

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЧИСЕЛ ОБОРОТОВ ВАЛОВ МАШИН

Большое значение для современного машиностроения имеет проблема определения критических чисел оборотов валов машин. Обеспечение надежности работы машин заключается в качественном превентивном проведении инженерных расчетов прогибов валов и их рабочих частот. В данной статье подробно рассмотрены вопросы равновесия и потери устойчивости вращающихся валов с одним диском. Основное внимание уделено эмпирическим зависимостям для определения критических скоростей и частот, влиянию эксцентриситета и учету упругости и жесткости опор.

Ключевые слова: валы, критическая скорость, критическая частота, центробежная сила, сила упругости, прогиб, эксцентриситет, самоуправление вала, опоры.

Классической расчетной схемой при определении критического числа оборотов валов является вал на двух опорах с диском посередине, вращающийся с угловой скоростью ω .

Для определения устойчивости вращения вала предположим, что ось вала изогнута, стрелка прогиба равна y и центр тяжести диска движется по окружности. На вращающийся диск действуют две силы — сила упругости и центробежная сила²

$$F_{упр} = \frac{y}{s} \quad (1)$$

где s — прогиб среднего сечения вала от действия единичной силы.

$$\Phi = \omega^2 t y \quad (2)$$

где t — масса диска.

¹ © Елена Филипповна Чубенко, канд. техн. наук, доцент кафедры Сервиса и технической эксплуатации автомобилей Института информатики, инноваций и бизнес-систем Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, Приморский край, 690014, Россия, E-mail: elena.chubenko@vvsu.ru.

² Кузьмин А.В. Расчеты деталей машин. М., 2002. с. 326.

V. ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗНАНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

Из условия самоуправления вала следует, что если $\Phi < F_{упр}$, то вал вернется в исходное положение, следовательно, прямолинейное положение его оси устойчиво.¹

При критическом моменте равновесия $\Phi = F_{упр}$ наступает потеря устойчивости, при которой $y \rightarrow \infty$. При этом условия силы упругости стремятся вернуть вал в исходное положение. Обороты вала, при которых наступает равенство центробежных сил и сил упругости являются критическими и равны²

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{1}{sm}} \quad (3)$$

Критическая частота вращения вала соответственно составит:

$$n_{кр} = \frac{30\omega_{кр}}{\pi} \quad (4)$$

В соответствии с линейной теорией, как сила упругости, так и центробежная сила пропорциональны прогибам при любой их величине.

Совершенно очевидно, что при критическом числе оборотов существенно снижена жесткость вала при действии изгиба.

Из формулы (3) следует, что критическая угловая скорость равна круговой частоте изгибных колебаний вала.

При реальных условиях изготовления дисков и маховиков трудно избежать эксцентриситета, когда центр тяжести вращающегося тела имеет геометрическое смещение относительно своей номинальной оси и, следовательно, от оси вала.

Известной технологической операцией, уменьшающей эксцентриситет, является балансировка, которая в свою очередь имеет весьма ограниченную точность. Немаловажным является и тот факт, что в рабочих условиях дисбаланс увеличивается вследствие нагрева и остаточных деформаций.

Следовательно, неуравновешенная сила, приложенная к валу при наличии даже незначительного эксцентриситета, приводит к появлению значительных прогибов уже при небольших угловых скоростях. Для случая наличия эксцентриситета e и соответствующего ему дисбаланса G_e центробежная сила инерции может быть определена по выражению:

$$\Phi = \omega^2 m(y + e) \quad (5)$$

¹ Леликов О.П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин. М., Машиностроение. 2007. с. 402.

² Остяков Ю.А. Проектирование конкурентоспособных машин. М., ВШ, 2005. с. 315.

С учетом условия равновесия вращающегося вала получим выражение критического прогиба:

$$y = \frac{e}{\frac{\omega_{кр}^2}{\omega^2} - 1} \quad (6)$$

При работе машины в закритической области при $\omega > \omega_{кр}$ величина прогиба $y < 0$, т.е. направления прогиба и эксцентриситета противоположны, следовательно, центр тяжести диска расположен ближе к оси вращения вала. В экстремальном случае, когда угловые скорости вращения достигают очень больших величин ($\omega \rightarrow \infty$), центр тяжести диска лежит на оси вращения вала и $y = -e$, наблюдается самоуправление вала в закритической области.

При совпадении угловой скорости вращения вала с критической угловой скоростью ($\omega = \omega_{кр}$) прогиб неограниченно возрастает ($y \rightarrow \infty$) в соответствии с выражением (6). На практике неограниченного увеличения прогибов не происходит вследствие изменения линейной зависимости между силой и перемещением, а также из-за чисто технических ограничений — трения и защемления валов в подшипниках. Поэтому диапазон оборотов от $0.7n_{кр}$ до $1.3n_{кр}$ не рекомендован к использованию для рабочих режимов валов машин.

Возможно создать технические условия для работы вала с одним маховиком при $\omega \geq \omega_{кр}$, что потребует применения специальных устройств для прохождения через критические обороты и успокоения вибрации в закритической области, например, демпфирующих опор.

В инженерных расчетах в зависимости от жесткости вала опоры можно рассматривать как жесткие или как податливые. В технике известны конструкции, в которых жесткий вал опирается на податливые опоры. Критическое число оборотов такого вала лежит в рабочем диапазоне ($\omega_{кр} < \omega$), что не оказывает практического влияния на работу машины.

Для определения критических оборотов рассмотрим равновесие системы при изогнутой оси вала, опирающегося на податливые опоры. Центробежная сила определяется по формулам:

$$\Phi = \omega_{кр}^2 m y \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{1}{\alpha} (y - y_0) \quad (8)$$

где α — коэффициент податливости вала; y_0 — прогиб центра опоры.

Прогиб опоры равен:

$$y_0 = \alpha_0 R \quad (9)$$

где α_0 — коэффициент податливости опоры; R — реакция опоры.

Учитывая (9), из формулы (8) следует:

$$\Phi = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_0}{\alpha}} \cdot \frac{1}{\alpha} y \quad (10)$$

Приравнивая выражения (7) и (10), находим критическую скорость вала:

$$\omega_{кр} = \frac{1}{\sqrt{\alpha m}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_0}{\alpha}}} = \omega_{крж} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\alpha_0}{\alpha}}} \quad (11)$$

Критическая угловая скорость вала на жестких опорах определяется по выражению

$$\omega_{крж} = \frac{1}{\sqrt{\alpha m}} \quad (12)$$

Если критическое число оборотов вала на жестких опорах превышает максимальное ($\omega_{крж} > \omega$), то прогибы вала можно не учитывать, т.к. это не нарушает нормальную работу машины.

-
1. Кузьмин А.В. Расчеты деталей машин. М., 2002. с. 326.
 2. Леликов О.П. Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин. М., Машиностроение. 2007. с. 402.
 3. Остяков Ю. А. Проектирование конкурентоспособных машин. М., ВШ, 2005. с. 315.