

Канд. техн. наук А.Н.Аронзон, канд. техн. наук А.Д.Беленький,
канд. техн. наук В.Н.Васильев, инж. М.Е.Семенов

МОМЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МИНИМАЛЬНО ИЗБЫТОЧНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ-МАХОВИКОВ

Приводятся экспериментальные моментные и частотные характеристики маховичной системы, в состав которой входят четыре электродвигателя-маховика ДМ1-20 [1]. Система предназначена для управления ориентацией малого космического аппарата (МКА).

Схема установки двигателей-маховиков. Посадочные плоскости двигателей-маховиков (ДМ) задаются уравнениями в отрезках на осях связанной системы координат МКА

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1,$$

где a, b, c – отрезки, отсекаемые посадочной плоскостью на осях координат с учетом знака.

Уравнения посадочных плоскостей четырех ДМ:

$$\begin{aligned}x + y + \sqrt{2}z &= 1; \\-x + y + \sqrt{2}z &= 1; \\-x - y + \sqrt{2}z &= 1; \\x - y + \sqrt{2}z &= 1.\end{aligned}$$

Направляющие косинусы осей вращения ДМ вычисляются по формулам

$$\cos\alpha_1 = 1/ad, \quad \cos\alpha_2 = 1/bd, \quad \cos\alpha_3 = 1/cd,$$

где

$$d = \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} + \frac{1}{c^2}}.$$

Такая схема установки обеспечивает по осям МКА Ox, Oy и Oz изменение кинетических моментов маховичной системы в диапазонах $\pm 2H_*$, $\pm 2H_*$ и $\pm 2\sqrt{2}H_*$, где H_* – максимальный кинетический момент одного ДМ.

Для проведения испытаний маховичная система установлена на специальной подставке, имеющей форму усеченной четырехугольной пирамиды (рис. 1). Два ДМ расположены снаружи, два других - внутри подставки. Оси вращения ДМ перпендикулярны боковым граням пирамиды. Конструкция подставки обеспечивает точное взаимное угловое расположение посадочных мест двигателей-маховиков на МКА.



Рис.1. Маховичная система

Алгоритм управления. Пусть m_i ($i = 1, 2, 3, 4$) – требуемые управляющие моменты ДМ, образующие вектор $\mathbf{m} = (m_1, m_2, m_3, m_4)$, $\mathbf{M} = (m_x, m_y, m_z)$ – требуемые управляющие моменты маховичной системы по осям стабилизации. Алгоритм управления избыточной системой минимизирует сумму квадратов управляющих моментов маховиков. В этом случае связь между векторами \mathbf{m} и \mathbf{M} определяется соотношением [1]

$$\mathbf{m} = (A^T A)^{-1} A^T \mathbf{M}, \quad (1)$$

где

$$A = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{vmatrix} -$$

3×4 – матрица направляющих косинусов осей вращения ДМ.

Раскрывая равенство (1), получим формулы для расчета требуемых управляющих моментов ДМ

$$\begin{aligned} m_1 &= 1/2 m_x + 1/2 m_y + \sqrt{2}/4 m_z; \\ m_2 &= -1/2 m_x + 1/2 m_y + \sqrt{2}/4 m_z; \\ m_3 &= -1/2 m_x - 1/2 m_y + \sqrt{2}/4 m_z; \\ m_4 &= 1/2 m_x - 1/2 m_y + \sqrt{2}/4 m_z. \end{aligned} \quad (2)$$

При отказе одного ДМ (например ДМ №2 с направляющими косинусами $\cos\alpha_1 = -1/2$, $\cos\alpha_2 = 1/2$, $\cos\alpha_3 = 1/\sqrt{2}$) формулы для расчета требуемых управляющих моментов ДМ примут вид

$$\begin{aligned} m_1 &= m_y + \sqrt{2}/2 m_z; \\ m_2 &= 0; \\ m_3 &= -m_x + \sqrt{2}/2 m_z; \\ m_4 &= m_x - m_y. \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогичные формулы используются при отказах других ДМ.

Схема эксперимента. Испытываемая маховичная система (блок электромеханики) состоит из четырех ДМ и механического адаптера-подставки. Оси координат подставки совпадают со связанными осями МКА.

Цель экспериментов – комплексная оценка управляющих возможностей минимально избыточной системы двигателей-маховиков МКА. Проверка охватывает работу трех каналов стабилизации, включая логику управления ДМ. Для проведения комплексных экспериментов создан стенд динамических испытаний. В его состав входят (рис.2) стенд динамического моделирования, силоизмерительная платформа Kistler типа 9281В с блоком электроники, персональная ЭВМ с платой аналого-цифрового преобразования (АЦП), узкополосный частотный анализатор «Брюль и Кьер» типа 2033, частотомер, блок питания и коммутации.

Стенд динамического моделирования (СДМ) представляет собой программно-аппаратный комплекс, выполненный на базе ПЭВМ, и предназначен для реализации алгоритмов управления маховичной системой в штатном режиме (2) и при отказах (3). Величины требуемых управляющих моментов преобразуются в ШИМ-сигналы, подаваемые на входы ДМ [2]. Каждый ШИМ-сигнал характеризуется периодом опорных импульсов T и величиной задержки измерительного импульса относительно опорного



Рис. 2. Блок-схема стенда динамических испытаний

$$\tau_i = \begin{cases} 20 \text{ мкс, если } 0 \leq |m_i|/m_* \leq 0,02/0,8T; \\ 0,8T |m_i|/m_*, \text{ если } 0,02/0,8T < |m_i|/m_* \leq 1; \\ 0,8T, \text{ если } |m_i|/m_* > 1, \end{cases}$$

где $i = 1,2,3,4$ – номер ДМ, $T = 1 \text{ мс}$, $m_* = 0,02 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – максимальный управляющий момент двигателя-маховика ДМ1-20.

Силовой измерительная платформа [3] включена в стенд динамических испытаний для измерения компонент вектора управляющего момента маховичной системы относительно системы трех ортогональных осей. Измерительные сигналы пьезоэлектрических датчиков платформы поступают в блок усилителей заряда, содержащих полосовые фильтры, а затем на многоканальную плату АЦП компьютера. Сбор и обработку измерительной информации осуществляет стандартное программное обеспечение, поставляемое вместе с платой АЦП, и дополнительно разработанное программное обеспечение, существенно расширяющее возможности системы.

Изучение управляющих свойств маховичной системы производилось путем измерения и обработки временных зависимостей крутящих моментов, создаваемых относительно трех осей платформы. Блок электромеханики устанавливался так, чтобы его оси были параллельны осям силовой измерительной платформы.

Для контроля величин крутящего момента по одной из осей и оперативного выявления его частотных составляющих используется узкополосный частотный анализатор «Брюль и Кьер» типа 2033.

При помощи цифрового частотомера определяются угловые скорости и кинетические моменты ДМ.

Блок питания и коммутации предназначен для подключения блока электромеханики к сети, включения и отключения отдельных ДМ.

Входными переменными стенда являются сигналы требуемых управляющих моментов маховичной системы относительно трех связанных осей МКА. Параметры управляющих моментов, параметры алгоритма вычислений, номер отказавшего ДМ и время испытаний задаются с клавиатуры СДМ и выводятся для контроля на экран дисплея.

Выходными переменными стенда являются компоненты вектора управляющего момента маховичной системы относительно трех осей силоизмерительной платформы, регистрируемые в виде переходных процессов в запоминающем устройстве ПЭВМ или в виде частотного спектра на выходе спектрального анализатора.

Результаты экспериментов. Требуемые управляющие моменты маховичной системы относительно связанных осей МКА формируются в виде переменных сигналов, изменяющихся по гармоническому закону

$$m_x(t) = m_{x1} \sin \omega_x t ;$$

$$m_y(t) = m_{y1} \sin \omega_y t ;$$

$$m_z(t) = m_{z1} \sin \omega_z t ,$$

где t – время.

Амплитуды m_{x1} , m_{y1} , m_{z1} и частоты ω_x , ω_y , ω_z требуемых моментов задаются с клавиатуры.

Выходные сигналы регистрирующих устройств силоизмерительной платформы помимо полезного сигнала содержат помеху. Чтобы уменьшить влияние помехи, результаты измерений (несколько реализаций одного процесса) подвергались дополнительной обработке. Помеха представлялась в виде суммы трех составляющих: случайной постоянной, линейно нарастающей и шума. На первом этапе из каждой выборки исключались постоянная и линейная составляющие помехи. На втором этапе путем синфазного сложения обработанных реализаций определялось «среднее» значение полезного сигнала. Это позволило снизить влияние шума. При помощи быстрого преобразования Фурье определялись частота и амплитуда полезного сигнала.

Испытания одного ДМ (№1) маховичной системы с направляющими косинусами $\cos\alpha_1 = 1/2$, $\cos\alpha_2 = 1/2$, $\cos\alpha_3 = 1/\sqrt{2}$ позволили установить общий коэффициент передачи стенда, включая ДМ. На вход ДМ подавался низкочастотный гармонический сигнал требуемого управляющего момента с амплитудой 0,014 Н·м. Измеряемые моменты M_x , M_y и M_z по осям Ox , Oy и Oz силоизмерительной платформы изображены на рис. 3. Амплитуда фактического момен-

та, создаваемого ДМ вокруг оси вращения, вычисляется как корень квадратный из суммы квадратов амплитуд измеренных моментов. Коэффициент передачи, определяемый как отношение амплитуд фактического и требуемого моментов, равен 1,1.

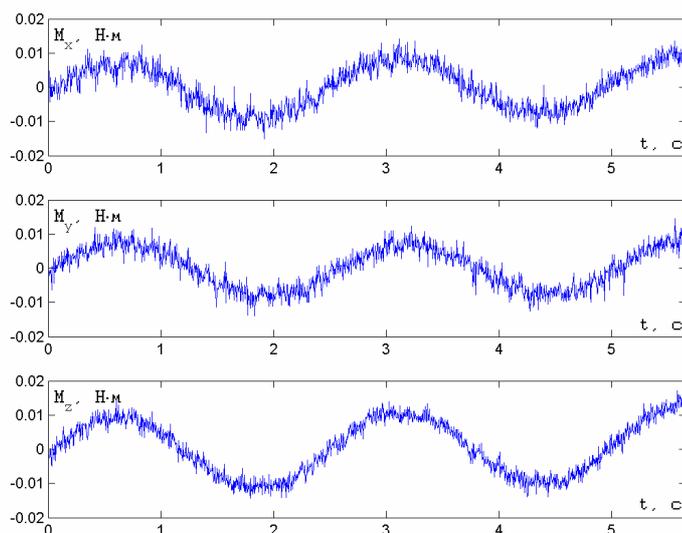


Рис. 3. Управляющие моменты одного ДМ

В процессе испытаний требуемые моменты задавались по каждой из трех осей стабилизации МКА. При задании требуемого момента по оси Ox моменты, регистрируемые по осям Oy и Oz , характеризуют наличие или отсутствие перекрестных связей между каналами стабилизации. Причиной перекрестных связей могут быть погрешности изготовления механического адаптера-подставки, неточности установки подставки с ДМ на силоизмерительной платформе, ошибки алгоритма управления. Неточность установки на силоизмерительной платформе меньше всего проявляется при задании требуемого момента по оси Oz , перпендикулярной посадочной плоскости платформы. Измеряемые моменты M_x , M_y и M_z по осям Ox , Oy и Oz силоизмерительной платформы при задании требуемого момента только по оси Oz , т.е. при $m_x(t) = m_y(t) = 0$, изображены на рис. 4. На вход маховичной системы подавался низкочастотный гармонический сигнал требуемого управляющего момента с амплитудой $m_{z1} = 0,056$ Н·м, что соответствует максимальным возможностям системы по оси Oz . Преобразование входного сигнала требуемого момента осуществлялось с коэффициентом

передачи, равным 1,1. Фактические моменты, действующие по поперечным осям, малы и по этой причине практически не различимы на фоне помех измерительной системы. Среднеквадратическое значение помех не превышает 0,002 Н·м.

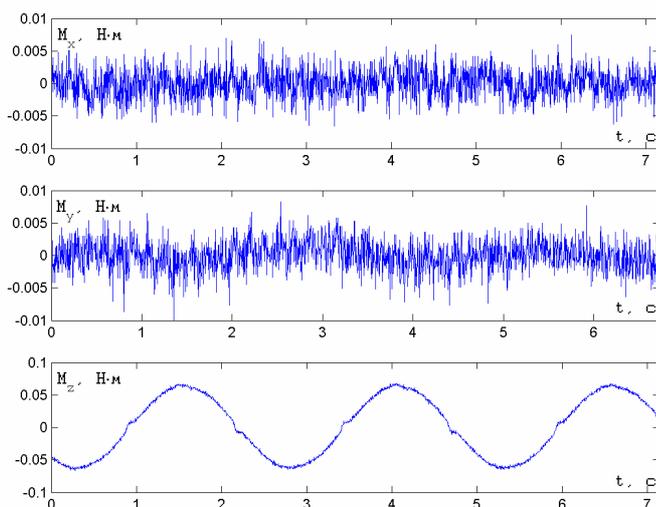


Рис. 4. Управляющие моменты маховичной системы при $m_{z1} = 0,056$ Н·м

Установлено, что сигналы, регистрируемые по поперечным осям, слабо зависят от амплитуды m_{z1} . Например при уменьшении вдвое амплитуды m_{z1} характер процессов по поперечным осям не изменяется (рис. 5). Это говорит о том, что сигналы по поперечным осям не связаны с наличием перекрестных связей между каналами стабилизации. Аналогичные результаты получены при задании требуемых моментов по осям Ox и Oy (при $m_z = 0$).

Проверялось функционирование системы при отказе одного ДМ с произвольным номером. При этом появления перекрестных связей между каналами стабилизации не наблюдалось. Результаты испытания маховичной системы при имитации отказа ДМ №2 с направляющими косинусами $\cos\alpha_1 = -1/2$, $\cos\alpha_2 = 1/2$, $\cos\alpha_3 = 1/\sqrt{2}$ изображены на рис. 6. На вход маховичной системы подавался низкочастотный гармонический сигнал требуемого управляющего момента с амплитудой $m_{z1} = 0,028$ Н·м. Характер процессов по сравнению с работой маховичной системы в штатном режиме при том же входном воздействии (рис. 5) не изменился.

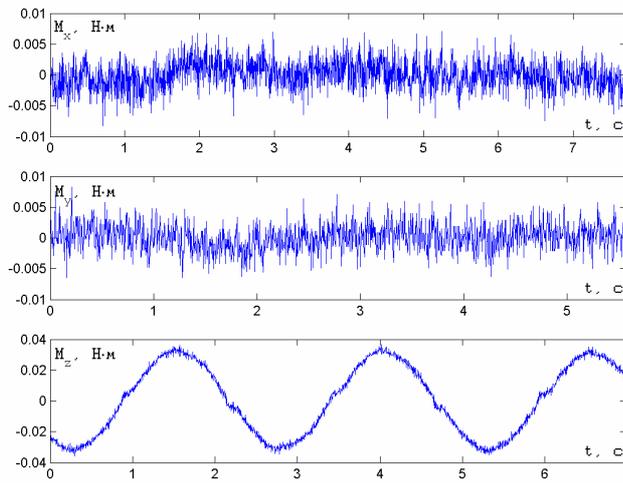


Рис. 5. Управляющие моменты маховичной системы при $m_{z1} = 0,028$ Н·м

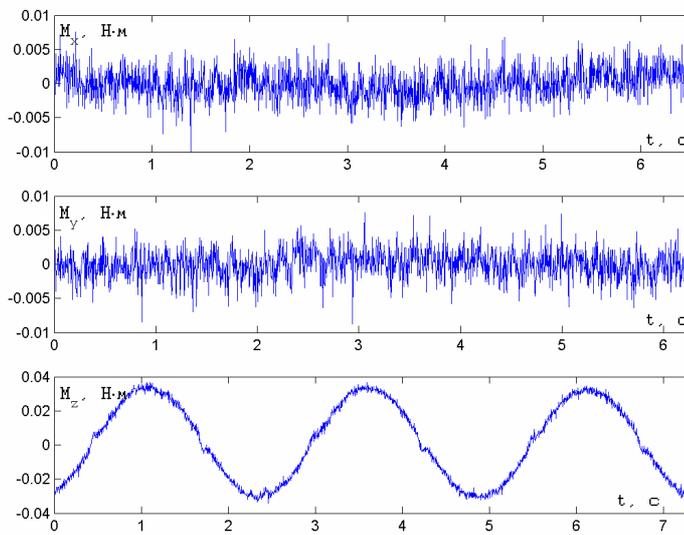


Рис. 6. Управляющие моменты маховичной системы при отказе одного ДМ

Для построения частотных характеристик маховичной системы частота входного гармонического сигнала варьировалась в диапазоне от 0,4 до 8 Гц. Требуемые моменты поочередно задавались по трем осям стабилизации $m_{x1} = 0,04$ Н·м, $m_{y1} = 0,04$ Н·м, $m_{z1} = 0,056$ Н·м. При заданной амплитуде входного сигнала строилась зависимость коэффициента передачи системы от частоты $K(\omega)$. Экспериментальные частотные характеристики аппроксимировались амплитудной частотной характеристикой линейного звена второго порядка с передаточной функцией

$$W(s) = k/(T_1s + 1)(T_2s + 1).$$

Параметры передаточной функции k , T_1 и T_2 определялись с использованием метода наименьших квадратов по экспериментальным частотным характеристикам. Аппроксимирующая амплитудная частотная характеристика, построенная по трем реализациям экспериментальных частотных характеристик, изображена на рис. 7.

В результате обработки определены параметры передаточной функции $k = 1,13$; $T_1 = 0,12$ с; $T_2 = 0,012$ с.

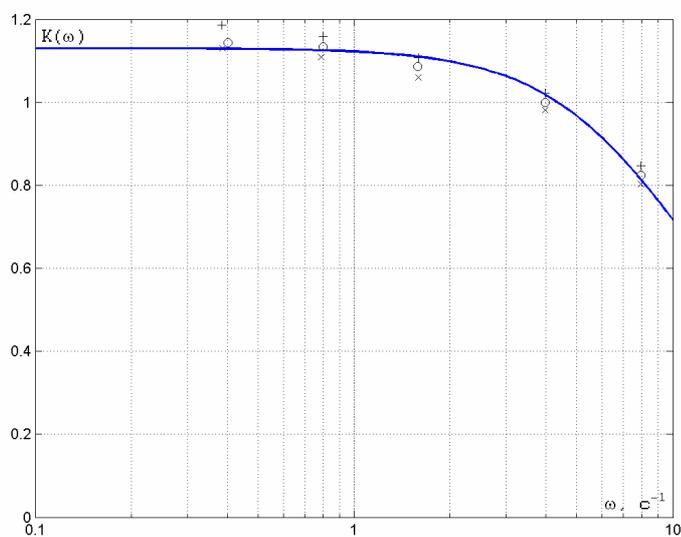


Рис. 7. Амплитудная частотная характеристика маховичной системы

Следует отметить, что построенная частотная характеристика отражает динамические свойства не только маховичной системы, но и силоизмерительной платформы. Одна из методических погрешностей эксперимента связана с ограничениями, которые вносят полосовые фильтры чувствительных элементов силоизмерительной платформы. Фильтры с полосой пропускания 10 Гц не влияют на частотную характеристику в области низких частот и вносят заметную погрешность в диапазоне частот 1 – 8 Гц. Следующий набор фильтров с полосой пропускания 1 кГц, входящий в комплект системы, не обеспечивает требуемого подавления шумов.

Заключение

Выполненные эксперименты подтвердили работоспособность алгоритмов управления маховичной системой в штатном режиме и при отказах ДМ. Перекрестные связи между каналами стабилизации не заметны на уровне шумовых помех. Механический адаптер-подставка реализует схему установки ДМ на МКА с заданной точностью. Динамические свойства маховичной системы обеспечивают создание быстродействующих систем ориентации. Для уточнения частотных характеристик маховичной системы желательно дополнительно оснастить измерительный стенд фильтрами с полосой пропускания 20, 50 и 100 Гц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беленький А.Д., Васильев В.Н. Управление минимально избыточной системой электродвигателей-маховиков. М.: Известия РАН. МТТ. №2. 1996. С. 75-81.
2. Журавлев В.Я., Кузьмин В.Н., Михайлов Е.М., Рудобаба Е.П., Стома С.А. Электродвигатель-маховик постоянного тока. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 78. С. 67-74. 1985.
3. Малаховский Е.Е. и др. Метод определения возмущающих моментов от сложных приводных устройств. М.: Труды ВНИИЭМ. Т. 86. С. 20-27. 1988.