

*Инженерия для освоения космоса*

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.<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Национальный 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.<sup>1</sup>

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

<sup>1</sup>Tomsk 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  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – 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  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  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].

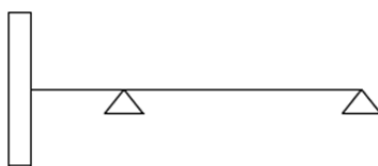


Рис. 1. Консольная установка маховика

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

Группа: Расчет критической угловой скорости вращения маховика			
A	$((a^2 \cdot b^2) / (3 \cdot E \cdot J_1)) + (b^3) / (3 \cdot E \cdot J_2)$	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	$(1/4) \cdot (A \cdot m \cdot B \cdot J) + m \cdot J \cdot (A \cdot B \cdot C^2)$	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 <sup>-1</sup>
? 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  $\rho$  – плотность окружающей среды;  $C_a$  – аэродинамический коэффициент;  $\Gamma_\phi$  – 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.

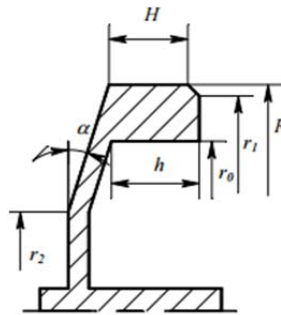


Рис. 3. Форма маховика

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.