

Н. А. МУХОЕД

Украина, НТУУ «Киевский политехнический институт»  
E-mail: Natalya.Muhoid@ucrf.gov.ua

Дата поступления в редакцию  
21.02—25.09 2003 г.

Оппоненты к. т. н. В. К. ЛОПУШЕНКО  
(МНИИПМ "Ритм", г. Киев),  
к. т. н. В. С. ГОЛУБ (НПФ VD MAIS, г. Киев)

## ВЫБОР БАЗОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУХОСНОГО МУЛЬТИСЕНСОРНОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ДАТЧИКА

*Представлены основные результаты выбора базовых элементов при проектировании двухосного мультисенсорного инерциального датчика на отдельных акселерометрах.*

В настоящее время широкое распространение получили мультисенсорные датчики, когда к одному преобразователю подключается ряд чувствительных элементов (сенсоров), воспринимающих различные или однотипные величины. В связи с этим представляется актуальной разработка мультисенсорного инерциального датчика (МИД) для системы управления маневренными летательными аппаратами (ЛА) с совмещением измерителя линейного ускорения и угловой скорости в одном линейном акселерометре.

Исследования в области построения мультисенсорных датчиков проводятся с начала 1980-х годов, когда в работе [1] был предложен метод измерения акселерометром линейного ускорения и угловой скорости подвижного объекта. Акселерометр совершает вынужденное относительное колебательное движение с постоянной заданной частотой и амплитудой, а также угловое движение вместе с ЛА. При этом линейное ускорение измеряется акселерометром непосредственно, а угловая скорость — посредством измерения ускорения Кориолиса  $w_c$ , возникающего при создании требуемой относительной линейной скорости движения акселерометра и наличии переносной угловой скорости движения ЛА. Требуемое колебательное движение, которое задается акселерометру, может быть реализовано в виде вращательного или поступательно-вибрационного движения.

Следует различать два принципиально разных типа мультисенсорных датчиков: микромеханические датчики (акселерометры и привод изготовлены по технологии микромеханической обработки на общей пластине кремния) и датчики, построенные на отдельных акселерометрах. Работающий макет мультисенсорного датчика на отдельных акселерометрах [2] был построен в ОАО «Раменское приборостроительное КБ» (Россия). Этот макет имеет две оси чувствительности: по угловой скорости — перпендикулярную плоскости планшайбы поворотного стола, по линейному ускорению — перпендикулярную плоскости планшайбы для установки акселерометров. В качестве привода использовался магнитоэлектрический двигатель. Вибрация акселерометров проводилась на частотах,

близких к собственной частоте вибропривода. В качестве чувствительного элемента использовались акселерометры собственного производства. Достигнутый порог чувствительности по угловой скорости составил  $0,1 \text{ }^\circ/\text{с}$  в диапазоне измерения линейного ускорения  $\pm 20g$ .

Вместе с тем анализ публикаций показал, что при рассмотрении вопросов создания мультисенсорного датчика для измерения линейного ускорения и угловой скорости остаются нерешенными вопросы проектирования МИД различных схем построения для определенных классов ЛА.

Одним из ответственных этапов проектирования в разработке современных датчиков является выбор базовых элементов. Такой выбор предполагает определение физического принципа действия, функциональной схемы, тактико-технических характеристик этих базовых элементов. От правильности выбора базовых элементов зависят чувствительность и точность проектируемого датчика, которые должны удовлетворять требованиям, предъявляемым в сфере его применения. Целью этой статьи является выбор и расчет параметров работы акселерометра и приводного механизма для МИД, параметры которого представлены в табл. 1, на основании требований к базовым элементам, изложенным в работе [3].

Таблица 1

Параметр	Канал измерения линейного ускорения	Канал измерения угловой скорости
Диапазон измерения	$\pm 50 g$	$\pm 300 \text{ }^\circ/\text{с}$
Погрешность измерения, приведенная к верхнему пределу	$\leq 2\%$	$5 \div 10\%$
Порог чувствительности	$10^{-3} g$	$3 \text{ }^\circ/\text{с}$
Полоса пропускания	30 Гц	30 Гц

### Схема построения двухосного мультисенсорного датчика

В случае реализации схемы построения двухосного МИД, содержащего два измерительных элемента (по одному акселерометру на каждую ось), вибрационные движения акселерометров вызывают силы реакции, действующие на основание МИД. Чтобы исключить действие этих нежелательных сил, можно установить по каждой оси балансировочную массу, вибрирующую синхронно, что усложняет конструкцию механической части датчика. Однако если уста-

новить вместо балансирующей массы еще один акселерометр (по каждой из осей), то усложнение конструкции механической части датчика будет оправдано возрастанием точности измерения и чувствительности по каналам угловой скорости и линейного ускорения в два раза.

Кроме того, использование пары линейных акселерометров для одновременного измерения компоненты переносного линейного ускорения по одной оси и компоненты переносной угловой скорости по другой оси ЛА позволяет:

— выделить из выходных сигналов акселерометров сигналы, пропорциональные линейному ускорению и угловой скорости;

— осуществить требуемое усиление достаточно малого по величине переменного сигнала, зависящего от угловой скорости.

Поэтому в качестве инерциальных чувствительных элементов базовая схема построения двухосного МИД содержит четыре линейных акселерометра (рис. 1). Оси чувствительности (они же — измерительные оси) акселерометров  $A^1$  и  $A^2$  параллельны оси  $x_3$  ЛА, но противоположно направлены. У акселерометров  $A^3$  и  $A^4$  оси чувствительности параллельны оси  $x_1$  ЛА и также противоположно направлены. Акселерометры установлены на основании, которое при помощи приводного механизма совершает относительно поступательно-вибрационное движение с постоянной частотой  $\omega_B = 2\pi f_B$  вдоль оси  $x_2$  ЛА, где  $f_B$  — частота генерируемых синусоидальных сигналов.

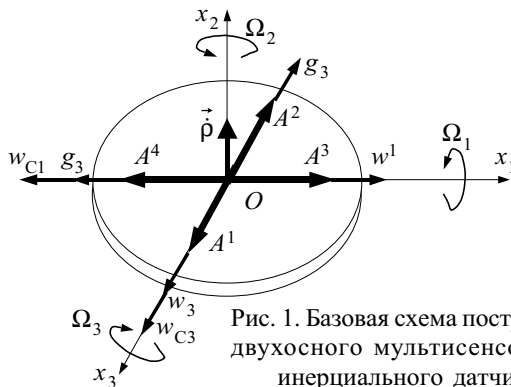


Рис. 1. Базовая схема построения двухосного мультисенсорного инерциального датчика

В случае, когда ЛА совершает пространственное переносное движение с линейным ускорением  $\vec{w}_e = \{w_1; w_2; w_3\}$  и угловой скоростью  $\vec{\Omega} = \{\Omega_1; \Omega_2; \Omega_3\}$ , кажущиеся ускорения, измеряемые парой акселерометров  $A^1$  и  $A^2$  и парой акселерометров  $A^3$  и  $A^4$ , определяются, соответственно, следующими выражениями:

$$a^{1,2} = \pm(w_3 - g_3) + 2\Omega_1 x_0 \omega_B \cos \omega_B t + (\Omega_2 \Omega_3 + \dot{\Omega}_1) x_0 \sin \omega_B t;$$

$$a^{3,4} = \pm(w_1 - g_1) - 2\Omega_3 x_0 \omega_B \cos \omega_B t + (\Omega_1 \Omega_2 - \dot{\Omega}_3) x_0 \sin \omega_B t,$$
(1)

где в парных знаках «±» знак «+» соответствует акселерометрам  $A^1$  и  $A^3$ , а знак «-» — акселерометрам  $A^2$  и  $A^4$ ;

$g_1, g_3$  — проекции вектора ускорения силы тяготения Земли на оси  $x_1$  и  $x_3$  ЛА;

$\vec{\Omega}$  — вектор углового ускорения;

$x_0$  — амплитуда вибрации, описываемой вектором относительного движения  $\vec{\rho} = \{0; x_0 \sin \omega_B t; 0\}$ ;

$t$  — время.

Разделение информации о компонентах переносных линейного ускорения и угловой скорости происходит путем построения отдельных каналов по линейному ускорению и угловой скорости в системе обработки выходных сигналов акселерометров. Принцип разделения информации о компонентах линейного ускорения и угловой скорости и функциональная схема электронного процессора описаны в работе [3]. Преимущество предложенного принципа состоит в том, что большинство возмущающих влияний от неизмеряемых кинематических параметров движения акселерометра, возникающих в выходном сигнале акселерометра, обнуляется при интегрировании по полному периоду вибрации.

На примере пары акселерометров  $A^1$  и  $A^2$  представлены основные выражения оценок разделения информации о компонентах переносных линейного ускорения и угловой скорости.

Как видно из выражения (1), выходные сигналы  $a^1$  и  $a^2$  акселерометров  $A^1$  и  $A^2$  содержат постоянную или медленно меняющуюся составляющую, пропорциональную линейному ускорению  $w_3$ , и гармоническую составляющую (на достаточно высокой частоте  $\omega_B$  вибрации привода, которая на порядок выше собственной частоты движения объекта), амплитуда которой пропорциональна угловой скорости  $\Omega_1$  колебания акселерометра.

В результате предварительного вычитания выходных сигналов акселерометров  $A^1$  и  $A^2$  по каналу линейного ускорения формируется разность, которая в дальнейшем, после интегрирования по полному периоду вибрации  $T = 2\pi/\omega_B$ , и является выходным сигналом электронного процессора по каналу линейного ускорения. Оценка  $\hat{w}_3$  измеряемой составляющей  $w_3$  вектора переносного линейного ускорения описывается выражением

$$\hat{w}_3 = \frac{1}{T} \int_0^T (a^1 - a^2) dt = 2(w_3 - g_3).$$
(2)

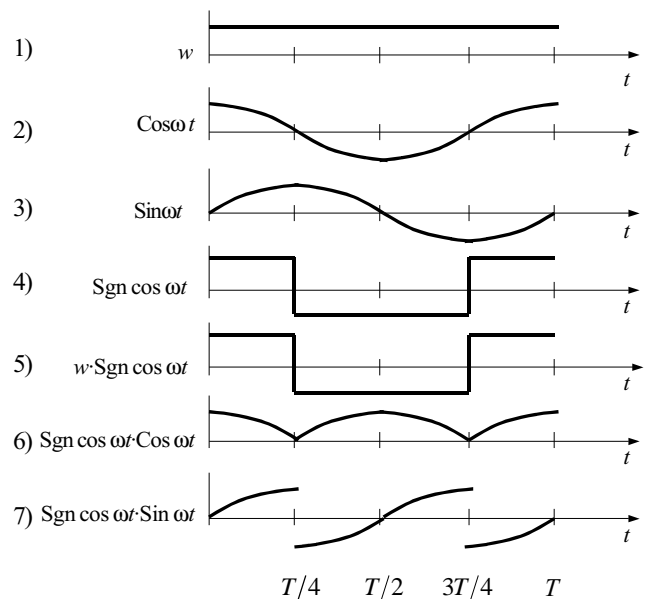


Рис. 2. Диаграммы, поясняющие работу электронного процессора

По каналу угловой скорости  $\Omega_1$  для исключения достаточно большой постоянной составляющей, пропорциональной поступательному ускорению  $w_3$ , выполняется предварительное сложение выходных сигналов акселерометров. При этом формируется достаточно малый по величине переменный сигнал, зависящий от угловой скорости  $\Omega_1$ :

$$a^1 + a^2 = 4\Omega_1 x_0 \omega_b \cos \omega_b t + 2(\Omega_2 \Omega_3 + \dot{\Omega}_1) x_0 \sin \omega_b t. \quad (3)$$

После усиления этого сигнала на требуемый коэффициент  $k_y$ , выражение (3) для получения сигнала с постоянной составляющей по угловой скорости  $\Omega_1$  модулируется по функции  $\text{Sign} \cos \omega_b t$  (см. рис. 2). В результате последующего интегрирования по периоду  $T$  получается сигнал, линейно зависящий от измеряемой составляющей  $\Omega_1$  вектора переносной угловой скорости. Значение оценки переносной угловой скорости  $\hat{\Omega}_1$  на выходе электронного процессора по каналу переносной угловой скорости описывается выражением

$$\hat{\Omega}_1 = \frac{k_y}{16x_0} \int_0^T (a^1 + a^2) \text{Sign} \cos \omega_b t dt = 2k_y \Omega_1. \quad (4)$$

Подробно принцип измерения акселерометром переносных линейного ускорения и угловой скорости ЛА в связанной с ним системе координат рассмотрен в работе [3].

**Акселерометр**

Выбор акселерометра осуществляется исходя из требуемых значений характеристик датчика, представленных в табл. 2. Верхний предел измерения акселерометра должен обеспечить требуемые значения не только верхнего предела измерения линейного ускорения, но и кориолисова ускорения, соответствующего верхнему пределу измерения угловой скорости. Пороговая чувствительность акселерометра определяется наименьшим из полезных сигналов — минимального линейного ускорения ЛА и минимального кориолисова ускорения акселерометра. Требования по полосе пропускания предьявляется исходя из условия обеспечения минимальных амплитудных и фазовых искажений на выходе датчика.

Таблица 2

Верхний предел измерения	55 g
Погрешность измерения	≤ 0,5%
Порог чувствительности	5 · 10 <sup>-4</sup> g
Полоса пропускания	400÷500 Гц

На основании вышесказанного для построения двухосного МИД рекомендуется применить прецизионный малагабаритный маятниковый компенсационный акселерометр (МКА) с торсионным упругим подвесом чувствительного элемента. Этот электромеханический МКА предназначен для бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) и управления движением беспилотными высокоманевренными ЛА и имеет следующие технические характеристики [4]:

- диапазон измерения ±75 g;
- порог чувствительности 10<sup>-4</sup> g;
- класс точности 0,01%;

- габаритные размеры 30×21×23 см;
- масса не более 50 г.

Аналогами данного МКА являются современные маятниковые компенсационные акселерометры типа А-4 (фирма Litton, США) и АК-5 (НПО «Темп», Россия), которые используются в комбинированных (инерциальное наведение — самонаведение) системах наведения (СН) авиационных ракет на участке работы БИНС СН. Акселерометры этого типа достаточно свободно (без специальных сложных конструктивных доработок) обеспечивают любой требуемый диапазон измерения, имеют повышенную точность, малые (по сравнению с электромеханическими МКА с монокристаллическим балочным упругим подвесом чувствительного элемента) габариты, массу, стоимость, технологичны в сборке и настройке, обеспечивают высокую прочность и устойчивость к вибрационным и ударным действиям.

Базовая функциональная схема МКА показана на рис. 3. Датчик акселерометра конструктивно объединяет маятниковый чувствительный элемент (ЧЭ), выполненный в виде бескаркасной рамки 1, подвешенной на металлическом торсионном упругом подвесе (УП) 3 в основании акселерометра 2, и измерительную систему 4 дифференциального индуктивного вихрекового датчика перемещений (ДП) инерционной массы ЧЭ. Рамка ЧЭ является одновременно инерционной массой и катушкой магнитоэлектрического обратнo-компенсационного преобразователя (МЭ ОКП). Токoподводами к катушке ОКП является металлический торсион УП, образующий токовую цепь для подключения рамки в контур формирования момента силы обратной связи  $F_{oc}$ . Измерительная система вихрекового ДП состоит из двух закрепленных в основании неподвижных катушек 5 и электропроводного флажка 6, жестко закрепленного на рамке и совершающего с ней относительное угловое перемещение. От этого перемещения зависят комплексные сопротивления катушек, преобразуемые далее измерительной цепью в выходной сигнал ДП в виде напряжения постоянного тока. МЭ ОКП, входящий в цепь силовой компенсации, содержит два постоянных магнита 7, магнитопровод-основание 2 и катушку-рамку 1, нижняя грань которой перемещается в прямоугольном зазоре магнитной системы, имеющем магнитную индукцию  $B$ .

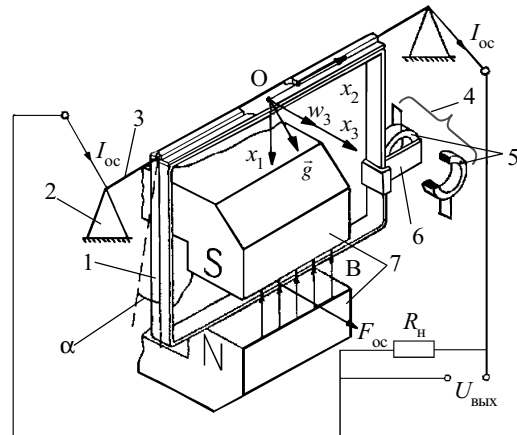


Рис. 3. Базовая функциональная схема МКА с торсионным УП ЧЭ

Функционирование МКА представлено работой акселерометра на примере основной рабочей координаты  $\alpha$  ЧЭ. Измерительная ось МКА параллельна оси  $x_3$ . При движении корпуса МКА с постоянным линейным ускорением  $w_3$  возникает сила инерции вследствие ускоренного движения инерционной массы в абсолютном пространстве. Тогда равновесному положению инерционной массы при отклонении от нейтрали  $x_1$  будет соответствовать такой угол  $\alpha$ , при котором момент силы инерции  $M_{\text{и}}$  уравновешивается моментом сил упругости торсиона. Перемещение электропроводной подвижной пластины на угол  $\alpha$  преобразуется в электрический сигнал ДП — напряжение  $U_{\text{дп}}$ , однозначно зависящее от угла  $\alpha$ .  $U_{\text{дп}}$  поступает в усилительно-корректирующее звено (УКЗ), на выходе которого формируется постоянный электрический ток  $I_{\text{ос}}$ . Ток подается на обмотки МЭ ОКП. В результате взаимодействия  $I_{\text{ос}}$  с полем постоянных магнитов возникает уравновешивающее усилие  $F_{\text{ос}}$ . Возникающий от силы  $F_{\text{ос}}$  момент  $M_{\text{ос}}$  непрерывно автоматически компенсирует  $M_{\text{и}}$  с помощью контура отрицательной обратной связи.  $I_{\text{ос}}$  и падение напряжения  $U_{\text{вых}}$ , создаваемое этим током на эталонном сопротивлении нагрузки  $R_{\text{н}}$ , пропорциональны измеряемому ускорению  $w_3$ .

Математическая модель указанного акселерометра представлена в работе [4].

Полоса пропускания акселерометра на уровне 400 Гц обеспечивается путем синтеза УКЗ, содержащегося в составе электронного модуля МКА (выполненного в виде гибридной интегральной схемы). Использование метода синтеза на основании частотных критериев качества обусловлено тем, что построение желаемой логарифмической амплитудно-частотной характеристики значительно упрощается, если качество регулирования оценивать по его частотным свойствам. Синтезированная УКЗ также обеспечивает необходимые динамические характеристики акселерометра как замкнутой системы регулирования, при этом система имеет хороший запас устойчивости и хорошо демпфирована.

Основные инструментальные погрешности МКА, обусловленные влиянием внешних возмущений (не измеряемых акселерометром кинематических параметров движения ЛА  $\xi_i = \{\Omega_3; \dot{\Omega}_1; \dot{\Omega}_2; \dot{\Omega}_3; \Omega_1 \Omega_2; \Omega_1 \Omega_3; \Omega_2^2; \Omega_2^2; \Omega_3^2; w_1; w_2\}$ ) на параметры датчика, и дополнительные инструментальные погрешности МКА (вызванные относительным поступательно-вибрационным движением основания) не превышают 0,01%.

В МИД акселерометр устанавливается на основании таким образом, чтобы поступательная вибрация осуществлялась вдоль оси подвеса маятникового чувствительного элемента.

### Приводной механизм

Выбор приводного механизма осуществляется исходя из требуемых значений параметров вибрационного движения акселерометров. Требуемые значения амплитуды и частоты вибрации определены из условия обеспечения пороговой чувствительности по угловой скорости, например  $\Omega_1^{\text{пор}}$ , из соотношения  $w_{C3}^{\text{пор}} \geq w_3^{\text{пор}}$ , где  $w_{C3}^{\text{пор}}$  — минимальное значение ус-

корения Кориолиса,  $w_{C3}^{\text{пор}} = 2\Omega_1^{\text{пор}} x_0 \omega_b$ , согласно [5, с. 80].

Из этого соотношения получаем, что

$$x_0 \cdot \omega_b \geq \frac{w_3^{\text{пор}}}{2\Omega_1^{\text{пор}}} \text{ или } x_0 \cdot f_b \geq \frac{w_3^{\text{пор}}}{4\pi\Omega_1^{\text{пор}}} . \quad (5)$$

Подставляя в полученную формулу значения табл. 1 и учитывая, что частота вибрации  $\omega_b$  привода должна находиться в полосе пропускания акселерометра и быть в 3—5 раз меньше его собственной частоты, выбраны параметры работы привода. Таким образом, приводной механизм обеспечивает относительное поступательное вибрационное движение основания с акселерометрами на частоте 100 Гц ( $\omega_b = 648$  рад/с) с амплитудой  $30 \cdot 10^{-6}$  м.

Поскольку масса четырех акселерометров велика, предложено в конструкции МИД использовать приводной механизм магнитоэлектрического принципа действия (рис. 4). Он содержит постоянный магнит 3 с магнитопроводом 4, в воздушном зазоре которого помещена катушка 2, жестко связанная с основанием 1, на котором установлены акселерометры. Плоские параллельные поверхности основания расположены перпендикулярно оси вибрации  $x_2$ . Подвижная система «катушка—основание» подвешена на четырех плоских пружинах 5, смещенных друг относительно друга на 90°. Магнитное поле вибратора создается с помощью постоянного магнита.

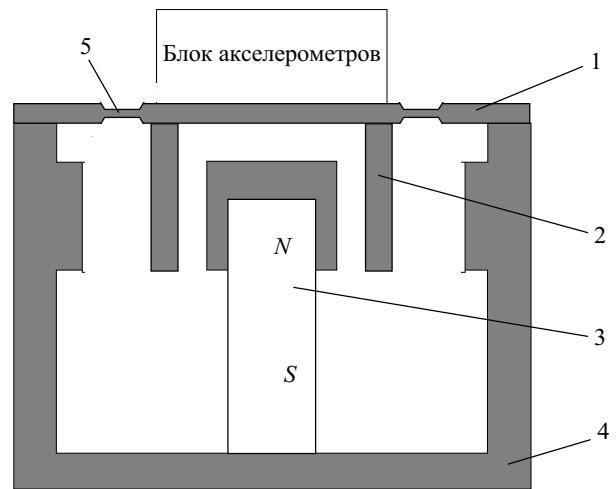


Рис. 4. Магнитоэлектрический приводной механизм

Принцип действия приводного механизма заключается во взаимодействии постоянного и переменного магнитных полей. Это взаимодействие возникает при прохождении тока  $I = I_0 \sin \omega_b t$  в цилиндрической катушке, находящейся в постоянном магнитном поле. Специальные элементы ориентируют электрический ток так, чтобы он был направлен поперек магнитного потока. Взаимодействие полей вызывает появление механической силы, которая обуславливает возвратно-поступательное перемещение (вибрацию) подвижной катушки и связанного с ней основания с акселерометрами по закону изменения переменного тока  $x = x_0 \sin \omega_b t$ . Катушка подвешена на упругом элементе, сила упругого сопротивления которого уравновешивает вес катушки и направляет ее движение.

Принимая при расчете массы подвижной системы  $M$ , что сумма масс основания и катушки мала и составляет до 20% от массы акселерометров, получаем соотношение

$$I_0 l \geq \frac{M x_0 \omega_B^2}{B}, \quad (6)$$

где  $I_0$  — максимально допустимое значение амплитуды тока в катушке, А.

$l$  — длина провода в катушке, м;

$B$  — индукция в воздушном зазоре магнитной системы, Тл.

Задавшись значением индукции на уровне  $B = 0,4 \div 0,6$  Тл, при условии, что  $I_0 \leq 30$  мА, выбором значений параметров  $l$  и  $I_0$  в выражении (6) определяем параметры катушки приводного механизма.

Расчет магнитной системы приводного механизма с постоянным магнитом осуществляется по методике, представленной в работе [6, с. 134]. Получены следующие размеры магнита (материал магнита ЮНДК35Т5БА): диаметр 70 мм, длина 32 мм.

Габаритные размеры приводного механизма определены согласно данным, представленным в работе [7], где показано, что отношение массы магнита к массе приводного механизма в среднем составляет 0,2, а отношение массы привода к его объему — 4,5 г/см<sup>3</sup>.

Параметры основания МИД, на котором крепятся акселерометры, определяются массогабаритными параметрами самих акселерометров. Параметры же упругих элементов подвеса для варианта подвеса, представленного на рис. 5, определены путем совместного решения выражений для жесткости  $C_{л}$  упругих элементов подвеса (УЭ) подвижной системы "катушка — основание" и условия прочности. Из уравнения движения подвижной системы, приняв демпфирование  $b=0$ , получаем, что

$$C_{л} = \frac{B I_0}{x_0} + M \omega_B^2.$$

С другой стороны,

$$\begin{cases} C_{л} = \frac{4 E b_n h_n^3}{l_n^3}; \\ \sigma_{\max} = \frac{6 M_{\text{изг}}}{W_n} = \frac{6 M l w^{\text{вп}}}{b_n^2 h_n} \leq [\sigma], \end{cases}$$

где  $E$  — модуль упругости Юнга;

$b_n, h_n$  — размеры УЭ прямоугольного сечения;

$l_n$  — длина УЭ;

$M_{\text{изг}}$  — момент кручения на изгиб;

$W_n$  — момент инерции сечения;

$w^{\text{вп}}$  — верхний предел измерения линейного ускорения;

$\sigma_{\max}$  — наибольшее напряжение в сечении УЭ;

$[\sigma]$  — допустимое напряжение.

Значения параметров упругих элементов подвеса получены исходя из выбранного для изготовления УЭ материала — бериллиевой бронзы. Это дисперсионно-твердеющий сплав, преимуществами которого являются малые несовершенства упругих свойств, высокая релаксационная стойкость, достаточно высокая термическая и коррозионная стойкость, что по-

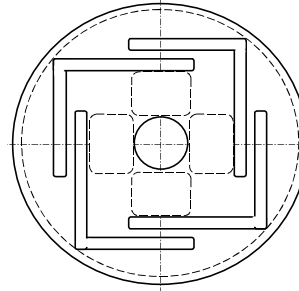


Рис. 5. Основание, на котором крепятся акселерометры МИД

зволяет использовать его в условиях повышенных температур и агрессивных сред. Бериллиевая бронза немагнитна, хорошо паяется и сваривается. Этот материал по прочности и упругим свойствам в условиях нормальной температуры превосходит многие высокока-

чественные стали, а гистерезис, упругое последствие, ползучесть УЭ невелики.

Расчеты были проведены для бериллиевой бронзы с дополнительным введением титана БрБНТ1,9, которая обладает высокой электропроводностью, может быть использована до температур 100—150°C и дешевле бериллиевой бронзы БрБ2 из-за меньшего содержания бериллия.

\*\*\*

Таким образом, двухосный мультисенсорный инерциальный датчик на отдельных акселерометрах, предназначенный для построения инерциальных измерительных блоков систем управления движением маневренных ЛА, содержит электромеханические акселерометры компенсационного типа и магнитоэлектрический приводной механизм. Предполагается, что основной особенностью таких датчиков будет их дешевизна и доступность для массовых применений.

В случае измерения параметров ЛА в трехмерном пространстве возможно применение инерциального измерительного блока, содержащего два ортогонально расположенных двухосных МИД.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Пат. 4445376 США. Apparatus and method for measuring specific force and angular rate / Sh. J. Merhav.— 1984.
2. Назарян В. А. Построение и исследование макета мультисенсорного датчика / Сб. докл. II НТК молодых ученых "Навигация и управление движением".— СПб.: ГНЦ РФ—ЦНИИ «Электронприбор».— 2000.— С. 71—77.
3. Черняк Н. Г., Мухоед Н. А. Построение инерциального датчика для измерения линейных ускорений и угловых скоростей летательного аппарата // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 6.— С. 39—42.
4. Мухоед Н. А. Низкочастотный линейный акселерометр с большим диапазоном измерения для систем инерциальной навигации и управления движением высокоманевренных летательных аппаратов / Сб. тр. междунар. НТК "Приборостроение-98".— Винница—Симферополь.— 1998.— С. 279—282.
5. Павловский М. А., Путята Т. В. Теоретическая механика.— К.: Вища шк., 1985.
6. Постоянные магниты: Справочник / Под ред. Ю. М. Пятина.— М.: Энергия, 1980.
7. Левшина Е. С., Моисейченко В. С. Методика расчета габаритов и основных конструктивных размеров магнитоэлектрических обратных преобразователей // Приборы и системы управления.— 1969.— № 8.— С. 14—17.