

2. Акимова Т.Е. Информационная поддержка жизненного цикла бортовых информационно-управляющих систем авиационного применения // Вестник СГАУ. – 2012. – № 5 (36). – С. 288–291.
3. СТП 154-171-2008. Стандарт предприятия. Система менеджмента качества. Управление проектированием. Организация и технология электрического проектирования КА и его составных частей. 2008 г. – 38 с.
4. СТП 154-172-2012. Стандарт предприятия. Система менеджмента качества. Управление проектированием. Проектирование и разработка конструкции космического аппарата, его составных частей и контрольно-измерительной аппаратуры. – 2008 г. – 38 с.
5. Интегрированная система проектирования и испытаний единой трехмерной сети электрических интерфейсов космических аппаратов, ИС БКС. Описание системы 643.59502470.00008-01 13 01. – Санкт-Петербург, 2012. – 20 с.

**РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАХОВИКА
ПАРАМЕТРИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ T-FLEX**

Индыгашева Н.С.¹

Научный руководитель: Костюченко Т.Г., доцент, к.т.н.

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30
E-mail: inelyas0810@mail.ru

**CALCULATION OF THE MAIN CHARACTERISTICS OF THE FLYWHEEL
BY THE PARAMETRIC MEANS OF T-FLEX**

Indygasheva N.S.¹

Scientific Supervisor: Associate Prof., PhD, Kostyuchenko T.G.

¹Tomsk Polytechnic University
Russia, Tomsk, Lenin ave., 30, 634050
E-mail: inelyas0810@mail.ru

В статье представлен расчет основных характеристик маховика, таких как критическая скорость вращения маховика и момент сопротивления. Была создана 3D-модель маховика, включающая параметрический расчет характеристик маховика. При изменении наружного радиуса маховика происходит перерасчет момента сопротивления.

The article provides calculation of the main flywheel characteristics, such as the critical flywheel speed and the moment of resistance. A 3D flywheel model was created, including a parametric recalculation of its characteristics. The reduction of the outer radius of the flywheel takes place the recalculation of the moment of resistance.

Маховик является важной деталью гироскопа. Вся конструкция гироскопа зависит от габаритных размеров маховика. Поэтому важно точно рассчитать характеристики маховика. Важнейшими характеристиками маховика являются критическая угловая скорость и момент сопротивления. Расчеты характеристик проводились автоматически в Редакторе переменных системы T-Flex CAD.

Критическая скорость определяется выражением:

$$\Omega_k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{2}(\alpha \cdot m - \beta \cdot J) + \sqrt{\frac{1}{4}(\alpha \cdot m - \beta \cdot J) + m \cdot J(\alpha \cdot \beta - \gamma^2)}}}$$

где α, β, γ – коэффициенты влияния; m – масса маховика; J – момент инерции маховика.

Коэффициенты влияния зависят от способа установки маховика. В нашем случае маховик установлен консольно (рис. 1), тогда α, β и γ будут определяться выражениями

$$\alpha = \frac{a \cdot b^2}{3 \cdot E \cdot J_1} + \frac{b^3}{3 \cdot E \cdot J_2},$$

$$\beta = \frac{a}{3 \cdot E \cdot J_1} + \frac{b}{E \cdot J_2},$$

$$\gamma = \frac{a \cdot b}{3 \cdot E \cdot J_1} + \frac{b}{3 \cdot E \cdot J_2},$$

где a – расстояние между опорами; b – длина консоли; E – модуль упругости I рода; J_1 – момент инерции сечения вала между опорами; J_2 – момент инерции сечения вала консоли.

$$J_1 = J_2 = 0,05(d_n^4 - d_d^4)$$

где d_n, d_d – наружный и внутренний диаметр вала соответственно [1].

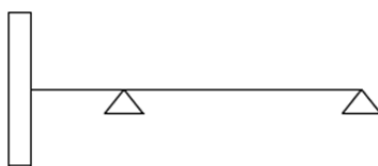


Рис. 1. Консольная установка маховика

На рис. 2 приведен расчет критической угловой скорости вращения маховика в Редакторе переменных.

Группа: Расчет критической угловой скорости вращения маховика				
A	$((a^2)/(3 \cdot E \cdot J_1)) + (b^3)/(3 \cdot E \cdot J_2)$	0		Альфа
B	$(a)/(3 \cdot E \cdot J_1) + (b)/(E \cdot J_2)$	0		Бета
C	$(a \cdot b)/(3 \cdot E \cdot J_1) + (b)/(3 \cdot E \cdot J_2)$	0		Гамма
E	$2 \cdot 10^{11}$	200000000000		Модуль упругости 1 рода для Стали
J1	$0.05 \cdot (d_n^4 - d_d^4)$	5248.8		Момент инерции сечения вала между опорами
J2	$0.05 \cdot (d_n^4 - d_d^4)$	5248.8		Момент инерции сечения вала консоли
S1	$(1/4) \cdot (A \cdot m \cdot B \cdot J) \cdot \pi \cdot J \cdot (A \cdot B \cdot C^2)$	0		
S2	$\text{sqrt}(S1)$	0		
S3	$(1/2) \cdot (A \cdot m \cdot B \cdot J)$	0		
S4	$1/\text{sqrt}(S3 + S2)$	1175.52		Критическая угловая скорость, с ⁻¹
? V	$S4 \cdot 9.55$	11226.217		Критическая угловая скорость, об/мин
a	33.5	33.5		Расстояние между опорами, мм
b	10.5	10.5		Длина консоли, мм
dd	0	0		Внутренний диаметр вала, мм
dn	18	18		Наружный диаметр вала, мм

Рис. 2. Расчет критической угловой скорости вращения маховика

Критическая угловая скорость вращения маховика составила 11226,2 об/мин, что больше рабочей скорости вращения маховика, равной 10000 об/мин.

Момент сопротивления M_c влияет на количество потребляемой энергии, величину возмущающего воздействия и на динамику управляемого объекта. Величина M_c зависит от скорости и содержит две составляющие:

$$M_c = M_a + M_n,$$

где M_a – момент аэродинамического сопротивления; M_n – момент трения шарикоподшипников

На момент аэродинамического сопротивления большое влияние имеет тип газовой среды, характер течения газа у поверхности маховика, геометрическая форма и размер маховика, степень разрежения среды в гермокамере, чистота поверхности маховика и его угловая скорость вращения [1].

Момент аэродинамического сопротивления определяется по формуле:

$$M_a = 2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot C_a \cdot \Omega^2 \cdot \Gamma_\phi,$$

где ρ – плотность окружающей среды; C_a – аэродинамический коэффициент; Γ_ϕ – геометрический фактор, значение которого зависит от геометрической формы и размеров маховика.

Геометрический фактор зависит от геометрической формы и размеров маховика. Существует несколько различных форма маховика и для каждой существует своя формула для расчета геометрического фактора.

В нашем случае маховик имеет форму, представленную на рис. 3.

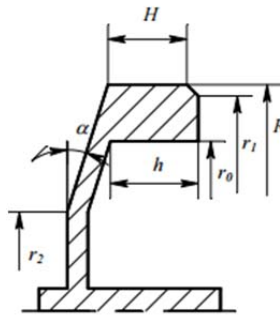


Рис. 3. Форма маховика

Ниже приведена формула для расчета геометрического фактора для спроектированного маховика.

$$\Gamma_\phi = R^4 \cdot H + r_0^4 \cdot h + \frac{1}{\cos \alpha} \cdot \frac{2 \cdot R^5 + r_0^5 - 2 \cdot r_2^5}{5} + \frac{2 \cdot r_2^5 + r_1^5 - r_0^5}{5}$$

Момент трения шарикоподшипника состоит из следующих составляющих: момента трения качения шариков с наружным и внутренними кольцами; момента трения скольжения шариков с кольцами; момента трения скольжения шариков с сепаратором и сепаратора с центрирующим кольцом; момента, вызываемого сопротивлением движению смазки.

Момент трения шарикоподшипника приближенно определяется эмпирической зависимостью:

$$M_n = M_0 + 1,25 \cdot k_{mp} \cdot \left(\frac{D_0}{d_{ш}} \right) \cdot F_r,$$

где M_0 – момент трения ненагруженного шарикоподшипника; D_0 – диаметр окружности, проходящей через центры шариков; $d_{ш}$ – диаметр шариков; $k_{mp} = 0,001 \div 0,005$ см – коэффициент трения качения; F_r – радиальная нагрузка [1].

Параметрические возможности T-Flex CAD позволяют включать в 3D-модель или чертеж расчет характеристик проектируемой конструкции, зависящих от ее геометрических размеров. Это очень эффективно при проектировании маховика, т. к. с изменением наружного радиуса перестраивается 3D-модель и одновременно в Редакторе переменных пересчитывается значение момента сопротивления маховика, зависящей от его наружного радиуса. На рис. 4 представлен расчет момента сопротивления в Редакторе переменных для двух маховиков с разными значениями наружного радиуса.