

УДК 629.782.03.05

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА  
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ  
ОРГАНОВ СИСТЕМ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ  
АППАРАТОВ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Т.Г. Костюченко

Томский политехнический университет

E-mail: ktg@tpu.ru

**Костюченко Тамара Георгиевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.  
E-mail: ktg@tpu.ru

Область научных интересов: проектирование и расчет электромеханических устройств; прочностной анализ сложных электромеханических конструкций.

В статье описан способ оптимизации комплекса эксплуатационных характеристик двигателей-маховиков исполнительных органов систем ориентации космических аппаратов на основе анализа математической модели электродвигателя-маховика. Это сложная проектная задача, не имеющая однозначного решения. Математическая модель позволяет оценить взаимное влияние его характеристик и установить связи между ними, которые напрямую

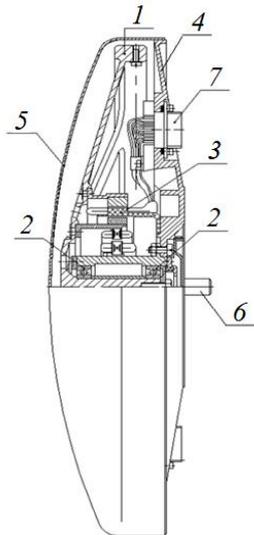
не определяются. Наиболее эффективным методом оптимизации всего комплекса характеристик является варьирование параметров конструкции через параметризацию с использованием специализированного программного обеспечения, реализующего геометрическую параметризацию и возможность эффективного расчета требуемых характеристик. Создается параметрическая 3D-модель, включающая в себя расчет эксплуатационных характеристик. Варьированием параметров 3D-модели возможно получить оптимальный комплекс эксплуатационных параметров. Это весьма актуально на этапе проектирования, поскольку позволяет существенно повысить качество проектируемого устройства и сократить общее время проектирования.

**Ключевые слова:**

Двигатель-маховик, оптимизация, комплекс эксплуатационных характеристик, математическая модель, 3D-модель.

Одним из способов построения системы ориентации космического аппарата является способ, основанный на использовании исполнительных органов на базе управляемых по моменту электродвигателей-маховиков. Электродвигатель-маховик генерирует управляющие моменты относительно центра масс космического аппарата путем изменения количества движения маховика [1]. Электродвигатель-маховик выступает здесь как важнейший элемент системы ориентации космического аппарата.

На рис. 1 приведен один из вариантов построения электродвигателя-маховика. Он состоит из массивного ротора с явно выраженным ободом 1, установленного в опорах 2 и приводимого во вращение электродвигателем 3, ротор которого закреплен на маховике, а статор – на основании 4. У прибора имеется защитный кожух 5 [2].



**Рис. 1.** Конструкция электродвигателя-маховика

Электродвигатель-маховик – сложное техническое устройство, имеющее целый комплекс важнейших взаимосвязанных эксплуатационных характеристик, причем эта связь как прямая, так и обратная.

Математическая модель электродвигателя-маховика, показывающая взаимосвязь его эксплуатационных характеристик, представлена ниже в виде системы уравнений:

$$H = \frac{1}{32} \pi \eta \Omega D_m^4 (1 + k^4) - \text{кинетический момент};$$

$$m = \frac{\eta h (R^2 - r^2)}{2} - \text{масса маховика};$$

$$N = \frac{1}{\Omega} \left( \frac{C}{Q_p} \right)^{3,3} - \text{ресурс};$$

$$P = 1,028 M_c \Omega^{10^5} \eta - \text{потребляемая мощность};$$

$$M_c = (M_y + M_{\text{шп}} + M_a) - \text{момент сопротивления};$$

$$M_{\text{упр}} = \frac{dH}{dt} = J\Omega - \text{управляющий момент маховика};$$

$$T_{\text{разг}} = 4T_m - \text{время разгона};$$

$$M_{\text{шп}} = 1,14 K_k \left( 1 + \frac{D_b}{d_{\text{ш}}} Q_p \right) - \text{момент трения шарикоподшипников};$$

$$M_a = 2\pi \rho C_{\text{л(т)}} \Omega^2 \Gamma_{\phi} - \text{момент аэродинамического сопротивления};$$

$C_{\text{л}} = 0,53 R_e^{-0,5}$ ,  $C_{\text{т}} = 0,0287 R_e^{-0,2}$  – аэродинамические коэффициенты для ламинарного и турбулентного течения;

$$\omega_{\text{кр}} = \frac{1}{\sqrt{0,5(m\alpha - J_z \beta) + \sqrt{0,25(m\alpha - J_z \beta)^2 + m J_z (\alpha \beta - \xi^2)}}} - \text{критическая угловая ско-}$$

рость вращения двигателя-маховика, где

$$\alpha = \frac{ab^2}{3EI_1} + \frac{b^3}{3EI_2}, \quad \beta = \frac{a}{3EI_1} + \frac{b}{EI_2}, \quad \xi = \frac{ab}{3EI_1} + \frac{b^2}{2EI_2};$$

$$g = \frac{[Gl - (J_z + J_x)\Omega^2][J_z - J_y]\varepsilon\Omega^2}{(Gl - J_y\Omega^2)(Gl - J_x\Omega^2) - (J_z\Omega^2)^2} \sin \Omega t,$$

$$\psi = -\frac{[Gl - (J_z + J_y)\Omega^2][J_z - J_x]\varepsilon\Omega^2}{(Gl - J_y\Omega^2)(Gl - J_x\Omega^2) - (J_z\Omega^2)^2} \cos \Omega t - \text{вынужденные колебания, возникающие по}$$

двум ортогональным осям двигателя-маховика;

$$\omega_p = \pm \sqrt{\frac{Gl(J_x + J_y) \pm \left[ Gl(J_x + J_y) - \frac{GlJ_xJ_y}{J_x + J_y} (1 - \mu^2) \right]}{2J_xJ_y(1 - \mu^2)}} - \text{резонансная угловая скорость маховика};$$

$f_c = 0,5 \left[ 1 - \left( \frac{2d_{ш}}{D+d} \right) \cos q \right] \Omega$  – частота вибрации, вызванная неуравновешенностью сепаратора шарикоподшипника;

$f_b = 0,5 \left[ 1 + \left( \frac{2d_{ш}}{D+d} \right) \cos q \right] z\Omega$  – частота вибрации, вызванная дефектом внутреннего кольца шарикоподшипника;

$f_n = 0,5 \left[ 1 - \left( \frac{2d_{ш}}{D+d} \right) \cos q \right] z\Omega$  – частота вибрации, вызванная дефектом наружного кольца шарикоподшипника;

$f_{тк} = \left( \frac{d+D}{4d_{ш}} \right) \left( 1 - \frac{4d_{ш}^2}{(d+D)^2} \cos^2 q \right) \Omega$  – частота вибрации, вызванная дефектом тела качения шарикоподшипника;

$f_{о.в} = \frac{d+D}{2d_{ш}} z\Omega$  – частота вибрации, вызванная шероховатостью или овальностью тел качения шарикоподшипника;

$f_3 = 0,5z\Omega$  – частота вибрации, вызванная зазором в шарикоподшипнике,

где  $R$  – наружный радиус маховика;  $r$  – внутренний радиус маховика;  $k = R/r$ ;  $m$  – масса двигателя-маховика;  $\gamma$  – удельная масса материала маховика;  $h$  – высота обода;  $D_m$  – диаметр маховика;  $\Omega$  – угловая скорость вращения;  $C$  – коэффициент работоспособности шарикоподшипников;  $Q_p$  – нагрузка;  $\eta$  – коэффициент полезного действия;  $T_m$  – постоянная времени;  $K_k$  – коэффициент трения качения;  $D_b$  – внутренний диаметр наружного кольца шарикоподшипника;  $\rho$  – плотность среды, окружающей маховик;  $Re$  – число Рейнольдса;  $D_0$  – диаметр по центрам тел качения шарикоподшипника;  $z$  – число тел качения (шариков);  $d_{ш}$  – диаметр тела качения (шарика);  $\alpha, \beta, \xi$  – коэффициенты влияния, определяющиеся конструкцией маховика с валом;  $a$  – расстояние от левой опоры до маховика;  $b$  – расстояние между опорами вала;  $G$  – вес маховика;  $EI_1$  и  $EI_2$  – жесткости сечения вала на изгиб;  $J_x, J_y, J_z$  – моменты инерции двигателя-маховика относительно соответствующих осей;  $J_3$  – экваториальный момент инерции двигателя-маховика;  $l$  – смещение центра тяжести двигателя-маховика относительно точки его подвеса;  $\varepsilon$  – угол отклонения между осью главного момента инерции маховика и осью вращения;  $\mu$  – коэффициент соотношения осевого и экваториальных моментов инерции маховика;  $D$  – диаметр наружного кольца шарикоподшипника;  $d$  – диаметр внутреннего кольца шарикоподшипника;  $q$  – угол контакта тел качения.

Математическая модель – это основа, позволяющая получить оптимальный комплекс эксплуатационных характеристик двигателя-маховика на этапе проектирования. Это сложная проектная задача, не имеющая однозначного решения.

Например, в системе уравнений связь между ресурсом и габаритами электродвигателя-маховика напрямую не прослеживается, но эти характеристики связаны обратной зависимостью через величину кинетического момента  $H$  и угловую скорость вращения маховика [2]. Варьируя угловой скоростью маховика и его размерами, можно обеспечить требуемую величину ресурса и минимум массы. Чем больше скорость, тем меньше ресурс шарикоподшипниковых опор; чем меньше скорость, тем больше масса маховика и, соответственно, масса электродвигателя-маховика в целом.

В качестве опор маховика в основном применяются шарикоподшипники. Параметры вибрации электродвигателя-маховика с шарикоподшипниковыми опорами в значительной мере определяются конструктивными размерами элементов шарикоподшипников, а также соотношением осевого и экваториального моментов инерции вращающихся частей двигателя-маховика (маховик, ротор электродвигателя, вал маховика).

Важным параметром также является величина критической угловой скорости маховика, которая определяется размерами элементов конструкции и значение которой не должно находиться в диапазоне рабочих угловых скоростей маховика [3].

При минимизации массы электродвигателя-маховика необходимо учитывать другие параметры математической модели, чтобы, например, уменьшение сечения силовых элементов, добавление дополнительных облегчающих отверстий и т. п. не сказалось на жесткости конструкции в целом и, следовательно, на величине собственных частот элементов конструкции, а также на смещении величины критической скорости в рабочий диапазон угловых скоростей маховика.

Электродвигатель-маховик в условиях эксплуатации, вообще говоря, является гидродвигателем, установленным кардановым подвесом. Поэтому необходимо учитывать наличие вынужденных колебаний [4], возникающих по двум условным ортогональным осям двигателя-маховика. Анализ соответствующих уравнений математической модели говорит о том, что при увеличении амплитуд вынужденных колебаний по крайней мере при двух значениях угловой скорости маховика  $\Omega$  будет возникать резонанс.

Таким образом, анализ математической модели электродвигателя-маховика на этапе проектирования позволяет оценить взаимное влияние его характеристик.

Наиболее эффективным методом оптимизации всего комплекса характеристик представляется варьирование параметрами конструкции через параметризацию с использованием специализированного программного обеспечения, реализующего геометрическую параметризацию и возможность эффективного расчета требуемых характеристик.

Примером эффективной оптимизации может послужить оптимизация комплекса эксплуатационных характеристик гиродина. Эксплуатационные характеристики гиродина описываются математической моделью, очень близкой математической модели электродвигателей-маховиков. На рис. 2 приведена параметрическая 3D-модель гиродина в собранном и разобранном виде, созданная в системе T-Flex CAD.



**Рис. 2.** Параметрическая 3D-модель гиродина

Параметрические возможности системы T-Flex CAD позволяют включать непосредственно в 3D-модель расчет эксплуатационных характеристик, зависящих от геометрических размеров конструкции. При параметрическом изменении модели (изменяются наружные радиусы и высоты обода обоих маховиков) происходит полное перестроение модели с новыми размерами и пересчет эксплуатационных характеристик. На рис. 3 и 4 приведен пример расчета момента сопротивления и критической угловой скорости вращения для двух вариантов конструкции.

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
R	75	75	наружный Радиус 1 маховика (3000)
h	40	40	
R1	75	75	
h11	40	40	
Jc	0.01	0.01	момент инерции по оси X
Jb	0.01	0.01	момент инерции по оси Y
колебательность	$(J1^2)/(Jb^2)c$	0.184845	параметр колебательности
tp	$((H^2*10000)/((0.75/(30-mC))-(1-0.03/30)))/60$	6.853168	время разгона маховика(3000)
tp1	$((H1^2*10000)/((0.75/(70-mC1))-(1-0.03/70)))/60$	33.816097	время разгона маховика (20000)
P	$(9.81*om^mC*(10^(-5)))+(9.81*om1^mC1*(10^(-5)))$	10.681247	мощность потребляемая двумя ма...
mC1	mtb1+Msp1	49.396288	общий момент сопротивления (200...
mC	mtb+msp	17.44686	общий момент сопротивления(3000)
OMKRO	OMKR^9.55	12615.27763	критическая скорость(3000)
OMKRO1	OMKR1^9.55	23028.046013	критическая скорость (20000)
rrot	R-30	45	
Msp91	$(4^1.65)+(1.25^*0.001^*1.65^*(300/0.42))$	8.073214	
Msp81	$4^1.5+1.25^*0.001^*1.5^*(300/0.39)$	7.442308	
Msp1	Msp91+Msp81	15.515522	момент сопротивления Ш/П(20000)
Caer	$0.53^*reim^(-0.5)$	0.053504	для момента сопротивления(3000)
gF	$(h/10^((R/10)^4))+(h/10^((r/10)^4))+(2^*(R/10)^5)+(r/10)^...$	29148.974625	геометрический фактор(3000)
mtb	$2^*p^2*(10^(-9))^*Caer^om^2)^*gF$	1.931338	момент аэродинам. сопр.(3000)
b1	13	13	длина консоли до 2 маховика (200...
GA	$((a/1000)^(-b/1000))/(3^EU^2)+((-b/1000)^2)/(2^EU^2)$	0.000002	для критической скорости(3000)
dvala1	6.58	6.58	
a1	h11+7-b1	34	расстояние между опорами 2 махо...
Augol1	10.5/57	0.184211	
r12	15	15	

Рис. 3. Расчет момента сопротивления и угловой скорости для варианта R = 75 мм

Имя	Выражение	Значение	Комментарий
R	85	85	наружный Радиус 1 маховика (3000)
h	30	30	
R1	85	85	
h11	30	30	
Jc	0.01	0.01	момент инерции по оси X
Jb	0.01	0.01	момент инерции по оси Y
колебательность	$(J1^2)/(Jb^2)c$	0.184845	параметр колебательности
tp	$((H^2*10000)/((0.75/(30-mC))-(1-0.03/30)))/60$	7.541413	время разгона маховика(3000)
tp1	$((H1^2*10000)/((0.75/(70-mC1))-(1-0.03/70)))/60$	80.845859	время разгона маховика (20000)
P	$(9.81*om^mC*(10^(-5)))+(9.81*om1^mC1*(10^(-5)))$	12.656209	мощность потребляемая двумя ма...
mC1	mtb1+Msp1	58.930605	общий момент сопротивления (200...
mC	mtb+msp	17.999805	общий момент сопротивления(3000)
OMKRO	OMKR^9.55	13546.140283	критическая скорость(3000)
OMKRO1	OMKR1^9.55	24728.118415	критическая скорость (20000)
rrot	R-30	55	
Msp91	$(4^1.65)+(1.25^*0.001^*1.65^*(300/0.42))$	8.073214	
Msp81	$4^1.5+1.25^*0.001^*1.5^*(300/0.39)$	7.442308	
Msp1	Msp91+Msp81	15.515522	момент сопротивления Ш/П(20000)
Caer	$0.53^*reim^(-0.5)$	0.047209	для момента сопротивления(3000)
gF	$(h/10^((R/10)^4))+(h/10^((r/10)^4))+(2^*(R/10)^5)+(r/10)^...$	42493.625337	геометрический фактор(3000)
mtb	$2^*p^2*(10^(-9))^*Caer^om^2)^*gF$	2.484283	момент аэродинам. сопр.(3000)
b1	13	13	длина консоли до 2 маховика (200...
GA	$((a/1000)^(-b/1000))/(3^EU^2)+((-b/1000)^2)/(2^EU^2)$	0.000002	для критической скорости(3000)
dvala1	6.58	6.58	
a1	h11+7-b1	24	расстояние между опорами 2 махо...
Augol1	10.5/57	0.184211	
r12	15	15	

Рис. 4. Расчет момента сопротивления и угловой скорости для варианта R = 85 мм

Одна модель, по сути, «закрывает» целый параметрический ряд гиродинов и позволяет кроме возможности получения комплекта конструкторской документации получать комплекс эксплуатационных характеристик для этого ряда.

Это существенно повышает качество разработки и значительно сокращает общее время проектирования.

Существует также проблема влияния физико-технических характеристик применяемых конструкционных материалов на эксплуатационные параметры. Нормируемые технической документацией коэффициенты запаса по механическим нагрузкам высоки, т. к. в них заложено незнание процессов, происходящих в конструкционных материалах в процессе непрерывной эксплуатации космической техники в течение десятков лет при действии этих механических нагрузок, особенно циклических.

Это является отдельной областью исследований, результаты которых позволят технически обоснованно снизить коэффициенты запаса по надежности изделий космического назначения, что позволит улучшить целый ряд эксплуатационных параметров, прежде всего габаритно-массовые характеристики.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев К.Б., Бебенин Г.Г. Управление космическими летательными аппаратами. – М.: Машиностроение, 1974. – 343 с.
2. Дмитриев В.С., Гладышев Г.Н., Костюченко Т.Г. Электромеханические исполнительные органы систем ориентации космических аппаратов. Ч. 1: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 208 с.
3. Влияние жесткости силовых элементов конструкции на величину критической скорости исполнительного органа на базе управляемого по скорости двигателя-маховика (УДМ) / Ю.А. Бритова, В.С. Дмитриев, А.А. Васильцов, И.С. Костарев // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 11. – С. 24–27.
4. Павлов В.А. Основы проектирования и расчета гироскопических приборов. – СПб.: Судостроение, 1967. – 408 с.

Поступила 12.05.2014 г.