_i} \text{ (М.16)})$ на всех участках нагрузочной диаграммы. Потери мощности на участках графика нагрузки определяются из выражения:

$$\Delta P_i = \Delta P_i \frac{\alpha + x_i^2}{\alpha + 1} \quad \text{(М.10)}$$

а с учетом ухудшения охлаждения на участках работы с изменяющейся скоростью как:

$$\Delta P_{\bar{n}\delta} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j} \quad \text{(М.10)}$$

Здесь ΔP_i —потери мощности $\Delta P_1, \Delta P_2 \dots, \Delta P_n$ при работе двигателя с нагрузками P_1, P_2, \dots, P_n в интервалах времени t_1, t_2, \dots, t_n ; $\beta_j t_j$ —интервалы времени с уменьшенной теплоотдачей.

Полученные по средние потери сравниваются с номинальными.

Ранее выбранный двигатель должен удовлетворять условию:

$$\Delta P_{cp} \leq \Delta P_n \quad \text{(М.10)}$$

Если средние потери превышают номинальные или окажутся на много меньше их, расчеты следует повторить для двигателей соответственно большей или меньшей мощности.

Выбранный двигатель проверяется по условиям пуска.

Метод эквивалентных величин

Метод средних потерь, основанный на сопоставлении потерь, позволяет достаточно точно рассчитывать мощность электродвигателей. Расчеты по вычислению коэффициентов загрузки, потерь мощности на участках, средних потерь являются довольно трудоемким. Метод эквивалентных величин позволяет непосредственно по данным нагрузочной диаграммы рассчитать потребляемую мощность двигателя, не прибегая к вычислениям промежуточных величин.

Под эквивалентной мощностью понимают такую постоянную мощность нагрузки, при работе с которой потери в двигателе равны средним потерям при заданном графике нагрузки.

Метод эквивалентных величин может быть получен из метода средних потерь, если в $(\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}$ (М.10)) общие потери на участках выразить через постоянные и переменные потери:

потери мощности на участках графика нагрузки

$$\Delta P_i = \Delta P_c + \Delta P_{v,i} = \Delta P_c + I_i^2 R, \quad (\text{М.11})$$

и потери средние

$$\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = \Delta P_c + \Delta P_{v,\bar{n}\bar{\delta}} = \Delta P_c + I_y^2 R \quad (\text{М.11})$$

Здесь I_i —ток нагрузки на отдельных участках нагрузочной диаграммы; I_y —постоянный по величине ток, при котором переменные потери в двигателе равны средним переменным потерям; этот ток принято называть эквивалентным током.

Для упрощения дальнейших выкладок выражения $(\Delta P_i = \Delta P_c + I_i^2 R)$ и $(\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = \Delta P_c + I_y^2 R)$ преобразуем к виду:

$$\Delta P_i = \Delta P_c + I_i^2 R = \Delta P_c + I_i^2 R \frac{I_i^2}{I_i^2} = a + bx_i^2, \quad (\text{М.11})$$

$$\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = \Delta P_c + \Delta P_{v,\bar{n}\bar{\delta}} = \Delta P_c + I_y^2 R = a + bx_y^2 \quad (\text{М.11})$$

$$\text{где } a = \Delta P_c, \quad b = \Delta P_{v,i}, \quad x_i = \frac{I_i^2}{I_i^2} \quad \text{и} \quad x_y = \frac{I_y^2}{I_i^2} \quad (\text{М.12})$$

Подставим в выражение $(\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = \frac{\sum_1^n \Delta P_i t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j})$ значения потерь из $(\Delta P_i = a + bx_i^2)$ и $(\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = a + bx_y^2)$

$$\Delta P_i = a + bx_i^2) \text{ и } (\Delta P_{\bar{n}\bar{\delta}} = a + bx_y^2)$$

$$a + bx_y^2 = \frac{(a + bx_1^2)t_1 + (a + bx_2^2)t_2 + \dots + (a + bx_n^2)t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (\text{М.12}).$$

После раскрытия скобок в числителе, группирования подобных членов и деления дробей, получим:

$$a + bx_y^2 = \frac{a(t_1 + t_2 + \dots + t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} + \frac{b(x_1^2 t_1 + x_2^2 t_2 + \dots + x_n^2 t_n)}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (\text{M.13})$$

Из этого выражения после соответствующих сокращений с учетом соотношений ($x_i = \frac{I_i}{I_i}$ и $x_y = \frac{I_y}{I_i}$) находим величину эквивалентного тока:

$$I_y = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (\text{M.13})$$

При изменении скоростных режимов у самовентилируемых двигателей эквивалентный ток определится из выражения:

$$I_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n I_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^j \beta_j t_j}} \quad (\text{M.13})$$

В общем случае при произвольной форме графика нагрузки, выраженного уравнением $i(t)$, эквивалентный ток определяется как:

$$I_y = \sqrt{\left(\frac{1}{t_{\bar{o}}} \int_0^{t_{\bar{o}}} i^2(t) dt \right)} \quad (\text{M.13})$$

Для большей точности расчета эквивалентного тока, некоторые участки графика нагрузки целесообразно заменять не постоянными значениями токов, а трапециидальными (участки t_1, t_3, t_5 на рис. М.14).

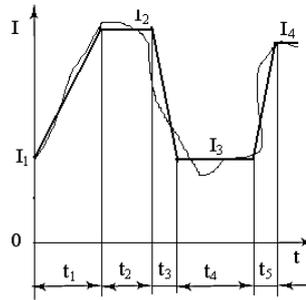


Рис. М.20 Замена графика нагрузки ломаной линией

Для определения эквивалентного тока на 1-м участке воспользуемся вы-

ражением ($I_y = \sqrt{\left(\frac{1}{t_{\bar{o}}} \int_0^{t_{\bar{o}}} i^2(t) dt \right)}$):

$$I_{y1} = \sqrt{\frac{\int_0^{t_1} i_1^2(t) dt}{t_1}} \quad (\text{M.15})$$

Поскольку ток на первом участке находится в линейной зависимости от времени, можно записать:

$$I = I_1 + \frac{I_2 - I_1}{t_1} t \quad (\text{M.15})$$

Производная функции ($I = I_1 + \frac{I_2 - I_1}{t_1} t$) по времени

$$\frac{dI}{dt} = \frac{I_2 - I_1}{t_1} \quad \text{откуда} \quad dt = \frac{t_1}{I_2 - I_1} dI \quad (\text{M.15})$$

Подставляя значение дифференциала времени из $(dt = \frac{t_1}{I_2 - I_1} dI)$ в выра-

жение $(I_{y1} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} i_1(t)^2 dt}{t_1}})$, получим $I_{y1} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_1} \int_{t_1}^{t_2} I^2 \frac{t_1}{I_2 - I_1} dt\right)}$ **(M.15)**

Решением уравнения является: $I_{y1} = \sqrt{\left(\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}\right)}$ **(M.16)**

Если участок графика нагрузки выражен треугольником, например ток $I_1=0$, из $(I_{y1} = \sqrt{\left(\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}\right)})$ следует, что : $I_{y1} = \sqrt{\frac{I_2^2}{3}} = \frac{I_2}{\sqrt{3}}$ **(M.22)**

Выражения для определения эквивалентного тока $(I_{y1} = \sqrt{\left(\frac{I_1^2 + I_1 I_2 + I_2^2}{3}\right)})$ и $(I_{y1} = \sqrt{\frac{I_2^2}{3}} = \frac{I_2}{\sqrt{3}})$ справедливы как для возрастающего во времени так и для убывающего тока.

Номинальная мощность электродвигателя выбирается по условию:

$$I_i \geq I_{y1}$$

На практике часто нагрузочные диаграммы представляются зависимостями момента от времени. Учитывая, что при работе двигателей постоянного тока независимого и параллельного возбуждения, синхронных и асинхронных двигателей магнитный поток практически не зависит от нагрузки, то, умножив левую и правую части выражения $(I = I_1 + \frac{I_2 - I_1}{t_1} t)$ на $c\Phi$, получим уравнение для определения эквивалентного момента:

$$M_y = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad \textbf{(M.17)}$$

При наличии участков в нагрузочной диаграмме с неполной теплоотдачей, выражение для определения эквивалентного момента запишется как:

$$M_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^j \beta_j t_j}} \quad \textbf{(M.17)}$$

Выбор номинальной мощности двигателя в этом случае производится по условию:

$$M_i \geq M_y.$$

Когда нагрузочная диаграмма электропривода и механизма задана графиком мощности выбор двигателя по нагреву может быть произведен методом эквивалентной мощности. Однако этот метод применим лишь в тех случаях, когда существует прямая пропорциональность между моментом, развиваемым двигателем и его мощностью, т.е. при $\omega \approx \text{const}$. Следовательно,

$$P = cM.$$

К двигателям с такими свойствами можно отнести двигатели с жесткими механическими характеристиками: асинхронные, синхронные и двигатели постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением, работающие с номинальным магнитным потоком.

Формулу для определения эквивалентной мощности при ступенчатом графике нагрузки получим, умножив обе части выражений (

$$M_y = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \text{ и } (M_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n M_i^2 t_i}{\sum_1^n t_i + \sum_1^j t_j}})$$

на номинальную угловую

$$P_y = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (\text{М.18})$$

Учитывая, что теплоотдача находится в линейной зависимости от угловой скорости, методом эквивалентной мощности можно воспользоваться и в случае переменной скорости, если привести мощность при угловой скорости ω_i к мощности при номинальной скорости через соотношение $P_{np.i} = P_i \omega_n / \omega_i$.

В этом случае общее выражение для определения эквивалентной мощности запишется как:

$$P_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 t_i + \sum_1^m P_j^2 (\omega_i / \omega_j)^2 t_j}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}} \quad (\text{М.23})$$

Выражение $(P_y = \sqrt{\frac{\sum_1^n P_i^2 t_i + \sum_1^m P_j^2 (\omega_i / \omega_j)^2 t_j}{\sum_1^n t_i + \sum_1^m \beta_j t_j}})$ с учетом $(I_{y1} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_1} \int_{t_1}^{t_2} I^2 \frac{t_1}{I_2 - I_1} dt\right)})$

наиболее полно отражает особенности графика нагрузки и скоростных режимов работы двигателя.

Номинальная мощность электродвигателя выбирается по условию:

$$D_i \geq D_y$$

Выбранный двигатель проверяется по условиям пуска.

Уравнения $(I_y = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}})$, $(M_y = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}})$ и

$$P_y = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}$$

содержат параметры нагрузочных диаграмм механизма без учета влияния инерционных масс привода. При значительных инерционных массах и резких изменениях скоростных режимов следует учитывать изменения запаса кинетической энергии.

Рассмотренные методы позволяют производить расчет и проверку мощности двигателей продолжительного режима, работающих в режимах S7, S8 и подобных им и в режимах S3, S4, S5 с учетом ограничений по скорости, магнитному потоку и моменту инерции.

4. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при кратковременном режиме работы.

В практике не редко возникают ситуации, когда двигатели продолжительного режима используются в кратковременном режиме.

Если при этом номинальную мощность двигателя принять равной мощности нагрузки, то в конце рабочего периода превышение его температуры будет ниже допустимого.

Для кратковременного режима работы при выборе номинальной мощности двигателя продолжительного режима следует исходить из условия, чтобы за время его кратковременной работы превышение температуры достигало номинального (допустимого) значения. Для этого следует выбирать двигатель с номинальной мощностью меньше мощности нагрузки.

Если принять номинальную мощность двигателя, равной мощности нагрузки, превышение его температуры будет изменяться по уравнению:

$$\tau = \tau_i \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (\text{М.19})$$

Здесь T – постоянная времени нагрева;

τ_n – номинальное превышение температуры двигателя - $\tau_n = \Delta P_n / A$ (М.19)

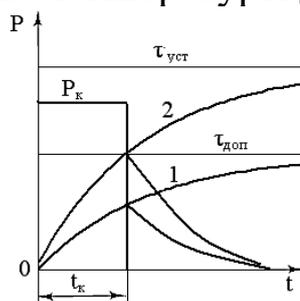


Рис. М.19 График нагрева двигателя при кратковременном режиме работы

Из графика (кривая 1 на рис. М.19) в конце рабочего периода t_k превышение температуры двигателя ниже допустимого. Чтобы за это время превышение достигло допустимой величины, равной номинальной $\tau_{доп} = \tau_n$, двигатель следует перегружать то есть его номинальная мощность должна быть меньше мощности нагрузки. При работе двигателя с перегрузкой его нагрев будет происходить по кривой 2 (рис. М.19), согласно

уравнению:

$$\tau = \tau_{\overset{\circ}{\underset{\circ}{\overset{\circ}{\delta}}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

и к концу периода работы t_k превышение должно достигнуть номинального значения, т.е.

$$\tau_i = \tau_{\overset{\circ}{\underset{\circ}{\overset{\circ}{\delta}}}} \left(1 - e^{-\frac{t_k}{T}}\right) \quad (\text{М.20})$$

где $\tau_{уст}$ – установившееся превышение температуры, равное отношению потерь при работе двигателя с перегрузкой к теплоотдаче

$$\tau_{\overset{\circ}{\underset{\circ}{\overset{\circ}{\delta}}}} = \Delta P_{\overset{\circ}{\delta}} / A \quad (\text{М.20})$$

Отношение потерь при работе с перегрузкой к номинальным потерям называется коэффициентом термической перегрузки

$$\delta_{\delta} = \frac{\Delta P_{\delta}}{\Delta P_i}, \quad (\text{M.20})$$

Коэффициентом термической перегрузки показывает во сколько раз потери в двигателе при перегрузке должны быть больше потерь номинальных, чтобы превышение температуры в конце рабочего периода достигло номинального значения.

Выразим из $(\tau_n = \Delta P_n / A)$ потери при номинальной нагрузке, а из $(\tau_{\delta} = \Delta P_{\delta} / A)$ при перегрузке и подставим их в $(\delta_{\delta} = \frac{\Delta P_{\delta}}{\Delta P_i})$. После сокращений найдем коэффициент термической перегрузки, равным

$$p_{\delta} = \frac{\tau_{\delta}}{\tau_i} \quad (\text{M.20})$$

подставив значение τ_n из $(\tau_i = \tau_{\delta} (1 - e^{-\frac{-t_{\delta}}{T}}))$, окончательно получим

$$p_{\delta} = \frac{1}{1 - e^{-\frac{-t_{\delta}}{T}}} \quad (\text{M.20})$$

По коэффициенту термической перегрузки можно найти Коэффициент механической перегрузки, показывающий во сколько раз номинальная мощность двигателя должна быть меньше мощности нагрузки

$$p_m = \frac{\Delta P_{\delta}}{\Delta P_i} = \frac{\Delta P_n + \Delta P_{\delta}}{\Delta P_n + \Delta P_{v,i}} = \frac{\Delta P_n + \Delta P_{v,i} p_i^2}{\Delta P_c + \Delta P_{v,i}} = \frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1}, \quad (\text{M.21})$$

откуда

$$p_i = \sqrt{p_{\delta} (\alpha + 1) - \alpha} \quad \text{или} \quad p_i = \sqrt{\frac{\alpha + 1}{1 - e^{-\frac{-t_{\delta}}{T}}} - \alpha}. \quad (\text{M.21})$$

Здесь α —коэффициент потерь, $\alpha = \Delta P_{v,i} / \Delta P_n$.

Пренебрегая постоянными потерями в выражении $(p_i = \sqrt{p_{\delta} (\alpha + 1) - \alpha})$, можно записать:

$$\delta_i = \sqrt{\delta_{\delta}} \quad (\text{M.22})$$

Если в рабочий период нагрузка меняется, то вначале необходимо рассчитать эквивалентную мощность за время t_k .

Номинальная мощность двигателя по нагреву рассчитывается как

$$P_i \geq P_{\delta} / p_i \quad (\text{M.22})$$

Выбранный двигатель проверяется по перегрузочной способности и по условиям пуска: $P_i \geq P_{\delta} / k_{\delta}$ и $k_u^2 M_i \geq M_c + 0,25 M_i$, (M.22)

где k_{δ} —перегрузочная способность двигателя;

M_n —пусковой момент двигателя при номинальном напряжении.

Перегрузочная способность принимается для двигателей постоянного тока, асинхронных с фазным ротором и синхронных $\kappa_d = 2,0 \dots 2,5$, для асинхронных с короткозамкнутым ротором $\kappa_d = 1,7 \dots 2,2$.

Для работы в кратковременном режиме рекомендуется применять короткозамкнутые двигатели с повышенным пусковым моментом.

Двигатели продолжительного режима в кратковременном режиме обычно работают с большими механическими перегрузками и редко достигают допустимого нагрева, так как их мощность в большинстве случаев определяется условиями пуска или перегрузочной способностью. *Работа двигателей с механическими перегрузками сопровождается протеканием повышенных токов в обмотках, вследствие чего переменные потери превышают постоянные*, в то время коэффициент полезного действия имеет максимальное значение при $\Delta P_v = \Delta P_c$. Следовательно, двигатель будет работать при пониженном к.п.д. *В связи с этим для работы в кратковременном режиме предпочтительнее использовать специальные двигатели – кратковременного номинального режима, у которых учтены недостатки двигателей продолжительного режима.* Фактическая продолжительность кратковременной работы t_k реальных графиков нагрузки не всегда совпадает с расчетными, на которые выпускаются двигатели кратковременного режима. *В этом случае для определения номинальной мощности двигателя кратковременного режима $P_{к.н}$ с расчетной продолжительностью работы $t_{к.н}$ мощность нагрузки P_k должна быть приведена (пересчитана) к мощности с расчетной продолжительностью.* Обычно мощность нагрузки приводится к мощности с ближайшей большей продолжительностью работы. В основе приведения мощностей лежит равенство превышения температур в конце периода работы $\tau_{дон}$:

$$\tau_{дон} = \frac{\Delta P_e}{A} (1 - e^{-\frac{t_e}{T}}) = \frac{\Delta P_{e,i}}{A} (1 - e^{-\frac{t_{e,i}}{T}}) \quad (\text{М.23})$$

ΔP_k – потери в двигателе при кратковременной нагрузке, отличной от номинальной;

$\Delta P_{к.н}$ – потери при работе с номинальной нагрузкой;

T – постоянная времени нагрева;

$t_{к.н}$ – расчетное время работы в кратковременном режиме;

t_k – время работы по графику нагрузки.

Потери мощности при работе двигателя с нестандартной продолжительностью работы в уравнение приведения мощностей ($\tau_{дон} = \frac{\Delta P_e}{A} (1 - e^{-\frac{t_e}{T}}) = \frac{\Delta P_{e,i}}{A} (1 - e^{-\frac{t_{e,i}}{T}})$) выразим через потери при стандартной продолжительности и коэффициент механической загрузки

$$\Delta P_e = \Delta P_{e,i} \frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1} \quad (\text{М.23})$$

Это значение ΔP_{κ} подставим в $(\tau_{\text{аив}} = \frac{\Delta P_{\dot{e}}}{A}(1 - e^{-\frac{t_{\dot{e}}}{T}}) = \frac{\Delta P_{\dot{e},i}}{A}(1 - e^{-\frac{t_{\dot{e},i}}{T}}))$ и после сокращения общих множителей получим:

$$\frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1} = (1 - e^{-t_{\dot{e}}/T}) = 1 - e^{-t_{\dot{e},i}/T} \quad (\text{M.23})$$

Здесь p_m — коэффициент механической перегрузки, $p_m = P_{\kappa}/P_{\kappa,н}$

Из $(\frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1} = (1 - e^{-t_{\dot{e}}/T}) = 1 - e^{-t_{\dot{e},i}/T})$ находим коэффициент механической перегрузки

$$p_i = \sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-t_{\dot{e},i}/T}}{1 - e^{-t_{\dot{e}}/T}} - \alpha} \quad (\text{M.23})$$

Приведенную мощность нагрузки к стандартной продолжительности кратковременной работы находим как:

$$P_{\dot{e},i} = \frac{P_{\dot{e}}}{p_i} = \frac{P_{\dot{e}}}{\sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-t_{\dot{e},i}/T}}{1 - e^{-t_{\dot{e}}/T}} - \alpha}} \quad (\text{M.24})$$

Для прикидочных расчетов можно без большой погрешности применить более простые соотношения, основанные на равенстве потерь энергии при работе с заданными параметрами по графику нагрузки и при работе с номинальной мощностью и расчетной продолжительностью:

$$(\Delta P_{\bar{n}} + \Delta P_{\text{в}}) t_{\delta} = (\Delta P_{\bar{n}} + \Delta P_{\text{в}} p_i^2) t_{\dot{e}} \quad (\text{M.24})$$

Решением выражения относительно p_m является:

$$p_i = \sqrt{(\alpha + 1) \frac{t_{\delta}}{t_{\dot{e}}} - \alpha}, \quad (\text{M.24})$$

откуда номинальная мощность двигателя с расчетной продолжительностью работы

$$P_i = \frac{P_{\dot{e}}}{\sqrt{(\alpha + 1) \frac{t_{\delta}}{t_{\dot{e}}} - \alpha}} \quad (\text{M.24})$$

Расхождение полученных результатов по выражениям приведенной мощность нагрузки к стандартной продолжительности кратковременной работы $(P_{\dot{e},i} = \frac{P_{\dot{e}}}{p_i} = \frac{P_{\dot{e}}}{\sqrt{(\alpha + 1) \frac{1 - e^{-t_{\dot{e},i}/T}}{1 - e^{-t_{\dot{e}}/T}} - \alpha}})$ и $(P_i = \frac{P_{\dot{e}}}{\sqrt{(\alpha + 1) \frac{t_{\delta}}{t_{\dot{e}}} - \alpha}})$ не превышает 10 %.

5. Расчет и выбор номинальной мощности электродвигателей при повторно-кратковременном режиме работы (S3)

Повторно-кратковременный режим работы двигателей характеризуется тем, что в нем периоды работы чередуются с периодами пауз, а отношение времени работы к времени цикла называется относительной продолжительностью включения. В реальных условиях не всегда удается получить такие графики с правильным чередованием рабочих периодов и остановок как показано на **рис. М.25**

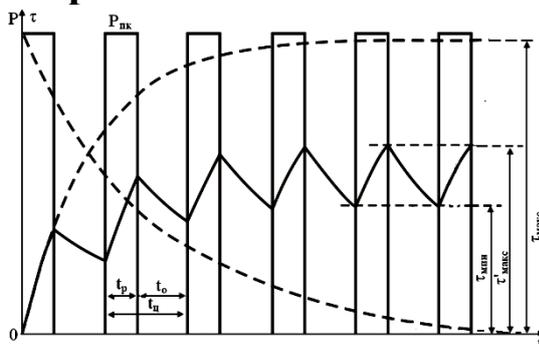


Рис. М.25 График нагрузки и изменения температуры при повторно-кратковременном режиме работы

Поэтому в действительности относительную продолжительность ε приходится определять не из одного цикла, а за более продолжительный отрезок времени. Рабочие периоды графика нагрузки могут включать в себя участки работы различной продолжительности, с различными угловыми скоростями, паузы, участки пуска и электрического торможения. Такой график следует вначале привести к одноступенчатому, в котором мощность за рабочий период, время работы и время пауз определяются как эквивалентные:

эквивалентная мощность:
$$P_{\gamma} = \sqrt{\frac{\sum_1^m (P_i \omega_i / \omega_i)^2 t_{pi}}{\sum_1^m \beta_i t_i}} \quad (\text{М.26})$$

эквивалентное время рабочего периода:
$$t_{\delta.\gamma} = \frac{\sum_1^m t_{\delta.i}}{m} \quad (\text{М.26})$$

эквивалентное время пауз:
$$t_{i.\gamma} = \frac{\sum_1^n t_{o.j}}{n} \quad (\text{М.26})$$

и эквивалентная относительная продолжительность включения:

$$\varepsilon = \frac{t_{\delta.\gamma}}{t_{\delta.\gamma} + t_{i.\gamma}} \quad (\text{М.26})$$

Здесь m —число рабочих участков и n —число пауз в цикле.

В повторно-кратковременном режиме могут использоваться двигатели продолжительного режима и специальные, рассчитанные для работы в этом режиме. Выбор мощности двигателя, как и ранее, основан на том, что в процессе работы его температура не должна превышать допустимой.

Если двигатель, рассчитанный для продолжительного режима, работает

с постоянной нагрузкой $P_{нк}$ (рис. М.25), потери мощности у него будут постоянными и превышение температуры по истечении времени $t=\infty$ достигнет установившегося значения $\tau_{макс}$.

При работе этого двигателя в повторно-кратковременном режиме с той же нагрузкой превышение температуры, меняясь по отрезкам экспоненциальной кривой, не успевает достигнуть установившегося значения как в рабочий период, так и в течение паузы. Для достаточно удаленного от начала цикла наступает установившийся температурный режим, когда колебания превышения температуры происходят в пределах от $\tau'_{макс}$ до $\tau_{мин}$. При правильно выбранном двигателе продолжительного режима превышение температуры $\tau'_{макс}$ не должно превышать допустимого. Для того, чтобы двигатель достиг установившегося превышения температуры $\tau'_{макс}$, работая в продолжительном режиме, его нагрузка $P_{дл}$ должна быть меньше нагрузки $P_{нк}$. Это объясняется тем, что при повторно-кратковременном режиме в период пауз двигатель отдает часть тепла в охлаждающую среду.

Максимальное превышение температуры в конце рабочего отрезка времени можно записать как:

$$\tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}} = \tau_{i\delta\epsilon\bar{n}} (1 - e^{-\frac{t_\delta}{T}}) + \tau_{i\delta\epsilon} e^{-\frac{t_\delta}{T}} \quad (\text{М.27})$$

Минимальное превышение - в конце паузы: $\tau_{i\delta\epsilon} = \tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}} e^{-\frac{t_i}{T_i}}$ (М.27)

После подстановки значения $\tau_{мин}$ из $(\tau_{i\delta\epsilon} = \tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}} e^{-\frac{t_i}{T_i}})$ в выражение $(\tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}} = \tau_{i\delta\epsilon\bar{n}} (1 - e^{-\frac{t_\delta}{T}}) + \tau_{i\delta\epsilon} e^{-\frac{t_\delta}{T}})$ находим максимальное превышение температуры в конце рабочего времени

$$\tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}} = \tau_{i\delta\epsilon\bar{n}} \frac{1 - e^{-t_\delta/T}}{1 - e^{-\left(\frac{t_\delta}{T} + \frac{t_i}{T_i}\right)}} \quad (\text{М.27})$$

Здесь T —постоянная времени нагрева в период работы двигателя, T_o —постоянная времени охлаждения в период паузы.

Выражение $(\tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}} = \tau_{i\delta\epsilon\bar{n}} \frac{1 - e^{-t_\delta/T}}{1 - e^{-\left(\frac{t_\delta}{T} + \frac{t_i}{T_i}\right)})$ показывает, что максимальное превышение

температуры двигателя при повторно-кратковременном режиме $\tau'_{макс}$ меньше, чем превышение температуры $\tau_{макс}$ при работе с такой же по величине постоянной нагрузкой в продолжительном режиме. По аналогии с $(\delta_o = \frac{\Delta P_e}{\Delta P_i})$ можно определить коэффициент термической перегрузки, который показывает во сколько раз потери мощности в рабочий период повторно-кратковременного режима должны превышать потери при продолжительной нагрузке, чтобы превышение достигло $\tau'_{макс}$

$$P_\delta = \frac{\Delta P_{i\delta}}{\Delta P_{\bar{a}\bar{e}}} = \frac{\tau_{i\delta\epsilon\bar{n}}}{\tau'_{i\delta\epsilon\bar{n}}} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_\delta}{T} + \frac{t_i}{T_i}\right)}}{1 - e^{-\frac{t_\delta}{T}}} \quad (\text{М.28})$$

где $\Delta P_{нк}$ —потери при работе двигателя с нагрузкой $P_{нк}$;

$\Delta P_{дл}$ —потери при работе с постоянной нагрузкой $P_{дл}$

Из $(p_{\delta} = \frac{\Delta P_{i\dot{e}}}{\Delta P_{\ddot{a}\ddot{e}}} = \frac{\tau_{i\dot{a}\dot{e}\ddot{n}}}{\tau'_{i\dot{a}\dot{e}\ddot{n}}} = \frac{1-e^{-\left(\frac{t_{\delta}+t_i}{T}\right)}}{1-e^{-\frac{t_{\delta}}{T}}})$ следует, что если $t_{\delta} \rightarrow \infty$, то повторно-кратко-

временный режим переходит в кратковременный и коэффициент термической перегрузки повторно-кратковременного режима будет равен коэффициенту термической перегрузки кратковременного режима.

Переменные потери при нагрузке повторно-кратковременного режима можно выразить через переменные потери продолжительного режима и коэффициент механической перегрузки как

$$\Delta P_{i\dot{e}} = \Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v}} = \Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v},\ddot{a}\ddot{e}} p_i^2 \quad (\text{M.28})$$

Здесь p_m — коэффициент механической перегрузки, равный

$$p_i = \frac{P_{i\dot{e}}}{P_{\ddot{a}\ddot{e}}} \quad (\text{M.28})$$

Подставляя выражения $(\Delta P_{i\dot{e}} = \Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v},\ddot{a}\ddot{e}} p_i^2)$ в $(p_{\delta} = \frac{\Delta P_{i\dot{e}}}{\Delta P_{\ddot{a}\ddot{e}}} = \frac{\tau_{i\dot{a}\dot{e}\ddot{n}}}{\tau'_{i\dot{a}\dot{e}\ddot{n}}} = \frac{1-e^{-\left(\frac{t_{\delta}+t_i}{T}\right)}}{1-e^{-\frac{t_{\delta}}{T}}})$ получим

$$p_{\delta} = \frac{\Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v},\ddot{a}\ddot{e}} p_i^2}{\Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v},\ddot{a}\ddot{e}}} = \frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1} \quad (\text{M.29})$$

Из выражений $(p_{\delta} = \frac{\Delta P_{i\dot{e}}}{\Delta P_{\ddot{a}\ddot{e}}} = \frac{\tau_{i\dot{a}\dot{e}\ddot{n}}}{\tau'_{i\dot{a}\dot{e}\ddot{n}}} = \frac{1-e^{-\left(\frac{t_{\delta}+t_i}{T}\right)}}{1-e^{-\frac{t_{\delta}}{T}}})$ и $(p_{\delta} = \frac{\Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v},\ddot{a}\ddot{e}} p_i^2}{\Delta P_{\ddot{n}} + \Delta P_{\dot{v},\ddot{a}\ddot{e}}} = \frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1})$ можно

записать
$$\frac{\alpha + p_i^2}{\alpha + 1} = \frac{1-e^{-\left(\frac{t_{\delta}+t_i}{T}\right)}}{1-e^{-\frac{t_{\delta}}{T}}} \quad (\text{M.29})$$

Отсюда коэффициент механической перегрузки:

$$p_i = \sqrt{\frac{1-e^{-\left(\frac{t_{\delta}+t_i}{T}\right)}}{1-e^{-\frac{t_{\delta}}{T}}} (\alpha + 1) - \alpha} \quad (\text{M.29})$$

Определив по данным графика нагрузки коэффициент механической перегрузки, находим расчетную мощность двигателя продолжительного режима

$$P_{\ddot{a}\ddot{e}} = \frac{P_{i\dot{e}}}{p_i} \quad (\text{M.30})$$

и затем номинальную мощность как $P_i \geq P_{\ddot{a}\ddot{e}}$.

Для повторно-кратковременного режима работы целесообразно применять специальные двигатели (двигатели с повышенным скольжением), обладающие значительной перегрузочной способностью и повышенным пусковым моментом, что позволяет максимально использовать их по нагреву. За счет увеличения постоянных потерь коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке у этих двигателей выше, чем у двигателей длительного режима, работающих с механическими перегрузками в повторно-

кратковременном режиме. Такие двигатели выпускаются с нормированной мощностью при нормированной продолжительности включения 15; 25; 40 и 60% и длительностью цикла 10 мин. При длительности цикла, превышающей нормированную, расчет и выбор мощности двигателя ведется как для продолжительного режима с переменной нагрузкой. Двигатели, с меньшими относительными продолжительностями включения не рекомендуется использовать при больших значениях продолжительности и тем более в продолжительном режиме, так как из-за больших постоянных потерь они могут перегреваться даже на холостом ходу.

Выбор номинальной мощности специальных двигателей ведется, исходя из параметров графика нагрузки. Если реальная продолжительность включения совпадает с нормированной, то номинальная мощность двигателя берется равной мощности нагрузки или ближайшей большей при той же продолжительности включения. В противном случае мощность нагрузки необходимо привести к нормированной продолжительности включения и по ней выбирать номинальную мощность двигателя. *За основу приведения мощности принимается равенство потерь энергии за один цикл при мощности нагрузки и фактической продолжительности включения и при нормированной продолжительности и номинальной мощности, то есть*

$$\Delta P_{\delta} t_{\delta} = \Delta P_i t_i . \quad (\text{М.30})$$

Найдем средние потери мощности за цикл, разделив обе части этого равенства на время цикла, и выразим потери через постоянные и переменные

$$(\Delta P_c + \Delta P_{v,i}) \frac{t_i}{t_{\delta}} = (\Delta P_c + \Delta P_{v,i} \delta^2) \frac{t_{\delta}}{t_{\delta}} \quad \text{или} \quad (\Delta P_c + \Delta P_{v,i}) \varepsilon_i = (\Delta P_c + \Delta P_{v,i} \delta^2) \varepsilon_{\delta} \quad (\text{М.30})$$

где ΔP_x —потери мощности при работе с нагрузкой по графику;

ΔP_H — потери мощности при номинальной нагрузке;

t_x и t_H —продолжительность рабочего периода по графику и нормированная соответственно;

ε_H —нормированная относительная продолжительность включения;

ε_x —продолжительность включения по графику нагрузки;

x —перегрузочная способность двигателя, *определяемая как отношение мощности нагрузки при фактической продолжительности включения P_x к номинальной мощности P_H при нормированной продолжительности, т.е.*

$$x = \frac{P_{\delta}}{P_i} \quad (\text{М.31})$$

Решая выражение $(\Delta P_c + \Delta P_{v,i}) \varepsilon_i = (\Delta P_c + \Delta P_{v,i} \delta^2) \varepsilon_{\delta}$ относительно x , получим:

$$x = \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\delta}} (\alpha + 1) - \alpha} , \quad (\text{М.31})$$

где α — коэффициент потерь.

Подставляя в выражение значение x , как отношение P_x/P_n , находим приведенную к нормированной продолжительности включения мощность нагрузки

$$P_i = \frac{P_{\bar{o}}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\bar{o}}}(\alpha+1) - \alpha}} \quad (\text{M.31})$$

Из выражения можно определить допустимую по нагреву мощность двигателя с номинальной мощностью P_n при заданной продолжительностью включения:

$$P_{\bar{o}} = P_i \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\bar{o}}}(\alpha+1) - \alpha} \quad (\text{M.31})$$

Из уравнения ($x = \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\bar{o}}}(\alpha+1) - \alpha}$) видно, что при $\varepsilon_n > \varepsilon_x$ с ростом коэффициента потерь α растет перегрузочная способность двигателя и по условиям нагрева при данной мощности нагрузки P_x требуется меньшая номинальная мощность P_n . Однако при некотором соотношении ε_x и ε_n подкоренное выражение в ($P_{\bar{o}} = P_i \sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\bar{o}}}(\alpha+1) - \alpha}$) обращается в нуль и даже приобретает отрицательный знак. В этих случаях электродвигатель может перегреваться только за счет постоянных потерь, работая вхолостую.

Если в ($P_i = \frac{P_{\bar{o}}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{\bar{o}}}(\alpha+1) - \alpha}}$) пренебречь постоянными потерями, формула

упрощается и тогда
$$P_i = P_{\bar{o}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\bar{o}}}{\varepsilon_i}} \quad (\text{M.32})$$

Выражение ($P_i = P_{\bar{o}} \sqrt{\frac{\varepsilon_{\bar{o}}}{\varepsilon_i}}$) позволяет определить допустимую нагрузку двигателя продолжительного режима при работе в повторно-кратковременном режиме с различными значениями ПВ: при работе с нормированными ПВ

$$P_{15} = P_i \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{15}}} = P_i \sqrt{\frac{1}{0,15}} = 2,58D_i \quad P_{25} = P_i \sqrt{\frac{1}{0,25}} = 2D_i$$

$$P_{40} = P_i \sqrt{\frac{1}{0,4}} = 1,58D_i, \quad P_{60} = P_i \sqrt{\frac{1}{0,6}} = 1,29D_i, \quad (\text{M.32})$$

при не нормированных ПВ

$$P_{\bar{o}} = P_i \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_{\bar{o}}}}$$

Учитывая существенное влияние постоянных потерь на нагрев двигателей с повышенным скольжением, в некоторых случаях двигатели с меньшей нормированной продолжительностью могут работать при большей продолжительности, однако крановые двигатели ставить на работу в продолжительном режиме не рекомендуется.

5. Выбор мощности двигателей и расчет оптимальных размеров инерционных масс при ударных нагрузках

Ударными считаются такие нагрузки, при которых момент сопротивления рабочей машины периодически изменяется от минимального до максимального за короткий промежуток времени. *Примерный график ударной нагрузки представлен на рис. М.34.* Такими или подобными графиками нагрузки обладают поперечно-строгальные станки, машины для рубки металлов, дыропробивные машины, пресса для штамповки деталей, поршневые гидравлические насосы и т.п. Для агрегатов с ударной нагрузкой в большинстве случаев применяются электроприводы, в передаточном звене которых предусматривается установка маховиков, способных запасать кинетическую энергию, которая при изменении скорости создает положительный или отрицательный динамический момент, сглаживая удары нагрузки на валу электродвигателя. *При резком возрастании нагрузки (начало участка t_1 на рис. М.34) момент сопротивления рабочей машины M_{c1} больше момента двигателя, поэтому происходит снижение угловой скорости. Преодоление нагрузки происходит как за счет развиваемого двигателем момента $M_{дв}$, так и за счет динамического момента $M_{дин}$. На участке t_2 момент, развиваемый двигателем больше момента сопротивления рабочей машины, поэтому часть его идет на преодоление динамического момента, связанного с увеличением запаса кинетической энергии в инерционных массах.*

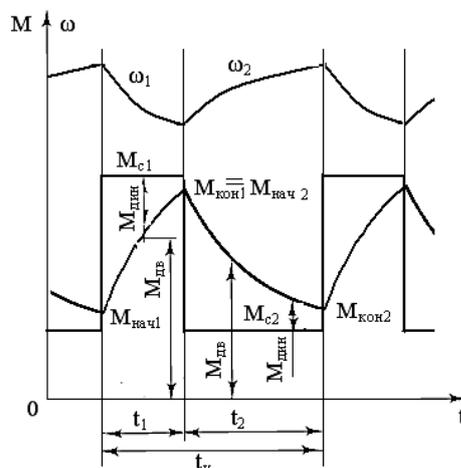


Рис. М.34 Нагрузочные диаграммы рабочей машины и электродвигателя при ударной нагрузке

Применение маховикового электропривода влечет за собою увеличение затрат, массы агрегата, времени и потерь электроэнергии при пуске и торможении. Однако отсутствие маховиков и недостаток инерционных масс в таких приводах, как правило, ведет к увеличению номинальной мощности электродвигателя, значительным колебаниям частоты вращения, может сказаться на режиме работы сети и источника электроэнергии, в результате чего возникают изменения напряжения, отрицательно сказывающиеся на

работе других потребителей. Поэтому определение параметров маховиковых электроприводов должно выполняться в строгом соответствии с технико-экономическими расчетами.

За основу расчетов оптимальных размеров инерционных масс в таком электроприводе принимается график нагрузки рабочего органа и его параметры: M_{c1} , M_{c2} , t_1 и t_2 .

В начале определяется расчетная мощность электродвигателя по условиям нагрева

$$P_{\delta\dot{\alpha}\ddot{n}} = M_{y\dot{e}} \omega_i, \quad (\text{M.34})$$

где $M_{\text{эк}}$ – эквивалентный момент нагрузки;

ω_n – номинальная угловая скорость электродвигателя.

Эквивалентный момент в ($P_{\delta\dot{\alpha}\ddot{n}} = M_{y\dot{e}} \omega_i$)

$$M_{y\dot{e}} = \sqrt{\frac{M_{\bar{n}1}^2 t_1 + M_{\bar{n}2}^2 t_2}{t_1 + t_2}}. \quad (\text{M.34})$$

Здесь M_{c1} и M_{c2} – моменты сопротивления рабочей машины, приведенные к валу двигателя.

По расчетной мощности выбираем номинальную мощность электродвигателя

$$P_i \geq P_{\delta\dot{\alpha}\ddot{n}} \quad (\text{M.34})$$

и необходимые для дальнейших расчетов данные: номинальную мощность, частоту вращения, скольжение, к.п.д., кратности пускового и максимального моментов, момент инерции J .

При расчете приведенного момента инерции агрегата исходными являются параметры электродвигателя и требования технологического процесса – перегрузочная способность двигателя, пределы колебания момента, развиваемого двигателем, броски тока, влияющие на работу других потребителей, допустимые пределы изменения угловой скорости т.п.

Наиболее типичной задачей является расчет момента инерции агрегата, обеспечивающего преодоление электродвигателем пиков нагрузки. Для этого в конце пика нагрузки при $t=t_1$ момент двигателя не должен превышать допустимого значения:

$$M_{\ddot{\alpha}\ddot{i}\ddot{i}} = M_i \lambda, \quad (\text{M.34})$$

где λ – коэффициент допустимой перегрузки двигателя.

С учетом возможных отклонений напряжения коэффициент допустимой перегрузки принимают

$$\lambda = (0,8...0,9)\mu_{\varepsilon} \quad (\text{M.34})$$

Для определения момента инерции, обеспечивающего допустимую перегрузочную способность двигателя, воспользуемся уравнением переходного процесса $M = M_{\bar{n}}(1 - e^{-\frac{t}{B_s}}) + M_{\dot{\alpha}\ddot{i}\ddot{i}} e^{-\frac{t}{B_s}}$ на первом участке графика нагрузки

$$M = M_{\bar{n}1}(1 - e^{-t/B}) + M_{\dot{\alpha}\ddot{i}\ddot{i}1} e^{-t/B}. \quad (\text{M.35})$$

Тогда при $t=t_1$

$$M_{\dot{\alpha}\ddot{i}\ddot{i}1} = M_{\bar{n}1}(1 - e^{-t_1/B}) + M_{\dot{\alpha}\ddot{i}\ddot{i}1} e^{-t_1/B} \quad (\text{M.35})$$

и по условию задачи этот момент должен равняться допустимому т.е.

$$M_{\hat{e}i\dot{i}1} = M_{\hat{a}i\dot{i}}$$

Для выполнения этого условия система должна обладать соответствующей инерционностью, которая в выражении $M_{\hat{e}i\dot{i}1} = M_{\bar{n}1}(1 - e^{-t_1/B}) + M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}1}e^{-t_1/B}$ определяется электромеханической постоянной B' . Решая это выражение относительно B , находим:

$$B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}1}}{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}1}}} \quad (\text{M.35})$$

Здесь кроме B неизвестным является также момент электродвигателя в начале 1-го участка $M_{нач1}$. Поэтому для начала им следует задаться, приняв

$$M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}1} = 1,1 \dots 1,3 M_{\bar{n}2}, \quad (\text{M.36})$$

и из $(B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}1}}{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}1}}})$ определить предварительное значение B . Однако это

значение постоянной не окончательное, поскольку оно найдено при произвольно принятой величине $M_{нач1}$. Далее задача решается методом последовательных приближений.

Следует принять во внимание, что при достаточно продолжительной работе агрегата изменения моментов двигателя происходят в одних и тех же пределах (см. рис. М.36). Поэтому момент, развиваемый двигателем в начале каждого цикла, равен моменту, развиваемому в конце цикла, т.е. $M_{кон1} = M_{нач2}$ и $M_{кон2} = M_{нач1}$.

На этом основании начальный момент $M_{нач1}$ можно найти из уравнения переходного процесса на втором участке графика нагрузки ($M = M_{\bar{n}}(1 - e^{-\frac{t}{B_0}}) + M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}}e^{-\frac{t}{B_0}}$), как

$$M_{\hat{e}i\dot{i}2} = M_{\bar{n}2}(1 - e^{-t_2/B}) + M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}2}e^{-t_2/B}. \quad (\text{M.36})$$

Подставив $M_{кон2}$ в $(B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}1}}{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}1}}})$ вместо $M_{нач1}$, вычисляем новое значение

$$B' = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}2}}{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}1}}}. \quad (\text{M.36})$$

При этой постоянной времени по $(M_{\hat{e}i\dot{i}2} = M_{\bar{n}2}(1 - e^{-t_2/B}) + M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}2}e^{-t_2/B})$ вновь определяется момент двигателя в конце второго участка. Если этот момент отличается от ранее принятого по условию $(M_{\hat{a}\dot{i}\dot{i}1} = 1,1 \dots 1,3 M_{\bar{n}2})$ не более, чем на 10%, расчет можно считать законченным, а найденное по $(B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}2}}{M_{\bar{n}1} - M_{\hat{e}i\dot{i}1}}})$

значение постоянной времени принимается как окончательное. В противном случае необходимо расчетный цикл повторить.

В тех случаях, когда требуется ограничить броски тока, необходимый момент инерции агрегата для двигателей с прямолинейной механической характеристикой, можно рассчитывать по той же методике. Воспользовавшись пропорциональной зависимостью между токами и моментами этих двигателей, входящие в выражение $(B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\bar{n}1} - M_{\bar{e}i1}}{M_{\bar{n}1} - M_{\bar{e}i2}}})$ моменты выражаются че-

рез соответствующие токи и постоянная времени определяется как:

$$B = \frac{t_1}{\ln \frac{I_{\bar{n}1} - I_{\bar{i}\dot{\alpha} \pm 1}}{I_{\bar{n}1} - I_{\bar{a}i\bar{r}}}} \quad (\text{M.36})$$

В ряде случаев технологический процесс может предъявлять довольно жесткие требования к скоростному режиму, при котором должна обеспечиваться определенная степень неравномерности угловой скорости. Выполнение этого требования при заданных параметрах графика нагрузки обеспечивается за счет соответствующих инерционных масс. При решении задачи по расчету этих масс обычно известны средняя скорость ω_{cp} и степень неравномерности угловой скорости δ . По этим данным определяются начальная и конечная угловые скорости на одном из участков графика нагрузки.

Как известно степень неравномерности изменения угловой скорости определяется выражением:

$$\delta = \frac{\omega_{i\dot{\alpha} \pm} - \omega_{\bar{e}i\bar{i}}}{\omega_{\bar{n}\delta}}, \quad (\text{M.36})$$

Где $\omega_{нач}$ и $\omega_{кон}$ — соответственно начальная и конечная угловые скорости на первом участке графика нагрузки (рис. М.34).

Средняя угловая скорость

$$\omega_{\bar{n}\delta} = \frac{\omega_{i\dot{\alpha} \pm} + \omega_{\bar{e}i\bar{i}}}{2} \quad (\text{M.36})$$

Из выражений $(\delta = \frac{\omega_{i\dot{\alpha} \pm} - \omega_{\bar{e}i\bar{i}}}{\omega_{\bar{n}\delta}})$ и $(\omega_{\bar{n}\delta} = \frac{\omega_{i\dot{\alpha} \pm} + \omega_{\bar{e}i\bar{i}}}{2})$ находим

$$\omega_{\bar{e}i\bar{i}} = \omega_{i\dot{\alpha} \pm} - \delta \omega_{\bar{n}\delta} \quad \text{и} \quad \omega_{i\dot{\alpha} \pm} = \omega_{\bar{e}i\bar{i}} + \delta \omega_{\bar{n}\delta} \quad (\text{M.37})$$

Из совместного решения этих выражений, после не сложных преобразований находим начальную и конечную скорости

$$\omega_{i\dot{\alpha} \pm} = \frac{2 + \delta}{2} \omega_{\bar{n}\delta} \quad \text{и} \quad \omega_{\bar{e}i\bar{i}} = \frac{2 - \delta}{2} \omega_{\bar{n}\delta} \quad (\text{M.37}) \text{ и скольжения}$$

$$s_{i\dot{\alpha} \pm} = \frac{\omega_i - \omega_{i\dot{\alpha} \pm}}{\omega_i} \quad \text{и} \quad s_{\bar{e}i\bar{i}} = \frac{\omega_i - \omega_{\bar{e}i\bar{i}}}{\omega_i} \quad (\text{M.37})$$

Пользуясь пропорциональной зависимостью между моментами двигателей с линейными механическими характеристиками и скольжениями, находим соответствующие значения моментов

$$M_{i\dot{a}\ddot{a}} = \frac{M_i}{s_i} s_{i\dot{a}\ddot{a}} \quad \text{и} \quad M_{\dot{e}i\ddot{e}} = \frac{M_i}{s_i} s_{\dot{e}i\ddot{e}} \quad (\text{M.37})$$

Электромеханическая постоянная времени агрегата для этого случая определяется из выражения $(B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\dot{n}1} - M_{\dot{e}i\ddot{e}2}}{M_{\dot{n}1} - M_{\dot{e}i\ddot{e}1}}})$ после подстановки в него зна-

чений $M_{нач}$ и $M_{кон}$.

Определив электромеханическую постоянную времени агрегата, находим его момент инерции $J_{\dot{a}\ddot{a}} = \frac{BM_i}{\omega_i s_i} \quad (\text{M.38})$

Приведенный момент инерции маховика, устанавливаемого дополнительно к имеющимся инерционным массам двигателя и рабочей машины, определится простым вычитанием $J_{i\dot{a}\ddot{a}} = J_{\dot{a}\ddot{a}} - (J_{\dot{a}\ddot{a}} + J_{i\dot{a}\ddot{a}}) \quad (\text{M.38})$

Как видно из **рис. М.36** нагрузочная диаграмма на валу двигателя маховикового привода, благодаря работе инерционных масс, значительно отличается от нагрузочной диаграммы рабочей машины. В этом случае выбранный ранее электродвигатель может оказаться недоиспользованным в тепловом отношении, поэтому его мощность необходимо проверить по нагрузочной диаграмме.

$$M_{\dot{y}\ddot{a}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\ddot{a}}} \left(\int_0^{t_1} M_{\dot{a}1}^2(t) dt + \int_0^{t_2} M_{\dot{a}2}^2(t) dt \right)} \quad (\text{M.38})$$

Здесь $M_{\dot{a}1}(t)$ и $M_{\dot{a}2}(t)$ уравнения момента двигателя соответственно на первом и втором участках нагрузочной диаграммы типа уравнений ($M = M_{\dot{n}1}(1 - e^{-t/B}) + M_{i\dot{a}\ddot{a}1}e^{-t/B}$), в которых значения скоростной (электромеханической) постоянной времени определены по выражению

$$\left(B = \frac{t_1}{\ln \frac{M_{\dot{n}1} - M_{\dot{e}i\ddot{e}2}}{M_{\dot{n}1} - M_{\dot{e}i\ddot{e}1}}} \right) \quad (\text{M.41})$$

По эквивалентному моменту $(M_{\dot{y}\ddot{a}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\ddot{a}}} \left(\int_0^{t_1} M_{\dot{a}1}^2(t) dt + \int_0^{t_2} M_{\dot{a}2}^2(t) dt \right)})$ определяется

новая расчетная мощность двигателя и в случае ее значительного отличия от мощности ранее выбранного двигателя, весь расчет необходимо повторить.