

## Расчет вероятностных характеристик двигателя маховика космического аппарата

Пространственная ориентация и стабилизация положения КА в настоящее время осуществляется в основном посредством исполнительных органов (ИО) различных типов, которые предназначены для формирования управляющих моментов относительно центра масс КА.

В настоящее время широко используются электромеханические исполнительные органы с максимальной возможностью минимизации массогабаритных характеристик на базе электродвигателей-маховиков (ДМ), которые генерируют управляющие моменты путем изменения количества движения маховика.

ДМ благодаря своим функциональным возможностям, простоте конструкции и высокой надежности нашел широкое использование в системе ориентации космических аппаратов аэрокосмическими компаниями разных стран.

В связи с вышеизложенную особую актуальность приобретает улучшение эксплуатационных характеристик ДМ и, в частности, снижение его массы и габаритов при одновременном обеспечении требуемых динамических качеств. С повышением требований всего комплекса эксплуатационных характеристик КА возникает необходимость дальнейшего совершенствования эксплуатационных характеристик ИО.

Поэтому на современном этапе развития космической техники одной из актуальных задач на этапе проектирования ДМ для КА является обеспечение требуемых параметров надежности. В этом плане обеспечение необходимого качества этапа испытаний (технология, оборудование) является краеугольной проблемой общего процесса создания новых образцов ракетно-космической техники.

На основе статистических данных, полученных после испытания 20 двигателей- маховиков (ДМ) оценим вероятностные характеристики ДМ. Из итогов испытаний известно, что все двадцать испытаний были успешными (т.е. отказов в ходе проведения испытаний не было).

***Произведем «точечную» оценку надежности ДМ***

$$H_{DM} = \frac{m}{n}$$

где n- общее число испытаний, m- число успешных.

$$H_{DM} = \frac{m}{n} = \frac{20}{20} = 1 \text{ или } 100\%$$

При ограниченных объемах испытаний, как в нашем случае, эта оценка не дает гарантированный результат. В частности, при проведении пбезотказных испытаний ( $n = m$ ) точечная оценка будет равна 1 для всех n, в том числе и для  $n = 1$ . Очевидно, доверие к этой оценке мало. Поэтому для получения гарантированного результата необходимо использовать интервальные оценки.

***Оценим нижнюю границу надежности ДМ.***

При подтверждении надежности нас, в основном, интересует вероятность того, что истинное значение надежности  $H$  будет не ниже некоторого уровня  $H_n$ , то есть

$$P = \{H_n < H\} = \gamma$$

Это соотношение определяет одностороннюю нижнюю границу  $H_n$ .  
 Можно показать, что односторонняя нижняя граница  $H_n$  является корнем уравнения

$$\sum_{i=d}^k C_n^i H_n^i (1-H_n)^{n-i} = 1-\gamma \quad (1)$$

Аналитическое решение для  $H_n$  удастся получить только в случае безотказных испытаний. Тогда, полагая  $m=n$ , из соотношения (1) получим

$$H_n^k = 1 - \gamma.$$

Отсюда

$$H_n = \sqrt[k]{1 - \gamma}. \quad (2)$$

Эта формула находит широкое применение на практике при подтверждении работоспособности высоконадежных систем, так как в этом случае испытания, как правило, безотказные. Результаты расчета показывают, что для подтверждения высоких уровней надежности  $H$  требуется очень большое число испытаний.

Подставим в формулу (2) значения для нашего ДМ- 20 успешных испытаний с доверительной вероятностью  $\gamma = 0,95$ .

$$H_n = \sqrt[20]{1 - 0,95} = 0,861$$

### **Оценим интенсивность отказа ДМ**

Из анализа технической документации на ДМ известно, что

1. Гарантийный ресурс, час – 45000
2. Ресурс при эксплуатационной скорости  $(0,1 \dots 0,5)n_{max}$ , час – 120000

Положим, что надежность ДМ подчиняется экспоненциальному закону, тогда будем иметь  $P_{DM} = e^{-\lambda t}$ . Для оценки надежности возьмем наибольшее время работы ДМ, которое соответствует его ресурсу и составляет 120000 час.

$$\lambda = \frac{-\ln P_{DM}}{t}$$

В качестве надежности ДМ в данной формуле будем использовать нижнюю границу  $H_n=0.861$

$$\lambda = \frac{-\ln P_{DM}}{t} = -\frac{\ln 0,861}{120000} = \frac{0,14966}{120000} = 1,247 \times 10^{-6} \text{ 1/ч}$$

Интенсивность отказа ДМ оцененная по нижней границе надежности составляет  $1,247 \times 10^{-6}$  1/ч.

Используя известные зависимости оценки  $\lambda$  для экспоненциального закона, оценим границы интенсивности отказа:  $\lambda = \frac{1}{T}$  подставим в эту формулу два значения по ресурсу (45000 час и 120000 час)

$$\lambda_H = \frac{1}{T} = \frac{1}{120000} = 8,3 \times 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

$$\lambda_B = \frac{1}{T} = \frac{1}{45000} = 2,2 \times 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

Используя полученные данные можно составить неравенство определяющее границы интенсивности отказа  $\lambda_H \leq \lambda_{DM} \leq \lambda_B$

$$8,3 \times 10^{-6} \leq \lambda_{DM} \leq 2,2 \times 10^{-5}$$

### **Верхняя граница надежности ДМ**

Используя минимальный ресурс ДМ- 45000час, и зная интенсивность отказа можно оценить верхнюю доверительную границу надежности ДМ.

$$H_B = e^{-\lambda t} = e^{-1.247 \times 10^{-6} \times 45000} = 0,945$$

Из проведенных расчетов можно сделать вывод что надежность ДМ лежит в границах  $H_H \leq H_{DM} \leq H_B$  или подставив значения, получим:

$$0.861 \leq H_{DM} \leq 0.945$$

### **Нормирование надежности**

Рассмотрим состав и структуру ДМ. Как видно их схемы закрытого ДМ, он состоит из семи основных элементов:

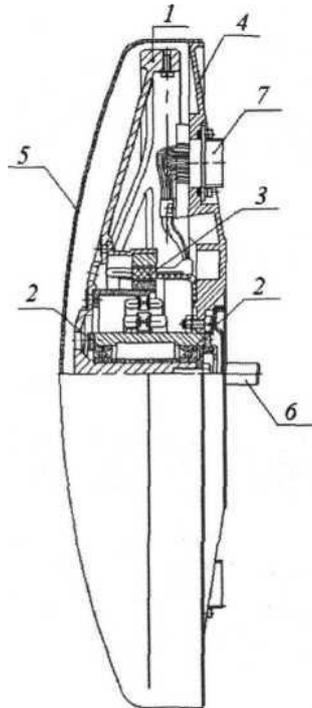


Рис.1 «Двигатель-маховик»

1 – ротор; 2- опоры; 3-электродвигатель; 4- основание; 5- кожух; 6- штуцер; 7- герметичный разъем.

### **Равномерное распределение надежности по элементам ДМ**

В первом приближении можно положить, что все элементы ДМ равнонадежны, тогда получим  $R_i = (R^*)^{1/n}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 7$ . В качестве надежности ДМ будем использовать нижнюю доверительную границу  $H_H=0,861$ .

$$R_i = H_H^{\frac{1}{n}} = 0,861^{\frac{1}{7}} = 0,9789$$

Таким образом, для каждой подсистемы ДМ должна быть задана вероятность безотказной работы, равная 0,9789.

### **Нормирование с помощью весовых коэффициентов**

Если рассматривать особенность работы двигателя-маховика, то можно выявить нагруженные элементы и в нормировании задать более жесткие требования к их надежности и безотказной эксплуатации. У ДМ такими элементами являются: опоры-подшипники (2), маховик-ротор (1) и

электродвигатель (3), так же на основании оценки вибрационных характеристик электродвигателя-маховика в рабочем режиме сюда можно включить и кожух (5), т.к. на графике вибрационной характеристики он имеет резонанс на угловой скорости вращения 300 рад/с.

Нормирование произведем с использованием весовых коэффициентов, которые являются функциями интенсивностей отказов подсистем. Зададим весовые коэффициенты для элементов ДМ.

Табл.1

№п.п	Элемент	Весовой коэффициент $\omega_i$
1	Ротор-маховик	0,25
2	Опоры-подшипники	0,25
3	Электродвигатель	0,0875
4	Основание	0,0875
5	Кожух	0.15
6	Штуцер	0,0875
7	герметичный разъем.	0,0875
Итого		$\sum_{i=1}^7 \omega_i = 1$

Таким образом,  $\omega_i$  показывает относительную уязвимость  $i$ -го элемента.

Ранее вычислено, что  $R_{дм}=0,861$  и  $\lambda=1,247 \times 10^{-6}$  1/ч. Определим интенсивность отказа для каждой подсистемы ДМ, учитывая весовой коэффициент.

$$\lambda_i^* = \omega_i \lambda^*$$

Результаты вычислений интенсивности отказа по каждой из подсистем ДМ представлены в табл.2

$\lambda_1^*$	$\lambda_2^*$	$\lambda_3^*$	$\lambda_4^*$	$\lambda_5^*$	$\lambda_6^*$	$\lambda_7^*$
$3.11 \times 10^{-7}$	$3.11 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.87 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$	$1.09 \times 10^{-7}$

Соответствующие заданные значения вероятностей безотказной работы подсистем определяются следующим образом:

$$R_i^*(120000) = \exp[\lambda_i^* \cdot 120000]$$

Результаты вычислений вероятности безотказной работы по каждой из подсистем ДМ представлены в табл.3

$R_1^*$	$R_2^*$	$R_3^*$	$R_4^*$	$R_5^*$	$R_6^*$	$R_7^*$
0,9633	0,9633	0,987	0,987	0,9781	0,987	0,987

При расчете учитывалось, что подсистемы соединены последовательно и имеют постоянную интенсивность отказов, что отказ любой подсистемы вызывает отказ всей системы и что заданная наработка подсистем равна заданной наработке системы.

### Уточненный расчет по весовым коэффициентам

Во втором приближении рассмотрим интенсивности отказа, полученные выше для всех элементов ДМ как исходные значения, а весовые коэффициенты рассчитаем по соотношению:

$$\omega_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, i = 1, \dots, n.$$

Результаты вычислений  $\omega$  сведены в табл.4

$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$	$\omega_7$
0,24979	0,24979	0,08755	0,08755	0,1502	0,08755	0,08755

Далее вычислим интенсивности отказов подсистемы с помощью соотношения:

$$\lambda_i^* = \omega_i \lambda^*, i = 1, \dots, n.$$

Ранее вычислено, что  $P_{\text{дм}}=0,861$  и  $\lambda=1,247 \times 10^{-6}$  1/ч. Определим интенсивность отказа для каждой подсистемы ДМ, учитывая весовой коэффициент.

$$\lambda_i^* = \omega_i \lambda^*$$

Результаты вычислений интенсивности отказа по каждой из подсистем ДМ представлены в табл.5

$\lambda_1^*$	$\lambda_2^*$	$\lambda_3^*$	$\lambda_4^*$	$\lambda_5^*$	$\lambda_6^*$	$\lambda_7^*$
$3,11 \cdot 10^{-7}$	$3,11 \cdot 10^{-7}$	$1,092 \cdot 10^{-7}$	$1,092 \cdot 10^{-7}$	$1,873 \cdot 10^{-7}$	$1,092 \cdot 10^{-7}$	$1,092 \cdot 10^{-7}$

Соответствующие заданные значения вероятностей безотказной работы подсистем определяются следующим образом:

$$R_i^*(120000) = \exp[-\lambda_i^* \cdot 120000]$$

Результаты вычислений вероятности безотказной работы по каждой из подсистем ДМ представлены в табл.6

$R_1^*$	$R_2^*$	$R_3^*$	$R_4^*$	$R_5^*$	$R_6^*$	$R_7^*$
0,9634	0,9634	0,9869	0,9869	0,977	0,9869	0,9869

Результаты расчета в первом приближении представлены в табл.7

$R_1^*$	$R_2^*$	$R_3^*$	$R_4^*$	$R_5^*$	$R_6^*$	$R_7^*$
0,9633	0,9633	0,987	0,987	0,9781	0,987	0,987

Если сравнивать результаты расчетов в первом и втором приближении, то можно сделать вывод, что расхождение очень мало, и можно было ограничиться первым вариантом расчета.

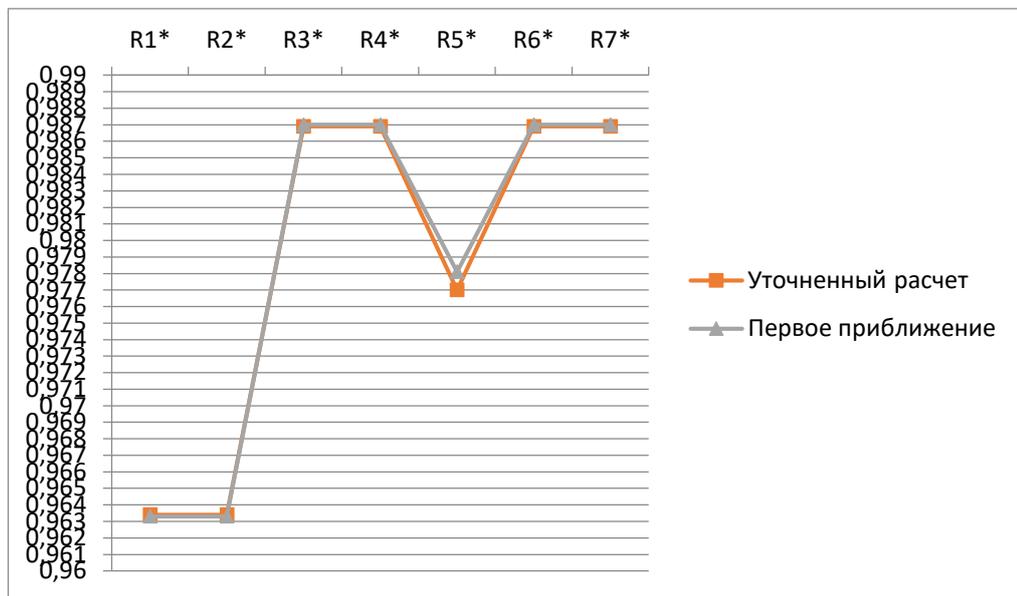


Рис.2. Зависимость вероятности безотказной работы элемента ДМ от вида расчета

### а. Расчет надежности системы ориентации КА из нескольких ДМ

#### Оценка надежности системы ориентации КА состоящей из трех ДМ, расположенных на каждой оси КА

Расчет можно произвести как для системы из трех последовательно соединенных элементов. Будем считать, что все ДМ равнонадежные и надежность возьмем по верхней границе доверительного интервала, тогда будем иметь:

$$N_{КА} = \prod_1^3 N_{ДМ} = 0,945 \times 0,945 \times 0,945 = 0,844$$

#### Оценка надежности СО КА состоящей из шести ДМ, три из которых работают постоянно, а три оставшихся находятся в «холодном» резерве

Тогда по формуле для холодного резерва будем иметь:

$$P = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!} \text{ где } m \text{ – количество резервных элементов.}$$

Интенсивность отказа для ДМ возьмем  $\lambda = 1.247 \times 10^{-6} \text{ 1/ч.}$

$$P_{ДМ} = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!} = 0,945(1 + (1.247 \times 10^{-6} \times 45000)) = 0,998$$

$P=0,998$  – соответствует надежности системы из двух элементов один из которых находится в ненагруженном резерве. В системе ориентации КА имеется три таких блока по два ДМ. Вероятность безотказной работы которых определяется следующим образом:  $N_{КА} = \prod_1^3 P_{ДМ} = 0,998 \times 0,998 \times 0,998 = 0,994$ .

Положим, что в системе «идеальный» переключатель, тогда надежность СО КА будет оценена, как надежность системы групп, последовательно соединенных между собой по два параллельно стоящих элемента. Расчет можно произвести по соотношению:

$$N_{КА} = \prod_{i=1}^3 (1 - (1 - N_{ДМ})(1 - N_{ДМ})) = 0,9879$$

Практика показала, что электромеханическое устройство, которое длительное время не включалось в космосе, имеет все шансы не включиться и в тот момент, когда в нём появится необходимость.

#### Оценка надежности СО КА состоящей из четырех ДМ, расположенных на гранях пирамиды

Гораздо перспективнее оказалась идея расположить маховики на гранях пирамиды, делить управляющий момент между всеми четырьмя ДМ и парировать отказ одного из них, перераспределяя момент по трём оставшимся (рис.3).

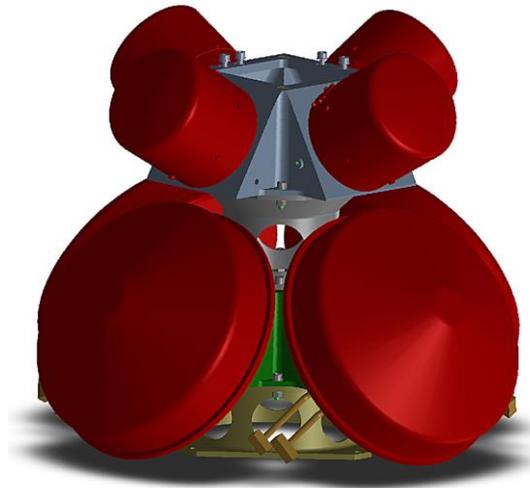


Рис. 3 Расположение ДМ на стенах четырехгранной пирамиды

Данная схема позволяет выход из строя любого одного ДМ. Надежность такой системы будет оцениваться по соотношению:

$$H = \sum_{i=0}^m C_n^i h^{n-i} (1-h)^i$$

$$H = H_{\text{ДМ}}^4 + C_4^1 (1 - H_{\text{ДМ}}) H_{\text{ДМ}}^3 = 0,9831$$

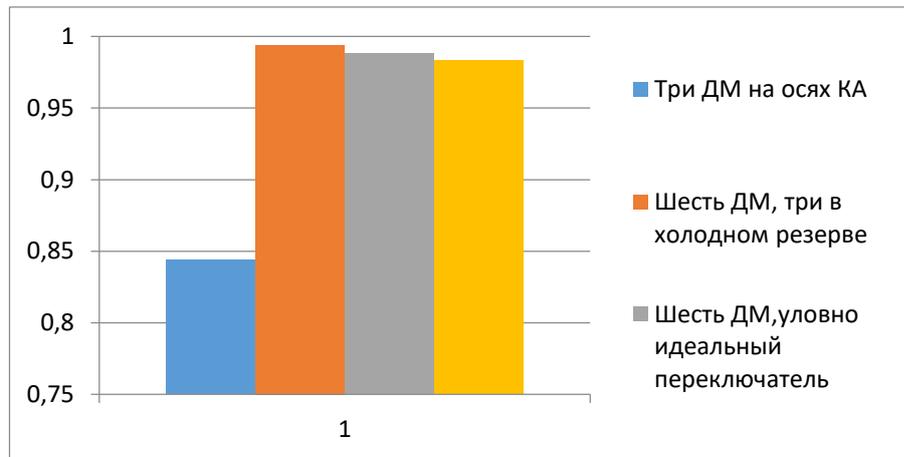


Рис.4 Зависимость надежности системы ориентации КА от способа соединения и количества ДМ

Основные результаты расчетов сведены в таблицу

№ п.п.	Значение коэффициента	Значение
1	Гарантийный ресурс	45000 час
2	Ресурс при эксплуатационной скорости	120000 час
3	«Точечная» оценка надежности, $\hat{H}$	100%
4	Нижняя граница надежности, $H_n$	0,861
5	Интенсивность отказа ДМ, $\lambda$	$1,247 \times 10^{-6}$ 1/ч.
6	Верхняя граница надежности, $H_B$	0,945
<b>Нормирование надежности</b>		
7	Равномерное распределение по элементам $R_i, i=1 \dots 7$	0,9789
8	Надежность системы из четырех ДМ в системе ориентации КА	0,9831