

КОЭФФИЦИЕНТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКОГО МОМЕНТА В ИЗБЫТОЧНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ

А.Д. Беленький, В.Н. Васильев, М.Е. Семенов
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Исследуются теоретические возможности маховичной системы с бесконечно большим числом двигателей-маховиков. Оценивается предельный коэффициент использования кинетического момента в избыточных маховичных системах.
Ключевые слова: космический аппарат, двигатель-маховик, избыточная маховичная система, кинетический момент.

Введение. Важной характеристикой управляющих возможностей избыточной маховичной системы является область S изменения суммарного вектора кинетического момента электродвигателей-маховиков \mathbf{H} , построенная в связанных осях космического аппарата $Oxyz$. Эта область представляет собой множество возможных положений конца вектора \mathbf{H} , начало которого совпадает с точкой O [1, 2].

Форма области S зависит от схемы установки двигателей-маховиков, а ее размеры пропорциональны максимальному кинетическому моменту двигателя-маховика H_* . Размеры и форма требуемой области S^* определяются тактико-техническими требованиями к динамике стабилизации и поворотов космического аппарата. Выбором схемы установки и H_* должно обеспечиваться условие $S^* \in S$.

Расстояние $H(\mathbf{r})$ от точки O до границы области S по некоторому направлению \mathbf{r} определяет максимальную величину вектора \mathbf{H} , которую система двигателей-маховиков способна развивать в направлении \mathbf{r} .

Коэффициент использования кинетического момента и область S_0 . Для сравнения различных электромеханических систем ориентации в [3] предложено использовать безразмерный коэффициент

$$\chi(\mathbf{r}) = H(\mathbf{r})/H_{\Sigma},$$

где H_{Σ} – арифметическая сумма максимальных кинетических моментов исполнительных органов, входящих в систему ориентации. Этот коэффициент определяет степень использования установочных кинетических моментов исполнительных органов при создании кинетического момента в заданном направлении \mathbf{r} . В избыточных системах двигателей-маховиков коэффициент $\chi(\mathbf{r})$ зависит от числа двигателей-маховиков, схемы их установки на космическом аппарате и направления \mathbf{r} . Коэффициент χ максимален, т. е. равен единице, когда оси вращения всех маховиков параллельны, однако в перпендикулярных направлениях управляющие моменты не создаются ($\chi = 0$). Система сохраняет управляемость, если для всех направлений $0 < \chi(\mathbf{r}) < 1$. Множество возможных положений конца вектора

$\chi(\mathbf{r})\mathbf{r}/r$ образует область S_0 , которая подобна области S , но её размеры не зависят от кинетического момента двигателя-маховика и удовлетворяют условию $|\chi(\mathbf{r})\mathbf{r}/r| \leq 1$. В каждой схеме установки существует направление \mathbf{r} , для которого коэффициент использования кинетических моментов двигателей-маховиков $\chi(\mathbf{r})$ минимален. Величина $\chi_{\min} = \min \chi(\mathbf{r})$ определяет гарантированную величину вектора \mathbf{H} , развиваемую маховичной системой независимо от направления \mathbf{r} .

Схема установки двигателей-маховиков. Оценим коэффициент использования кинетических моментов двигателей-маховиков для схем установки, которые должны обеспечивать гарантированную величину вектора \mathbf{H} , развиваемую маховичной системой в произвольно заданном направлении \mathbf{r} .

Решению поставленной задачи и повышению ресурса маховичной системы способствует равномерное распределение общего кинетического момента между отдельными двигателями-маховиками. С этой целью оси вращения двигателей-маховиков следует равномерно распределять и ориентировать по правильной круговой конической поверхности [4 – 8]. Если ось конической поверхности совместить с осью Ox , то установочные углы всех осей вращения относительно оси Ox будут одинаковыми и равными углу α между образующей конуса и осью Ox [4].

Рассмотрим избыточную маховичную систему, в состав которой входит бесконечно большое число n одинаковых двигателей-маховиков с максимальным кинетическим моментом H_* . Обозначим через \mathbf{h}_i ($i = 1, 2, \dots, n$) – единичный вектор, параллельный оси вращения i -го маховика. За начало всех векторов \mathbf{h}_i выберем точку O .

Положение установочного вектора \mathbf{h}_i в системе координат $Oxyz$ может быть задано направляющими косинусами h_{i1}, h_{i2}, h_{i3} , а положение на поверхности конуса углом β_i , который отсчитывается в плоскости основания конуса от оси, параллельной связанной оси Oy .

Направляющие косинусы связаны с углами α, β_i соотношениями:

$$h_{i1} = \cos \alpha, \quad h_{i2} = \sin \alpha \cos \beta_i, \quad h_{i3} = \sin \alpha \sin \beta_i.$$

Проекции вектора кинетического момента маховичной системы \mathbf{H} на оси $Oxyz$ вычисляются по формулам:

$$H_x = \cos \alpha \sum_{i=1}^n H_i; \quad H_y = \sin \alpha \sum_{i=1}^n H_i \cos \beta_i,$$

$$H_z = \sin \alpha \sum_{i=1}^n H_i \sin \beta_i,$$

где кинетический момент двигателя-маховика H_i считается положительным, если направления векторов \mathbf{h}_i и \mathbf{H}_i совпадают, и отрицательным, если они противоположны.

Установочные углы β_i отличаются друг от друга на угол $\Delta\beta = 2\pi/n$, т. е.

$$\beta_{i+1} = \beta_i + \Delta\beta; \quad \beta_1 = \beta \leq \Delta\beta.$$

Если представить, что установочные векторы \mathbf{h}_i «закреплены» на поверхности конуса (рис. 1), то установочный угол β задаёт ориентацию конуса относительно осей космического аппарата и определяет начало отсчета углов β_i .

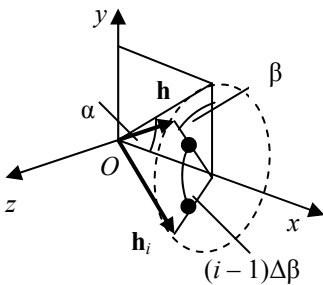


Рис. 1. Схема установки двигателей маховиков

При ограниченном числе n одинаковых двигателей-маховиков область S представляет собой симметричный относительно оси Ox выпуклый многогранник. Число его граней в форме ромбов с длиной стороны $2H_*$ составляет $2C_n^2 = n(n-1)$ [4]. Плоскость, проходящая через ось Ox под произвольным углом γ к оси Oy , образует на поверхности области S многоугольник. Его форма зависит от положения угла γ внутри некоторого диапазона $\beta_i < \gamma < \beta_{i+1}$. Плоскости, отстоящие друг от друга на угол $\Delta\beta$, образуют одинаковые сечения. При бесконечном увеличении числа n , когда $\Delta\beta \rightarrow 0$ и $\beta \rightarrow 0$, все сечения области S_0 становятся одинаковыми.

Расчёт коэффициента χ_{\min} . Выберем $\beta = \Delta\beta$, тогда $\beta_i = i\Delta\beta$ ($i = 1, 2, \dots, n$) и расчётные формулы примут вид:

$$H_x = \cos \alpha \sum_{i=1}^n H_i; \quad H_y = \sin \alpha \sum_{i=1}^n H_i \cos (i\Delta\beta);$$

$$H_z = \sin \alpha \sum_{i=1}^n H_i \sin (i\Delta\beta).$$

Если все двигатели-маховики развивают максимальный кинетический момент одного знака, то $|H_x| = nH_* \cos \alpha; H_y = H_z = 0$.

Если двигатели-маховики развивают положительные кинетические моменты H_* , соответствующие им векторы $H_*\mathbf{h}_i$ располагаются на поверхности установочного конуса. После смены знаков векторы $-H_*\mathbf{h}_i$ переходят в симметричное относительно центра O положение и располагаются на поверхности конуса, вытянутого вдоль отрицательного направления оси Ox (рис. 2).

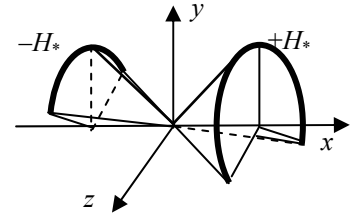


Рис. 2. Положение векторов \mathbf{H}_i при создании результирующего вектора $\mathbf{H}(r)$ в плоскости Oxy

Составим уравнение линии сечения поверхности области S_0 плоскостью, проходящей через ось Ox . Чтобы не вводить дополнительные переменные, выберем в качестве секущей плоскости координатную плоскость Oxy .

Ограничимся случаем, когда n – чётное число, при котором установочные векторы с индексами $1/2n$ и n расположены в плоскости Oxy . Число двигателей-маховиков, создающих отрицательные кинетические моменты, обозначим $2m$, соответственно положительных – $(n - 2m)$. Суммарный вектор \mathbf{H} будет находиться в плоскости Oxy , если составляющие векторы $H_i\mathbf{h}_i$ располагаются симметрично относительно этой плоскости. Симметрия обеспечивается выбором $H_i = -H_*$, если $1/2n - m \leq i \leq 1/2n + m$, и $H_i = H_*$ в остальных случаях. На рис. 3 изображены основания двух конусов с индексами установочных векторов (вид со стороны оси Ox). Симметрия позволяет заменить суммирование $\cos(i\Delta\beta)$ в диапазоне $1/2n - m \leq i \leq 1/2n + m$ суммированием в диапазонах $1 \leq i \leq m$ и $(n - m) \leq i \leq n$, поэтому

$$H_x = (n - 4m)H_* \cos \alpha;$$

$$H_y = 2H_* \sin \alpha \left[\sum_{i=1}^m \cos (i\Delta\beta) + \sum_{i=n-m}^n \cos (i\Delta\beta) \right] =$$

$$= 2H_* \sin \alpha \left[1 + 2 \sum_{i=1}^m \cos (i\Delta\beta) \right];$$

$$H_z = 0.$$

Воспользуемся формулой для преобразования суммы, входящей в формулу для H_y :

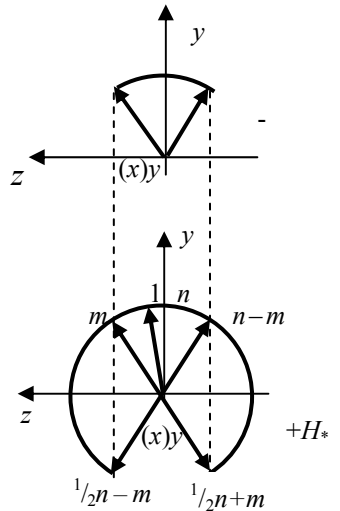


Рис. 3. Основания конусов

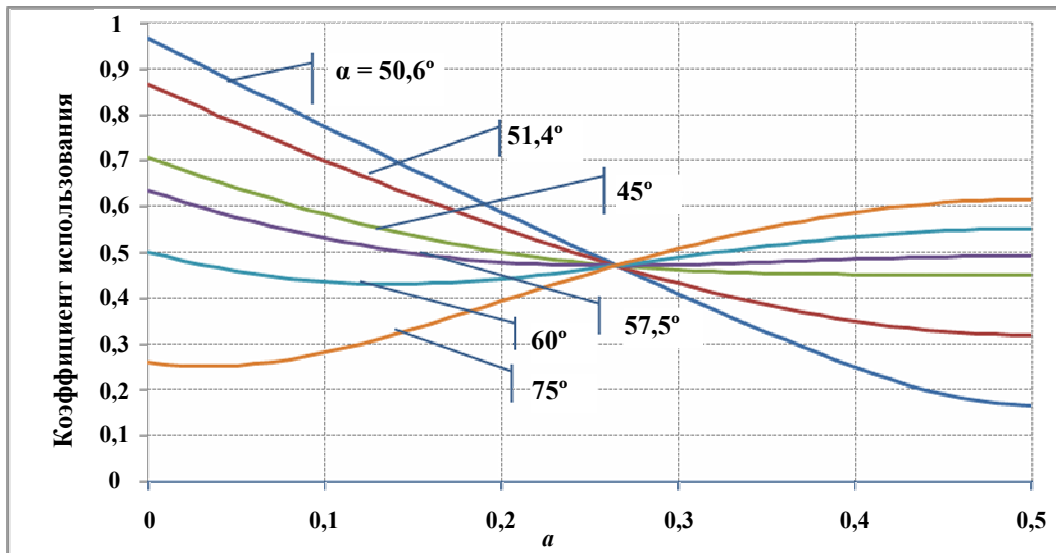


Рис. 4. Зависимость $\chi(a)$ при различных углах α

$$\sum_{i=1}^m \cos(i\Delta\beta) = \frac{\sin \frac{(2m+1)\Delta\beta}{2} - \sin \frac{\Delta\beta}{2}}{2 \sin \frac{\Delta\beta}{2}} =$$

$$= \frac{1}{2} \left(\operatorname{ctg} \frac{\Delta\beta}{2} \sin \frac{m\Delta\beta}{2} + \cos \frac{m\Delta\beta}{2} - 1 \right).$$

После деления H_x и H_y на $H_\Sigma = nH^*$ и подстановки $\Delta\beta = 2\pi/n$, получим коэффициенты использования кинетических моментов:

$$\chi_x = (1 - 2a) \cos \alpha;$$

$$\chi_y = 2 \sin \alpha \left[\frac{1}{n} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{n} \sin(a\pi) + \frac{1}{n} \cos(a\pi) \right],$$

где $a = m/n$.

В отличие от χ_x коэффициент χ_y зависит от n . При $n \rightarrow \infty$

$$\chi_x = (1 - 2a) \cos \alpha; \quad \chi_y = \chi(n) = \frac{2}{\pi} \sin \alpha \sin(a\pi). \quad (1)$$

Выражения (1) определяют в параметрическом виде линию сечения поверхности области S_0 верхней полуплоскостью Oxy . К этим же формулам сводятся вычисления в случае нечётного числа n .

Суммарный вектор кинетического момента \mathbf{H} направлен к оси Ox под углом

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\chi_y}{\chi_x} \right) = \operatorname{arctg} \left[2 \operatorname{tg} \alpha \frac{\sin(a\pi)}{\pi(1-2a)} \right]. \quad (2)$$

Коэффициент использования кинетического момента в направлении $\mathbf{r}(\varphi)$ является функцией двух переменных α и a :

$$\chi(\alpha, a) = \frac{H}{nH^*} = \sqrt{(1-2a)^2 \cos^2 \alpha + \frac{4}{\pi^2} \sin^2 \alpha \sin^2(a\pi)}. \quad (3)$$

При $n \rightarrow \infty$ величина $0 \leq a \leq 1$ определяет часть поверхности конуса, которую занимают установоч-

ные векторы двигателей-маховиков, создающих отрицательные кинетические моменты. Если $a = 0$, то $\chi(\alpha, 0) = \chi_x = \cos \alpha$; если $a = 0,5$, то $\chi(\alpha, 0,5) = \chi_y = (\frac{2}{\pi}) \sin \alpha \sin(a\pi)$.

Для подкоренного выражения функции (3) введём обозначение:

$$f(\alpha, a) = (1-2a)^2 \cos^2 \alpha + (\frac{2}{\pi})^2 \sin^2 \alpha \sin^2(a\pi).$$

Приравнявая нулю частную производную $\partial f(\alpha, a) / \partial a$, получим уравнение:

$$2a + (\frac{2}{\pi}) \sin(a\pi) = 1 \quad (4)$$

для нахождения значения a , обеспечивающего экстремум функции (3).

Численное решение уравнения даёт значение $a^* \approx 0,2647$.

Приравнявая нулю частную производную $\partial f(\alpha, a) / \partial a$, получим уравнение

$$2a + (\operatorname{tg}^2 \alpha / \pi) \sin(2a\pi) = 1 \quad (5)$$

для нахождения оптимального установочного угла α .

Из сравнения (5), (4), (3) и (2) следует, что

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = 1 / \cos(a\pi); \quad \chi = (1-2a); \quad \varphi = \alpha.$$

Если $a = a^* \approx 0,2647$, то $\alpha^* \approx 50,6^\circ$; $\chi^* \approx 0,4705$; $\varphi^* = \alpha^*$.

Зависимости $\chi(a)$ при различных углах α построены на рис. 4. Все кривые пересекаются в точке с координатами $a = a^*$, $\chi = \chi^*$, определяемой решением уравнений (5), (4), (3). Это означает, что для всех углов α коэффициент использования кинетического момента в направлении $\varphi = \alpha$ равен χ^* . Следует подчеркнуть, что коэффициент χ^* является минимальным только для угла α^* , для других углов α $\chi_{\min} < \chi^*$.

Для анализа полученных зависимостей введём следующие обозначения. Пусть $a_0 = a_0(\alpha)$ – решение уравнения (5), минимизирующее функцию (3) для данного угла α , $\chi_{\min} = \chi(\alpha, a_0)$ – минимальный коэффициент χ для данного угла α , $\varphi_0 = \varphi(\alpha, a_0)$ – уг-

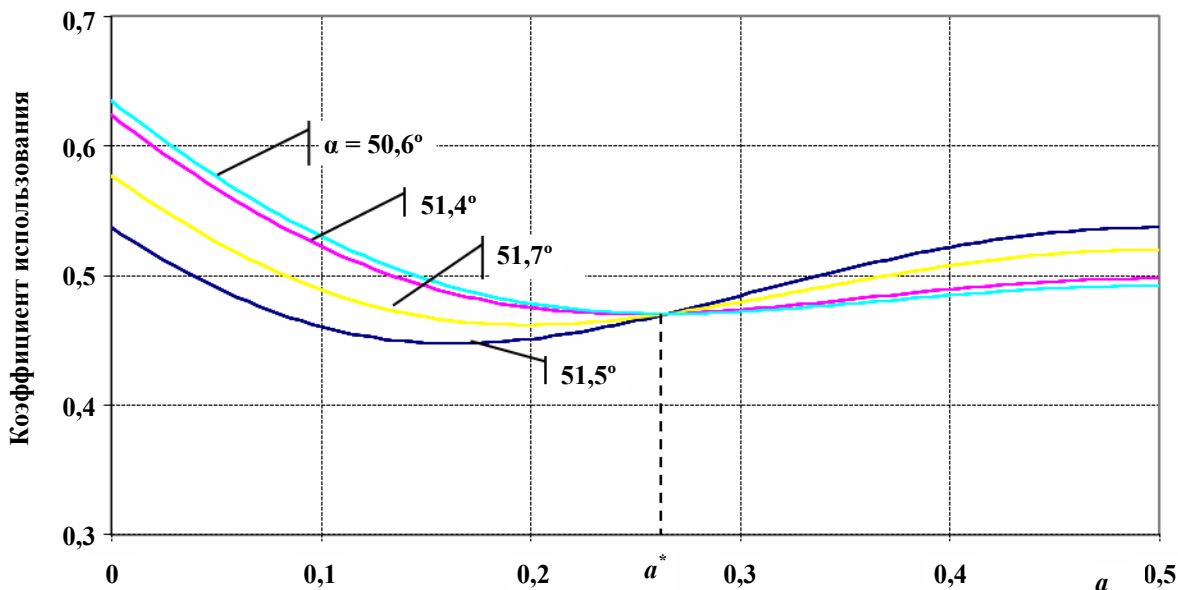


Рис. 5. Зависимость $\chi(a)$ при углах α от $50,6$ до $57,5^\circ$

ловое положение вектора $\mathbf{r}(\varphi_0)$, определяемое выражением (2) при $a = a_0$.

Предположим, что установочный угол изменяется от 0 до $\pi/2$.

Если $0 < \alpha \leq \pi/4$, то $a_0 = 0,5$; $\chi_{\min} = (2/\pi)\sin\alpha$; $0 < \chi_{\min} \leq \sqrt{2}/\pi \approx 0,45$; $\varphi_0 = \pi/2$.

Если $\pi/4 \leq \alpha \leq \alpha^* \approx 50,6^\circ$, то $0,5 \geq a_0 \geq a^* \approx 0,2647$; $\sqrt{2}/\pi \leq \chi_{\min} \leq \chi^* \approx 0,4705$; $\alpha^* \leq \varphi_0 < \pi/2$.

Вектор $\mathbf{r}(\varphi_0)$ расположен вне установочного конуса.

Если $\alpha^* \leq \alpha < \pi/2$, то $0 < a_0 \leq a^*$; $0 < \chi_{\min} \leq \chi^*$; $0 < \varphi_0 \leq \alpha^*$. Вектор $\mathbf{r}(\varphi_0)$ расположен внутри установочного конуса.

Определим коэффициент использования кинетического момента χ_{\min} в системах двигателей-маховиков, перспективных для практического применения.

Выбор $\alpha = \arctg(\sqrt{2}) \approx 54,7^\circ$ обеспечивает максимальный объём области S и минимизацию суммы квадратов управляющих моментов двигателей-маховиков [4 – 6]. Выражения (3) и (5) примут вид

$$\chi(\alpha) = \sqrt{\frac{1}{3}[(1-2a)^2 \cos^2 \alpha + \frac{8}{\pi^2} \sin^2(a\pi)]};$$

$$2a + \frac{2}{\pi} \sin(2a\pi) = 1.$$

Минимальное значение $\chi_{\min} \approx 0,46$ функция $\chi(a)$ принимает при $a = a_0 \approx 0,2$. Положение вектора $\mathbf{r}(\varphi_0)$ определяется углом

$$\varphi(a_0) = \arctg \frac{2\sqrt{2} \sin(a_0\pi)}{\pi(1-2a_0)} \approx 41,4^\circ.$$

Выбор $\alpha = \arctg(\pi/2) \approx 57,5^\circ$ обеспечивает равенство кинетических моментов маховичной системы по связанным осям космического аппарата $Oxyz$. Выражения (3) и (5) примут вид

$$\chi(\alpha) = \cos\alpha \sqrt{[(1-2a)^2 + \sin^2(a\pi)]};$$

$$2a + \frac{\pi}{4} \sin(2a\pi) = 1.$$

Минимальное значение $\chi_{\min} \approx 0,448$ функция $\chi(a)$ принимает при $a = a_0 \approx 0,164$. Положение вектора $\mathbf{r}(\varphi_0)$ определяется углом

$$\varphi(a_0) = \arctg \frac{\sin(a_0\pi)}{1-2a_0} \approx 36,25^\circ.$$

Если $\alpha < \arctg(\pi/2)$, то максимальный коэффициент χ реализуется по оси Ox : $\chi_{\max} = \cos\alpha$. Если $\alpha > \arctg(\pi/2)$, то максимальный коэффициент χ реализуется по оси Oy : $\chi_{\max} = (2/\pi) \sin\alpha$. При выборе $\alpha = \arctg(\pi/2)$ коэффициенты использования кинетического момента по связанным осям космического аппарата $Oxyz$ одинаковы $\chi_x = \chi_y = \chi_z \approx 0,537$.

Уравнение (5) имеет точное решение $a_0 = 0,25$ при выборе установочного угла $\alpha = \arctg \sqrt{\pi/2} \approx 51,4^\circ$. После подстановки a_0 и α в (3) и (2) получим:

$$\chi_{\min} = \cos\alpha \sqrt{0,25 + 1/\pi} \approx 0,4702;$$

$$\varphi(a_0) = \arctg(2\sqrt{1/\pi}) \approx 48,45^\circ.$$

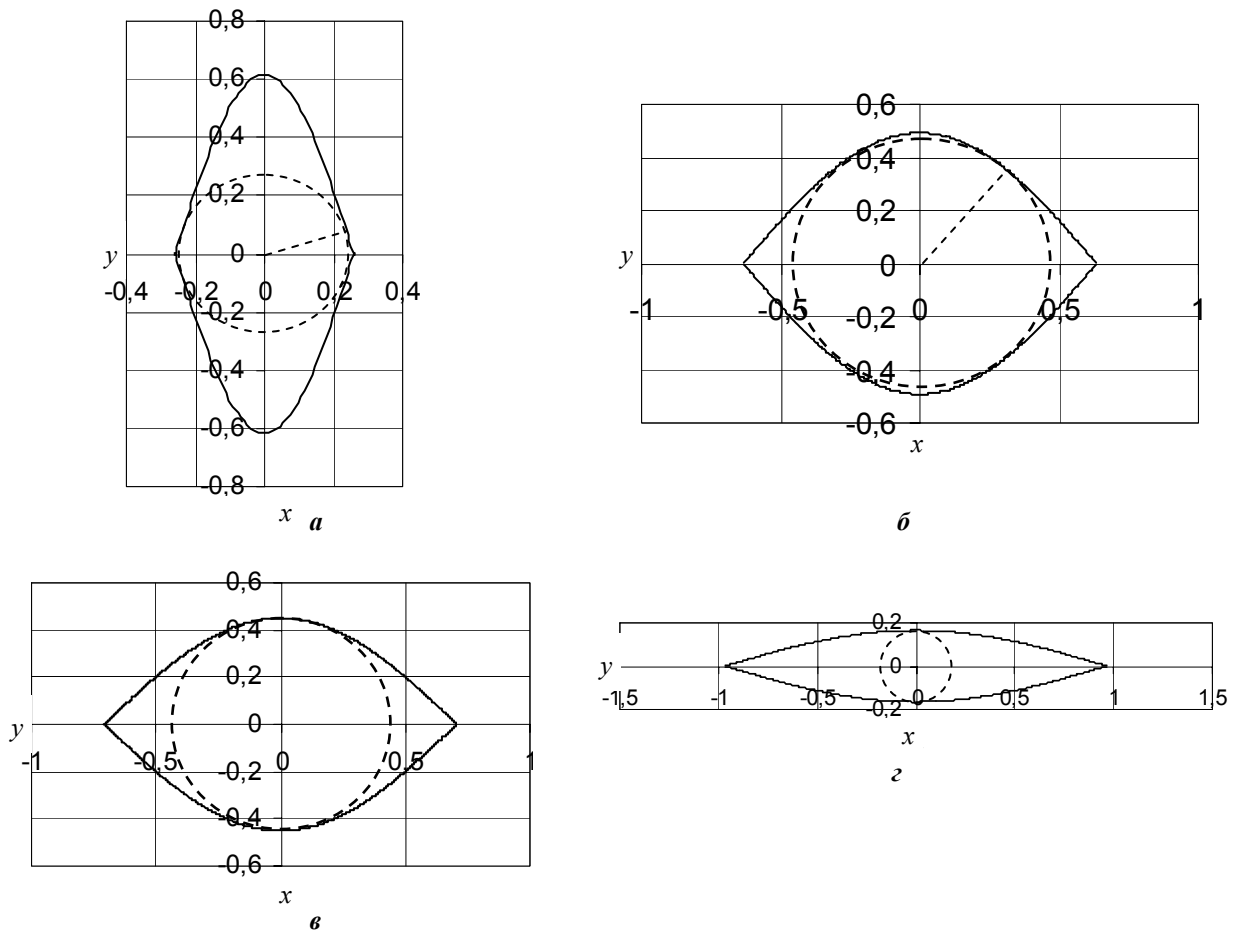


Рис. 6. Сечение границы области S_0 системы двигателей-маховиков при α :
 $a - 75^\circ$; $б - 50,6^\circ$; $в - 45^\circ$; $г - 15^\circ$

Зависимости $\chi(a)$ при углах α в диапазоне от $50,6$ до $57,5^\circ$ изображены на рис. 5.

Построение области S_0 . Исключая из уравнений (1) переменную a , получим уравнение сечения границы области S_0 координатной плоскостью Oxy в явном виде

$$y = \pm \frac{2}{\pi} \sin \alpha \cos \left(\frac{\pi x}{2 \cos \alpha} \right), \quad (6)$$

где $y = \chi_y$; $x = \chi_x$.

Область определения функции $y(x)$: $-\cos \alpha \leq x \leq \cos \alpha$.

Производная

$$\partial y / \partial x = -\operatorname{tg} \alpha \sin \alpha \left(\frac{\pi x}{2 \cos \alpha} \right)$$

для $y \geq 0$ даёт дополнительную информацию о форме области S_0 . В точке с координатами $(x = -\cos \alpha; y = 0)$ производная равна $\operatorname{tg} \alpha$, т. е. угол наклона касательной равен α . В точке с координатами $x = 0, y = 2/\pi \sin \alpha$ касательная параллельна оси Ox .

Зависимости (6) при различных углах α изображены на рис. 6.

Площадь круглого сечения, перпендикулярного оси Ox , является функцией координаты x :

$$F(x) = \pi y^2(x).$$

Объём области S_0 зависит от угла α и вычисляется как определённый интеграл:

$$V_0(\alpha) = \int_{-\cos \alpha}^{\cos \alpha} F(x) dx = \frac{4}{\pi} \sin^2 \alpha \int_{-\cos \alpha}^{\cos \alpha} \cos^2 \left(\frac{\pi x}{2 \cos \alpha} \right) dx = \frac{4}{\pi} \sin^2 \alpha \cos \alpha.$$

Максимальный объём области S_0

$$V_{0 \max} = \frac{8}{3\pi\sqrt{3}} \approx 0,49$$

обеспечивается выбором угла $\alpha = \operatorname{arctg} \sqrt{2}$ ($\alpha \approx 54,7^\circ$).

График зависимости от угла α функции

$$\frac{V_0}{V_{0 \max}} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \sin^2 \alpha \cos \alpha$$

приведён в [4].

Коэффициент χ_{\min} равен радиусу r_0 окружности, вписанной в сечение области S_0 , и радиусу вписан-

ной сферы. При изменении угла α меняется не только радиус вписанной сферы, но и положение точек касания.

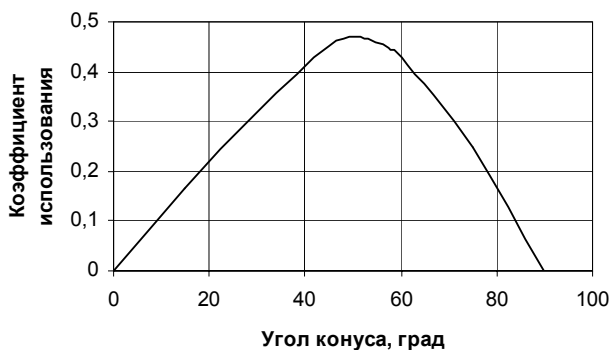


Рис. 7. Зависимость χ_{\min} от угла α

Зависимость коэффициента χ_{\min} от угла α построена на рис. 7. Видно, что функция $\chi_{\min}(\alpha)$ имеет пологий максимум. При изменении угла конуса в диапазоне от 45 до 60° χ_{\min} отличается от $\chi^* \approx 0,4705$ не более, чем на 5%.

При сравнении различных маховичных систем, удовлетворяющих одним и тем же техническим требованиям, предпочтение следует отдавать системам, обеспечивающим максимальный объём области S . Другим критерием для сравнения является радиус вписанной сферы r_0 . По этим же показателям можно судить об относительном ухудшении свойств системы при выходе из строя отдельных двигателей-маховиков.

Заключение. С учётом результатов, полученных в [4], можно представить зависимость коэффициента χ_{\min} от числа двигателей-маховиков n . Если установочный угол конуса выбрать равным 54,7°, то минимальный коэффициент использования кинетического момента маховичных систем с числом двигателей-маховиков $n = 3, 4, 5, 6, \dots, n \rightarrow \infty$ составит, соответственно, $\chi_{\min} \approx 0,33; 0,4075; 0,434; 0,445; \dots$,

0,4705. Полученный ряд показывает, что коэффициент χ_{\min} избыточных систем слабо зависит от числа двигателей-маховиков и определяется в основном установочным углом α . Выбор угла α в диапазоне 45 – 60° гарантирует коэффициент использования кинетического момента не менее 0,43. Следует отметить, что по этому показателю маховичные системы уступают гиросиловым системам [3].

Литература

1. Васильев В.Н. Исследование свойств системы двухступенных силовых гироскопов / В.Н. Васильев. – М.: Известия АН СССР. МТТ. – 1982. – №5.
2. Васильев В.Н. Обобщенные характеристики гиросиловых систем управления / В.Н. Васильев, Д.М. Вейнберг, С.И. Злочевский // Космические исследования. – М., 1991. – Т. 29. – Вып. 2.
3. Токарёв Е. Н. О рациональном построении систем гиросиловых стабилизаторов / Е. Н. Токарёв. – Космические исследования. – М., 1978. – Т. 16. – Вып. 1.
4. Беленький А.Д. Исследование свойств избыточных систем электродвигателей-маховиков / А.Д. Беленький, В.Н. Васильев, М.Ю. Лебедева [и др.]. // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т. 102.
5. Карпачев Ю.А. Управление ориентацией космических аппаратов с произвольно-избыточной структурой одноосных электромаховичных двигателей / Ю.А. Карпачев, М.А. Павловский // Космические исследования. – М., 1987. – Т. 25. – Вып.4.
6. Беленький А.Д. Управление минимально избыточной системой электродвигателей-маховиков / А.Д. Беленький, В.Н. Васильев – М.: Известия РАН. МТТ, 1996. – №2.
7. Беленький А.Д. Управление избыточной системой электродвигателей-маховиков / А.Д. Беленький, В.Н. Васильев, М.Е. Семенов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т.102.
8. Аронзон А.Н. Моментные характеристики минимально избыточной системы электродвигателей-маховиков / А.Н. Аронзон, А.Д. Беленький, В.Н. Васильев [и др.]. // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2005. – Т.102.

Поступила в редакцию 20.01.2009

*Арон Давыдович Беленький, канд. техн. наук, начальник лаборатории, т. 366-21-22.
Владимир Николаевич Васильев, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, т. 366-21-22.
Максим Евгеньевич Семёнов, ведущий инженер, т. 366-21-22.
E-mail: vniiem@vniiem.ru.*