

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК МАХОВИЧНЫХ НАКОПИТЕЛЕЙ

Бакирова С.Я., Маркина О.А.

Для электропитания автономных подвижных объектов используются различные накопители энергии. С точки зрения экологии наиболее перспективным является маховичный накопитель энергии (МНЭ). Вопросы оптимального согласования МНЭ и потребителей энергии подвижного объекта представляются весьма актуальными.

Рассмотрим области применения, в которых маховик служит только для поддержания постоянной угловой скорости какого-либо устройства, и области, где он используется в качестве накопителя энергии, хотя граница между ними не всегда четко выражена.

Считается, что ротор маховичного накопителя энергии должен делать, по крайней мере, десять оборотов на протяжении цикла подвода или съема энергии. Следуя этому определению, маховик двигателя внутреннего сгорания, который «подзаряжается» один раз за два оборота в случае одноцилиндрового четырехтактного и один раз каждую $2/N$ -ю часть оборота у N -цилиндрового двигателя, нельзя считать «аккумулятором энергии», тогда как колесо прялки — можно.

Все современные накопители энергии состоят из собственно маховика, корпуса (который обеспечивает определенный уровень разрежения и защиту от осколков в случае разрушения маховика), систем подвески и уплотнения и, как правило, систем вакуумирования и управления.

Обычно качество накопителя энергии оценивают величиной *массовой энергоемкости*, т. е. отношением запасаемой энергии к массе. Очевидно, что здесь следует принимать во внимание массу системы в целом, а запасаемой считать энергию, которую система отдает в обычном эксплуатационном режиме.

При проектировании и исследовании маховиков, а также оценке маховичных систем целесообразно применять показатели лишь для сопоставления разных по конструкции маховиков.

При проектировании и исследовании маховиков массовую энергоемкость системы зачастую неверно характеризуют отношением энергии, запасаемой на режиме предельно возможной угловой скорости, к массе одного лишь маховика. Это отношение можно довольно просто рассчитать или определить экспериментально по результатам разгонных испытаний маховиков. Однако в практике разработки и оценки маховичных систем его целесообразно применять лишь для сопоставления разных по конструкции маховиков.

Можно показать, что массовая энергоёмкость ротора при предельной угловой скорости зависит только от конструкции маховика и характеристик материала и определяется хорошо известной формулой:

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{u.f.} = K \frac{\sigma_u}{\rho}, \quad (1)$$

где σ_u — ρ — удельный вес материала ротора, K — коэффициент формы маховика.

Так называемый коэффициент формы K зависит, по крайней мере при определенных условиях, только от формы маховика и используемого критерия предельного состояния.

Для однородного маховика, изготовленного из изотропного материала, установление предела прочности не вызывает затруднений. Если материал не изотропен, то зависимость σ_u от направления следует учитывать соответствующим критерием предельного состояния. Если ротор изготовлен из разных материалов, то величины σ_u и ρ определяют как обычно, а неоднородность ротора учитывают коэффициентом формы.

Принимая во внимание ограниченную применимость введенного выше понятия массовой энергоёмкости, целесообразно определить также общую массовую энергоёмкость в виде:

$$\left(\frac{e}{m}\right)_{a,a.} = a' a'' a''' K \left(\frac{e}{m}\right)_{u.f.} = a' a'' a''' K \frac{\sigma_u}{\rho}, \quad (2)$$

где величины a' , a'' , a''' , меньшие единицы, определяются следующим образом:

1) a' — коэффициент запаса, представляющий собой отношение энергии, запасаемой при эксплуатационной угловой скорости, к энергии, соответствующей предельному состоянию вращающегося маховика. Поскольку массовая энергоёмкость пропорциональна предельному напряжению в материале маховика, очевидно, что a' есть отношение максимального напряжения, действующего в маховике при эксплуатационной угловой скорости, к пределу прочности материала маховика.

2) a'' — коэффициент разрядки, т. е. отношение отдаваемой энергии к запасаемой. Кинетическая энергия тела, вращающегося с угловой скоростью ω относительно одной из осей инерции, определяется выражением

$$e = \frac{1}{2} J \omega^2. \quad (3)$$

Энергия, отдаваемая маховиком в диапазоне угловых скоростей от максимальной ω_{\max} до минимальной ω_{\min} , равна:

$$e = \frac{1}{2} J_f (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) = \frac{1}{2} J_e \omega_{\max}^2 \left(1 - \frac{\omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2}\right). \quad (3a)$$

Отсюда следует выражение для a'' :

$$\alpha'' = 1 - \frac{\omega_{\min}^2}{\omega_{\max}^2} \quad (4)$$

Величина α'' определяется в основном типом примененной передачи. В большинстве случаев не имеет смысла снижать ω_{\min} ниже некоторого определенного уровня, так как преимущества от использования очень малых угловых скоростей незначительны, а возникающие при этом технические трудности часто весьма существенны. Обычно ω_{\min} выбирают равной половине ω_{\max} , так что используется три четверти запасаемой маховиком энергии.

3) α''' — *относительная масса маховика*, равна отношению массы маховика к массе всего устройства для накопления энергии. Маховики часто классифицируют по их массовой энергоемкости. Хотя единого соглашения об уровнях, соответствующих низкой, средней и высокой энергоемкости, нет, все же можно дать им следующие оценки:

а) низкая массовая энергоемкость — менее 10 Вт·ч/кг (36 кДж/кг);

б) средняя массовая энергоемкость — от 10 до 25 Вт·ч/кг (36—90 кДж/кг);

в) высокая массовая энергоемкость — выше 25 Вт·ч/кг (90 кДж/кг). Поскольку эти оценки обычно относят только к маховику, они определяют, по существу, максимальное эксплуатационное значение массовой энергоемкости маховика, т. е. величину $\alpha K \sigma_H / \rho$ в соответствии с выражением (2).

Объемную энергоемкость можно определить аналогично массовой как отношение запасаемой энергии к объему накопителя. Если учитывать только объем маховика, то его объемную энергоемкость при достижении предельной угловой скорости можно рассчитать по формуле:

$$\left(\frac{e}{V}\right)_{n,f} = K \sigma_H \quad (5)$$

Уравнение (5) в таком виде справедливо для однородных роторов. Если маховик изготовлен из разных материалов, то коэффициент формы K должен соответствовать средней плотности. Чтобы сравнить накопители кинетической энергии с другими аккумуляторами энергии, можно рассчитать общую эксплуатационную объемную энергоемкость по выражению:

$$\left(\frac{e}{V}\right)_{a,\alpha} = \alpha' \cdot \alpha'' \cdot \alpha''' \cdot K \sigma_H \quad (6)$$

Коэффициент α''' представляет собой отношение объема маховика к объему всего устройства для накопления энергии. «Объемом маховика» считают объем, занимаемый материалом маховика, а не объем, необходимый для размещения маховика с учетом его вращения.