

Глава 5 КОНСТРУКЦИИ РАЗНЫХ ДЕТАЛЕЙ

5.1. МАХОВИКИ

Маховики применяют в качестве аккумуляторов кинетической энергии для выравнивания скорости вращения машин, т. е. для сохранения заданной равномерной скорости движения.

В машинах различают моменты и силы сопротивления реактивные и потенциальные. К **реактивным** относятся моменты и силы, противодействующие вращению электропривода, например, моменты и силы трения, сжатия, растяжения и скручивания упругих тел. К **потенциальным** относятся моменты и силы, вызывающие изменение потенциальной энергии в отдельных элементах системы, например, моменты и силы от веса, от сжатия, растяжения и скручивания упругих тел.

Периодически преобладают то потенциальные силы, то реактивные силы сопротивлений, но за время одного рабочего цикла общая подведенная энергия находится в равновесии с суммарной энергией сопротивлений. В периоды преобладания движущей силы скорость вращения системы возрастает, в периоды преобладания сопротивлений скорость уменьшается. Для того чтобы эти периодические колебания скорости вращения не были слишком большими, применяют маховик, который, аккумулируя кинетическую энергию в периоды преобладания движущей силы, расходует ее в периоды преобладания сопротивлений. Подобным же образом в машинах с *резко колеблющейся нагрузкой*, где необходимы маховики для преодоления пиковых сопротивлений. Маховики требуются также для *регулирования* скорости вращения механизмов, а часто и для облегчения их пуска.

Если в приводе агрегата с неравномерной нагрузкой применяется маховик, то мощность приводного электродвигателя может быть уменьшена.

5.1.1. КОНСТРУКЦИЯ МАХОВИКА

Конструкция маховика (рис. 5.1) зависит от режимов эксплуатации машины, частоты вращения и материала маховика, способа пуска машины и т. д. Наружный диаметр маховика принимают возможно большего диаметра, но с учетом допустимой окружной скорости и допустимых режимов эксплуатации.

Чугунные маховики наиболее распространены. Для работы при окружных скоростях $v = 15 \div 25$ м/с маховики изготавливают методом литья из серого чугуна марок СЧ15 и СЧ18; для работы при окружных скоростях $v = 30 \div 35$ м/с маховики изготавливают из серого чугуна марок СЧ20 и СЧ25. Эта скорость может быть выше (до 45 м/с) для сбалансированных маховиков, изготовленных из более прочного модифицированного чугуна.

Стальные маховики могут быть литыми, сварными или точеными. Стальное литье может применяться при окружных скоростях до 45 м/с; сварные маховики допускают окружную скорость до 60 м/с.

Чугунные маховики диаметром до 300÷350 мм изготавливают с диском (рис.5.1, а). В дисках предусматривают отверстия круглой или треугольной формы для облегчения маховика и транспортировки.

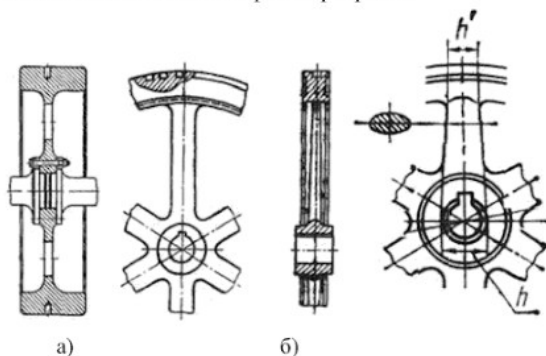


Рис. 5.1. Конструкции маховиков

Маховики диаметром свыше 300 мм и при ширине обода до 300 мм выполняют со спицами в один ряд (рис.5.1, б), а при ширине обода свыше 300 мм – в два ряда. При диаметре маховика до 500 мм ставят четыре спицы, а при диаметре маховика до 1600 мм – 6 спиц.

Маховики со спицами используют при окружной скорости $v < 25$ м/с, если скорость выше, применяют маховики с диском.

У литых маховиков спицы выполняют эллиптического сечения, а у больших – двутавровыми и др. Отношение малой оси сечения спицы к большей $a/h = 0,4 \div 0,5$.

Спицы рассчитывают на изгиб в сечении, прилегающем к ступице, при допускаемом напряжении для чугуна $[\sigma]_{\text{ч}} = 30 \div 45$ МПа; для стали – $[\sigma]_{\text{ст}} = 60 \div 100$ МПа по изгибающему моменту

$$M \approx \frac{M_{\text{max}}}{z},$$

где M – изгибающий момент на валу, Н·мм; M_{max} – максимальный крутящий момент, передаваемый с вала на маховик, z – число спиц.

При условной высоте (большая ось) сечения спицы в условном диаметрально сечении маховика $a/h = 0,4$ рассчитывают размеры спиц лишь у ступицы

$$h = \sqrt[3]{\frac{M}{0,4z}}$$

По направлению к ободу спицы имеют сужение. Размеры спицы по наружному диаметру маховика: $a' = 0,8a$ и $h' = 0,8h$.

У маховиков со спицами обод, а также ступицу, выполняют с ребрами в плоскости расположения спиц для более равномерного охлаждения и уменьшения внутренних напряжений в местах соединения спицы с ободом, а также для увеличения жесткости обода.

Вес маховика можно уменьшить, выбрав возможно больший диаметр его, т. е. допуская как можно большую окружную скорость, м/с,

$$v = \frac{\pi n}{1000 \cdot 60} D_{cp},$$

где n – частота вращения маховика, мин^{-1} ; D_{cp} – диаметр средней окружности его обода, мм, так как кинетическая энергия маховика пропорциональна квадрату этой скорости.

Однако окружная скорость, а отсюда и диаметр маховика ограничиваются прочностью применяемого для него материала.

Напряжение в ободе маховика, обусловленное центробежными силами, приближенно определяется как напряжение во вращающемся кольце малой радиальной толщины без спиц. При вращении кольца в поперечном сечении возникает нормальная растягивающая сила

$$N = \frac{\gamma \omega^2 F R^2}{g},$$

Напряжение в поперечном сечении

$$\sigma = \frac{N}{F} = 9,8 \frac{\gamma \omega^2 R^2}{g} = 9,8 \frac{\gamma v^2}{g}, \text{ Н/см}^2,$$

где γ – удельный вес материала, Н/см^3 ; для серого чугуна $\gamma = 7,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/см}^3$; ω – угловая скорость, с^{-1} ; R – радиус от средней окружности его обода до оси вращения; N – нормальная растягивающая сила; F – площадь поперечного сечения; v – окружная скорость, м/с; g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

В действительности к этому напряжению добавляется еще напряжение изгиба в местах присоединения спиц. С учетом этих дополнительных напряжений, а также внутренних напряжений в отливке напряжение $[\sigma]_n$ следует выбирать ближе к нижнему пределу.

Размеры маховика определяют, исходя из величины накапливаемой кинетической энергии

$$E = 5J_m \left(\frac{\pi n}{30} \right)^2 = 5J_m \omega^2, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где J_m – момент инерции маховика [$\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{сек}^2$]; ω – угловая скорость, с^{-1} .

Иногда вместо момента инерции J_m пользуются *маховым моментом*

$$GD^2 = 4J_m g,$$

где G – вес маховика, Н ; D – диаметр средней окружности обода, м ; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести.

Отсюда момент инерции маховика со спицами

$$J_m = \frac{GD^2}{4g}, \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2.$$

Момент инерции маховика с диском вместо спиц вычисляется путем разбивки маховика на простые тела вращения, например 1, 2, 3 (рис.5.2), и вычисления моментов инерции этих отдельных частей.

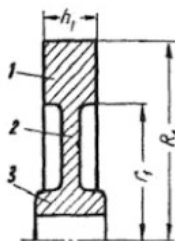


Рис. 5.2. Схема для определения момента инерции маховика

Например, для части 1 веса G , H момент инерции

$$J_1 = \frac{G}{g} \cdot \frac{R_1^2 + r_1^2}{2} = \frac{\gamma}{g} \cdot \frac{\pi}{2} R_1^4 h_1 \left[1 - \left(\frac{r_1}{R_1} \right)^4 \right], \text{ Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с}^2$$

Сумма моментов инерции отдельных частей дает момент инерции J_M всего маховика.

Маховик со спицами имеет момент инерции, превышающий примерно на 10% момент инерции обода этого маховика.

Если машина работает с периодически изменяющейся движущей силой или периодически изменяющимся сопротивлением, то необходимый момент инерции маховика определяется по уравнению

$$J_M = \frac{L_{\max}}{k\omega^2} = 90 \frac{L_{\max}}{kn^2},$$

где $L_{\max}$ – максимальная избыточная работа движущей силы или силы сопротивления машины; k – требуемая степень равномерности хода:

$$k = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{9,8\omega} = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{9,8n},$$

где $n_{\max}$ – частота, мин^{-1} , соответствующая максимальной угловой скорости $\omega_{\max}$; $n_{\min}$ – частота, мин^{-1} , соответствующая минимальной угловой скорости $\omega_{\min}$ машины в течение одного рабочего цикла; $n = 0,5(n_{\max} + n_{\min})$ – средняя частота, мин^{-1} .

Маховик соединяют с валом, как правило, посредством шпонок.

Длина ступицы $l \geq 1,2d$, где d – диаметр вала.

Чем меньше длина ступицы, тем тщательнее должна производиться обработка и крепление маховика, для того чтобы исключить его биение. Длинные ступицы выполняются с выемкой посередине.

Малые маховики часто закрепляют на коническом конце вала гайкой, фиксируя его положение шпонкой.

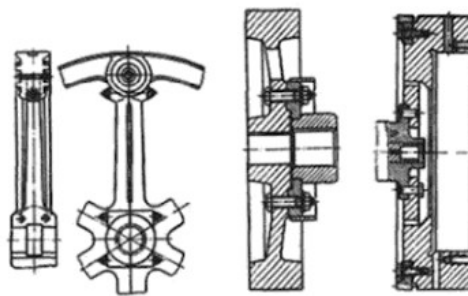


Рис. 5.3. Крепление маховика к деталям

Ступицу дискового маховика чаще всего крепят болтами к фланцу детали, закрепленной на валу (рис.5.3). Чтобы болты не работали на срез, ставят еще фиксирующие (установочные) штифты.

Необходимая площадь сечения стержня болта F и число болтов n рассчитываются из условия, чтобы фланцевое соединение передавало максимальный крутящий момент $M_{\max}$ маховику только за счет силы трения между торцами ступицы маховика и фланца. Для этого должно быть

$$nF \geq \frac{M_{\max}}{Rf\sigma_p},$$

где R – радиус окружности, на которой расположены болты; $f \approx 0,1$ – коэффициент трения между ступицей и фланцем; σ_p – расчетное напряжение растяжения в поперечном сечении нарезной части болта.

Маховики, работающие с окружной скоростью $5 \leq v \leq 35$ м/с, в сборе с вращающимися деталями на валу, проверяют на наличие дисбаланса при статической балансировке. Величина допускаемого дисбаланса приведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Величина допускаемого дисбаланса						
Окружная скорость v , м/с	5÷10	10÷15	15÷20	20÷25	25÷30	40
Дисбаланс, г·см, не более	6	4	2	1,6	1,0	0,5

Маховики быстроходных передач, при скорости $v \geq 35$ м/с, необходимо подвергать еще динамической балансировке.

У маховиков быстроходных передач для лучшей балансировки обрабатывают боковые поверхности шлифованием. В подобных случаях внутреннюю поверхность обода и наружную поверхность ступицы выполняют цилиндрической.

Определение GD^2 маховика в электроприводе с пиковой нагрузкой. Обычно маховик применяется для уменьшения мощности электродвигателя. Без маховика мощность двигателя определяется максимальным моментом нагрузки M_m и кратностью максимального перегрузочного момента двигателя

$$\lambda_m = \frac{M_m}{M_n},$$

Номинальный момент электродвигателя в этом случае

$$M_n = \frac{M_m}{0,9\lambda_m} = \frac{M_m}{\lambda'_m},$$

где 0,9 – условно принятый коэффициент запаса.

При наличии маховика мощность электродвигателя может быть уменьшена и обычно определяется нагревом.

5.1.2. РАСЧЕТ МАХОВИКА

По графику переменной нагрузки, которой будет нагружен электродвигатель, определяют средний момент

$$M_{см} = \frac{\sum_0^{t_n} M_m}{t_n}.$$

Выбирают предварительно номинальный момент двигателя

$$M_n = (1,2 \div 1,3) M_{см}.$$

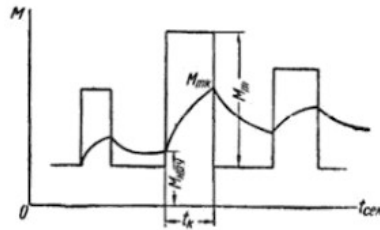


Рис 5.4. Механическая характеристика электродвигателя при пиковой нагрузке

Исходя из выражения момента двигателя M в конце наибольшего пика нагрузки M_{mk} длительностью t_k в с и зная момент, развиваемый двигателем в начале нагрузочного графика $M_{нач}$ в Н·м, находим маховой момент маховика GD^2 , Н·м² (рис.5.4).

$$GD^2 = \frac{t_k M_n \cdot 375}{n_0 S_n \ln \frac{M_{mk} - M_{нач}}{M_{mk} - M_n \lambda'_m}},$$

где n_0 – синхронная частота асинхронного двигателя без нагрузки, мин⁻¹; S_n – скольжение при номинальном моменте на рабочей характеристике; M_n – номинальный момент электродвигателя, соответствующий n_n номинальной частоте вращения двигателя, мин⁻¹, и скольжению $S_n = \frac{n_0 - n_n}{n_0}$; M_{mk} – пиковая нагрузка, соответствующая частоте в мин n_c , скольжению

$S_c = \frac{n_0 - n_c}{n_0}$ и току I_m в а; $\lambda'_m = 0,9\lambda_m$ – условно принятый коэффициент запаса.