

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 538.65: 621.316.73

© С. В. Богословский, Г. А. Сапожников, А. О. Кадкин

**ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ
МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДВЕСОВ**

Малогабаритные измерительные приборы на магнитной подвеске находят все большее применение в системах автоматического управления транспортными средствами. Рассматриваются основные технические характеристики акселерометров с чувствительным элементом на магнитной подвеске и перспективы применения высокотемпературных сверхпроводящих материалов для повышения точности измерительных преобразователей на магнитной подвеске. Приводится описание схемы измерителя малых масс в невесомости на основе сверхпроводящей магнитной подвески чувствительного элемента.

**АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА МАГНИТНОЙ
ПОДВЕСКЕ**

В последнее время существенно возросли требования к качеству управления подвижными объектами (летательными аппаратами, автомобилями и др.), что объясняется возросшими скоростями движения и новыми задачами создания дистанционного управления транспортными средствами, которые самостоятельно (без участия человека) движутся по заданному маршруту. Известно, что эффективность систем управления фактически определяется двумя факторами: производительностью вычислительной техники и точностью датчиков первичной информации.

Вычислительные ресурсы, предоставляемые современной вычислительной техникой, позволяют реализовать с очень высокой точностью высокоэффективные алгоритмы управления. В связи с этим к датчикам первичной информации предъявляются повышенные требования по точности. Одним из важнейших датчиков информационно-навигационных систем является акселерометр. В настоящее время созданы прецизионные однокомпонентные акселерометры с погрешностями менее 0.1 % (например, акселерометры А15, А16 ОАО "Раменский приборостроительный завод").

Однако для управления динамическим объектом, движущимся в трехмерном пространстве, необходимо знать не одну, а шесть координат (три компонента линейного и три — углового ускорений).

Использование шести однокомпонентных измерительных преобразователей не позволяет получить информацию требуемого качества вследствие наличия стохастических зависимостей между выходными сигналами датчиков, построенных на основе независимой подвески индивидуальных чувствительных элементов. Уменьшить погреш-

ности, обусловленные наличием перекрестных стохастических зависимостей, возможно лишь при использовании многократного дублирования, что не позволяет обеспечить выполнение требований к массогабаритным характеристикам измерительных преобразователей.

Одним из основных направлений повышения точности и пороговой чувствительности акселерометров и гироскопов является совершенствование системы подвеса их чувствительных элементов. Подвес чувствительного элемента, являясь составной частью измерительно-преобразовательной системы, должен обеспечивать строгую фиксацию чувствительного элемента, не вызывая при этом возмущающих воздействий по оси чувствительности. При быстроменяющихся сигналах от датчика перемещений требуются необходимые динамические характеристики. Поэтому при выборе подвеса чувствительного элемента для такого измерителя исходят из того, чтобы параметр подвеса, несущий информацию о перемещении чувствительного элемента, зависел от перемещения линейно, имел достаточную крутизну характеристики, был симметричен относительно нулевого сигнала. Информационный параметр подвеса должен быть линейно связан с измеряемой величиной во всем диапазоне измерений, должен иметь симметричную характеристику относительно нулевого сигнала и высокую ее крутизну.

Существенное улучшение метрологических характеристик акселерометров и гироскопов может быть достигнуто на основе применения электромагнитных подвесов (МП) благодаря присущим им особым свойствам: отсутствию механической связи между подвижными и неподвижными частями прибора, возможностью работы в условиях глубокого вакуума и в агрессивных средах. Электромагнитные подвесы позволяют на порядок повысить точность и на несколько порядков — пороговую чувствительность измерительных приборов,

в которых ранее в качестве опор чувствительного элемента использовались камневые опоры часового типа, получившие в настоящее время наибольшее распространение.

Более высокие характеристики могут быть достигнуты при создании многокомпонентных датчиков (например, акселерометров) на основе использования полной магнитной подвески общего для всех компонент чувствительного элемента. Один такой измерительный преобразователь не только может заменить не менее шести однокомпонентных, но и обеспечить получение информации прецизионного качества (с погрешностью менее 0.1 %).

В таблице приведены сравнительные характеристики современных акселерометров.

Акселерометр на шестикомпонентном электромагнитном подвесе оказывается на порядок дешевле акселерометров традиционного исполнения. Так, стоимость одного одноосного акселерометра ОАО "Раменский приборостроительный завод" составляет свыше \$2000. Для построения современных систем управления необходимо использовать не менее шести таких акселерометров. Таким образом, стоимость аппаратной реализации шестикомпонентного акселерометра на базе шести однокомпонентных измерительных МП составит не менее \$12 000. Стоимость же акселерометра на базе одного шестикомпонентного измерительного МП составит примерно \$900.

Технологическим преимуществом акселерометров на одном шестикомпонентном МП по сравнению с акселерометрами на шести однокомпонентных МП является многократное снижение трудоемкости юстировки: вместо юстировки шести одно-

компонентных МП требуется юстировать один шестикомпонентный. Это позволяет повысить технологичность изготовления шестикомпонентного акселерометра и исключить погрешности, связанные с необходимостью юстировки нескольких однокомпонентных измерительных МП.

Созданию магнитных подвесов для прецизионных измерительных приборов, в том числе акселерометров, посвящена недавно вышедшая монография [1]. В ней авторы обосновали необходимость использования МП на переменном токе, что позволяет снизить погрешности от потерь на гистерезис и добиться снижения их примерно до 0.1 %. Однако дальнейшее увеличение точности наталкивается на технические трудности измерения параметров высокочастотного сигнала (на 50 кГц и выше) с высокой точностью (16 разрядов и выше). В то же время разработаны высокоточные методы измерения постоянных сигналов.

Рассмотрим принцип работы шестикомпонентного подвеса на примере схемы, приведенной на рис. 1.

В данном случае чувствительный элемент представляет собой шестиконечную крестовину (рис. 2), на концах которой установлены ферромагнетики (всего шесть штук).

Наиболее хорошо себя зарекомендовал феррит 3000МТ. Каждый ферромагнетик находится между двумя электромагнитами (всего 12 электромагнитов). Управление всеми электромагнитами осуществляется единой системой управления, которая учитывает линейные и угловые перемещения чувствительного элемента и перекрестные связи между каналами. Обработка информации осуществляется системой

Характеристики современных акселерометров

Акселерометр	Диапазон измерения ускорений, g	Чувствительность, g	Погрешность, %	Число компонент	Габариты, мм	Масса, г
АК-5, АО "Авиаприбор", г. Москва	±15	$1.5 \cdot 10^{-4}$	0.2	1	18×30×16	33
ДА-11с1, Пермская научно-производственная приборостроительная компания	±25	$5 \cdot 10^{-6}$	0.1	1	23.5×23.5×22.5	45
А-16, Раменский приборостроительный завод	±35	10^{-6}	0.02	1	21×23×24	51
ADXL 250, Analog Devices	±50	10^{-6}	0.1	1	15×15×17	42
АМ-10, макет ГУАП	±10	10^{-6}	0.1	6	60×60×60	340

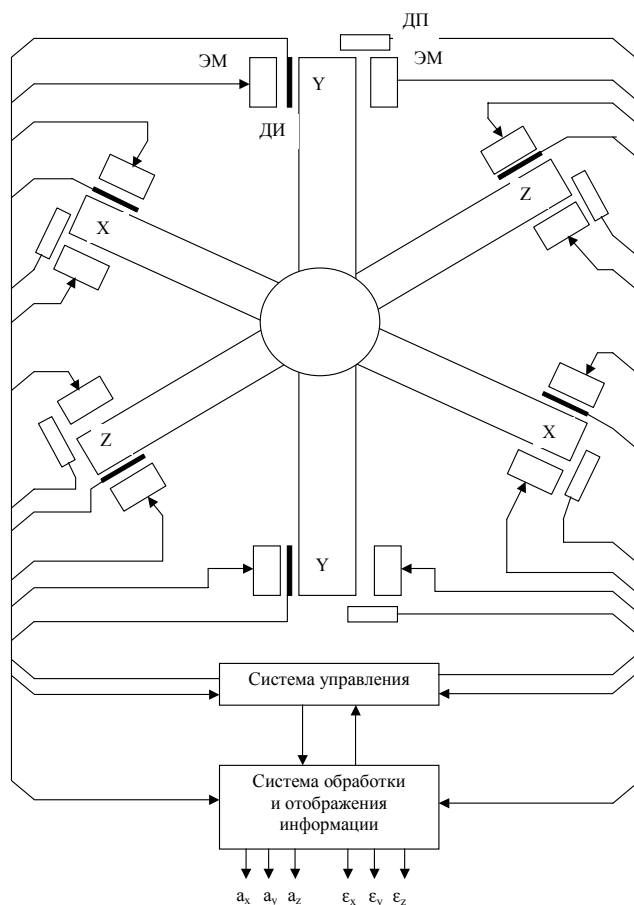


Рис. 1. Схема шестикомпонентного подвеса

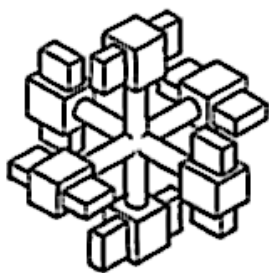


Рис. 2. Схема чувствительного элемента

идентификации на основе информации об индукции в зазорах МП и перемещениях чувствительного элемента.

Рассмотренная конструкция акселерометра позволяет измерять 6 компонент ускорения, действующего на один чувствительный элемент.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА НА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКЕ

В настоящей работе предлагается для повышения точности измерительного МП заменить ферромагнетики на высокотемпературный сверхпроводник. Существующие в настоящее время высокотемпературные сверхпроводники позволяют изготовить шестиконечную крестовину, подобную изображенной на рис. 2.

Применение сверхпроводников позволяет повысить точность работы благодаря следующим особенностям сверхпроводниковых МП:

- устраняются явления гистерезиса;
- при отсутствии гистерезиса более эффективным становится применение МП постоянного тока;
- упрощается математическая модель (математическая модель движения сверхпроводника МП становится линейной [2]), что позволяет снизить методические погрешности управления чувствительным элементом и распознавания сигналов.

Наличие перекрестных связей в акселерометрах на порядок снижает точность измерения ускорений. Однако построенная и апробированная адекватная математическая модель [1] в классе обыкновенных дифференциальных уравнений с алгебраическими нелинейностями позволяет учесть взаимное влияние каналов в магнитном подвесе и в созданном на его основе одномассовом шестикомпонентном акселерометре. Адекватная математическая модель шестикомпонентного акселерометра с МП позволяет оценивать ускорения не только в статике, но и в динамике, так как зависимости между координатами всех шести полюсов являются детерминированными, а не стохастическими, как у шести однокомпонентных МП. Подавляющее большинство прецизионных акселерометров других типов ориентировано на статические измерения.

Рассмотрим математическую модель прецизионного измерительного сверхпроводящего МП.

Для короткозамкнутого сверхпроводящего витка справедливо соотношение [2]:

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{A}_{cf} \mathbf{I}, \quad \mathbf{M}_m = \mathbf{A}_{cm} \mathbf{I}, \quad (1)$$

где $\mathbf{F}_m$, $\mathbf{M}_m$ — векторы сил и моментов магнитного взаимодействия соответственно; $\mathbf{I}$ — вектор токов в электромагнитах МП; $\mathbf{A}_{cf}$, $\mathbf{A}_{cm}$ — матрицы размером $(n \times m)$, где n — число координат, управляемых с помощью МП, а m — число электромагнитов МП.

Зависимость (1) справедлива и для постоянных магнитов в силу предположения о постоянстве вектора намагничивания $\mathbf{M} = \text{const}$, т. е. силы и моменты являются линейными функциями токов.

Аналитические выражения для коэффициентов A_{ij} в формулах (1) можно получить только для чувствительных элементов простейшей формы (шар) и стандартных конфигураций магнитного подвеса. Для магнитных подвесов, представляющих практический интерес, коэффициенты A_{ij} и их частные производные определяются численно [2].

Обобщая вышеизложенное, силовое взаимодействие прибора и магнитного подвеса можно представить в виде вектора $\mathbf{Q}_m$

$$\mathbf{Q}_m^T = (\mathbf{F}_m, \mathbf{M}_m) \quad (2)$$

в проекциях на оси подходящей (подвижной или неподвижной) системы координат. В общем случае все матрицы $\mathbf{A}_F$ и $\mathbf{A}_M$ являются нелинейными функциями линейных и угловых координат чувствительного элемента.

Уравнение движения чувствительного элемента может быть представлено в виде

$$d^2\mathbf{X}/dt^2 = \mathbf{B}_R(d\mathbf{X}/dt, \mathbf{X}) + \mathbf{P}_g^{-1} \mathbf{Q}_m + \mathbf{Q}_{BH} + \mathbf{P}_g^{-1} \mathbf{G}, \quad (3)$$

где $\mathbf{X} = \{x_i\}$ — вектор фазовых координат, $i = (1, 6)$; $\mathbf{Q}_{BH}$ — вектор внешних возмущений; $\mathbf{G}$ — вектор гравитационных сил;

$$\mathbf{P}_g = \begin{vmatrix} m \mathbf{E}_{3,3} & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & \begin{vmatrix} 0 & J_x \sin \vartheta & J_x \\ J_y \sin \gamma & J_y \cos \vartheta \cos \gamma & 0 \\ J_z \cos \gamma & -J_z \cos \vartheta \sin \gamma & 0 \end{vmatrix} \end{vmatrix};$$

m — масса чувствительного элемента; J_x, J_y, J_z — осевые моменты инерции;

$$\mathbf{P}_g^{-1} = \begin{vmatrix} (1/m) \mathbf{E}_{3,3} & \mathbf{0}_{3,3} \\ \mathbf{0}_{3,3} & \begin{vmatrix} 0 & (1/J_y) \sin \gamma & (1/J_z) \cos \gamma \\ 0 & (1/J_y) \cos \gamma / \cos \vartheta & -(1/J_z) \sin \gamma / \cos \vartheta \\ 1/J_x & -(1/J_y) \tan \vartheta \cos \gamma & (1/J_z) \tan \vartheta \sin \gamma \end{vmatrix} \end{vmatrix};$$

$\mathbf{B}_R = -\mathbf{P}_g^{-1} \mathbf{B}_g$; $\mathbf{B}_g = \{b_{gi}\}$; $b_{gi} = 0$ для $i = 1, 2, 3$;

$b_{g4} = J_x d\psi/dt d\vartheta/dt \cos \vartheta + (J_z - J_y) \{d\psi/dt d\vartheta/dt \cos \vartheta \cos 2\gamma + [(d\vartheta/dt)^2 - (d\psi/dt)^2 \cos^2 \vartheta] \sin 2\gamma / 2\}$;

$b_{g5} = J_y (d\vartheta/dt d\gamma/dt \cos \gamma - d\psi/dt d\vartheta/dt \sin \vartheta \cos \gamma - d\psi/dt d\gamma/dt \cos \vartheta \sin \gamma) + (J_x - J_z) [d\vartheta/dt d\gamma/dt \cos \gamma + d\vartheta/dt d\psi/dt \cos \gamma \sin \vartheta - d\psi/dt d\gamma/dt \cos \vartheta \sin \gamma - (d\psi/dt)^2 \sin 2\vartheta \sin \gamma / 2]$;

$b_{g6} = J_z (d\psi/dt d\vartheta/dt \sin \vartheta \sin \gamma - d\vartheta/dt d\gamma/dt \sin \gamma - d\psi/dt d\gamma/dt \cos \vartheta \cos \gamma) + (J_y - J_x) [d\gamma/dt d\psi/dt \cos \vartheta \cos \gamma + d\vartheta/dt d\gamma/dt \sin \gamma + (d\psi/dt)^2 \sin 2\vartheta \cos \gamma / 2 + d\psi/dt d\vartheta/dt \sin \vartheta \sin \gamma]$

или в векторно-матричной форме:

$b_{gj} = [d\Theta/dt]^T \times \mathbf{A}_{gj} \times [d\Theta/dt]$, $j = (4, 6)$; $\Theta^T = (\vartheta, \psi, \gamma)$, ϑ, ψ, γ — угловые координаты;

$$\mathbf{A}_{g4} = \begin{vmatrix} (J_z - J_y) \times \sin 2\gamma / 2 & 0 & 0 \\ J_x \cos \vartheta + (J_z - J_y) \cos \vartheta \cos 2\gamma & -(J_z - J_y) \cos^2 \vartheta \sin 2\gamma / 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{g5} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ (J_x - J_z - J_y) \sin \vartheta \cos \gamma & (J_x - J_z) \sin 2\vartheta \sin \gamma / 2 & 0 \\ (J_y + J_x - J_z) \cos \gamma & (J_z - J_x - J_y) \cos \vartheta \sin \gamma & 0 \end{vmatrix};$$

$$\mathbf{A}_{g6} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ (J_z + J_y - J_x) \sin \vartheta \sin \gamma & (J_y - J_x) \sin 2\vartheta \cos \gamma / 2 & 0 \\ (J_y - J_x - J_z) \sin \gamma & (J_y - J_x - J_z) \cos \vartheta \cos \gamma & 0 \end{vmatrix}.$$

В формуле (3) уравнения движения центра масс записываются в проекциях на оси неподвижной системы координат, а уравнения углового движения — в проекциях на оси связанной системы координат. Это позволяет упростить построение закона управления и повысить скорость вычислений для обеспечения процессов управления в реальном времени.

После линеаризации уравнения (3) в окрестности равновесного положения получим искомый вид системы уравнений:

$$d^2 \mathbf{X}^* / dt^2 = \mathbf{B}_{R1} d\mathbf{X}^* / dt + \mathbf{B}_{R0} \mathbf{X}^* + \mathbf{K}_x \mathbf{X}^* + \mathbf{K}_1 \mathbf{I}^* + \mathbf{Q}^*, \quad (4)$$

$$\mathbf{B}_{R0} = \left[-\partial \mathbf{P}_g^{-1} / \partial x_1 \mathbf{B}_g - \mathbf{P}_g^{-1} \partial \mathbf{B}_g / \partial x_1 \quad \dots \quad -\partial \mathbf{P}_g^{-1} / \partial x_6 \mathbf{B}_g - \mathbf{P}_g^{-1} \partial \mathbf{B}_g / \partial x_6 \right];$$

$$\mathbf{B}_{R1} = \left[\begin{array}{c} \mathbf{0}_{3,3} \\ -\mathbf{P}_g^{-1} \frac{d\Theta^T}{dt} (\mathbf{A}_{g4} + \mathbf{A}_{g4}^T) \\ \dots \\ \mathbf{P}_g^{-1} \frac{d\Theta^T}{dt} (\mathbf{A}_{g6} + \mathbf{A}_{g6}^T) \end{array} \right] \text{ при } \mathbf{X} = \mathbf{X}(t=0),$$

где $\mathbf{Q}^* = \mathbf{P}_g^{-1} \mathbf{P}_B (\mathbf{Q}_A - \mathbf{Q}_{A0})$; $\mathbf{Q}_{A0}$ — обобщенный вектор отклонений внешних возмущений от равновесных значений; $\mathbf{X}^* = \{x_{ij}^*\}$, $i = (1, 6)$ — вектор отклонений фазовых координат от их равновесных значений;

$$\begin{aligned} \partial \mathbf{P}_g / \partial x_5 &= \partial \mathbf{P}_g / \partial \psi = \mathbf{0}_{6,6}; \\ \partial \mathbf{P}_g^{-1} / \partial x_i &= -\mathbf{P}_g^{-1} \cdot \partial \mathbf{P}_g / \partial x_i \cdot \mathbf{P}_g^{-1}; \quad \partial \mathbf{P}_g^{-1} / \partial x_i = 0 \quad \text{для } i = (1, 3); \end{aligned}$$

$$\partial \mathbf{P}_g / \partial x_4 = \partial \mathbf{P}_g / \partial \vartheta = \left[\begin{array}{c|cc} & \mathbf{0}_{3,6} & \\ \hline \mathbf{0}_{3,4} & J_x \cos \vartheta & 0 \\ & -J_y \sin \vartheta \cos \gamma & 0 \\ & J_z \sin \vartheta \sin \gamma & 0 \end{array} \right];$$

$$\partial \mathbf{P}_g / \partial x_6 = \partial \mathbf{P}_g / \partial \gamma = \left[\begin{array}{c|ccc} & \mathbf{0}_{3,6} & & \\ \hline \mathbf{0}_{3,3} & 0 & 0 & 0 \\ & J_y \cos \gamma & -J_y \cos \vartheta \sin \gamma & 0 \\ & -J_z \sin \gamma & -J_z \cos \vartheta \cos \gamma & 0 \end{array} \right];$$

$$\begin{aligned} \partial b_{gj} / \partial x_i &= 0 \quad \text{для } j = (1, 3), \quad i = (1, n); \quad \text{и } j = (4, 6), \quad i = (1, 3); \\ \partial b_{gj} / \partial x_i &= (d\Theta/dt)^T (\partial \mathbf{A}_{gj} / \partial x_i) (d\Theta/dt) \quad \text{при } \mathbf{X} = \mathbf{X}(t=0) \quad \text{для } i, j = (4, 6); \\ \partial \mathbf{A}_{g4} / \partial x_5 &= \partial \mathbf{A}_{g4} / \partial \psi = \mathbf{0}_{3,3}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \partial \mathbf{A}_{g4} / \partial x_4 = \partial \mathbf{A}_{g4} / \partial \vartheta &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ [(J_y - J_z) \cos 2\gamma - J_x] \sin \vartheta & (J_z - J_y) \cos \vartheta \sin \vartheta \sin 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \\
 \partial \mathbf{A}_{g6} / \partial x_5 = \partial \mathbf{A}_{g6} / \partial \psi = 0_{3,3}; \quad \partial \mathbf{A}_{g5} / \partial x_5 = \partial \mathbf{A}_{g5} / \partial \psi = \mathbf{0}_{3,3}; \\
 \partial \mathbf{A}_{g5} / \partial x_4 = \partial \mathbf{A}_{g5} / \partial \vartheta &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ (J_x - J_y - J_z) \cos \vartheta \cos \gamma & (J_z - J_x) \cos 2\vartheta \sin \gamma & 0 \\ 0 & (J_x - J_y - J_z) \sin \vartheta \sin \gamma & 0 \end{vmatrix}; \\
 \partial \mathbf{A}_{g4} / \partial x_6 = \partial \mathbf{A}_{g4} / \partial \gamma &= \begin{vmatrix} (J_z - J_y) \cos 2\gamma & 0 & 0 \\ -2 (J_z - J_y) \cos \vartheta \sin \gamma & (J_y - J_z) \cos^2 \vartheta \cos 2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}; \\
 \partial \mathbf{A}_{g5} / \partial x_6 = \partial \mathbf{A}_{g5} / \partial \gamma &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ (J_z + J_y - J_x) \sin \vartheta \sin \gamma & -[J_x - J_z] \sin 2\vartheta \cos \gamma / 2 & 0 \\ (J_z - J_x - J_y) \sin \gamma & (J_z - J_x - J_y) \cos \vartheta \cos \gamma & 0 \end{vmatrix}; \\
 \partial \mathbf{A}_{g6} / \partial x_6 = \partial \mathbf{A}_{g6} / \partial \gamma &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ (J_z + J_y - J_x) \sin \vartheta \cos \gamma & [(J_x - J_y) \sin 2\vartheta \sin \gamma] / 2 & 0 \\ (J_y - J_x - J_z) \cos \gamma & (J_x + J_z - J_y) \cos \vartheta \sin \gamma & 0 \end{vmatrix}; \\
 \partial \mathbf{A}_{g6} / \partial x_4 = \partial \mathbf{A}_{g6} / \partial \vartheta &= \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ (J_z + J_y - J_x) \cos \vartheta \sin \gamma & (J_y - J_x) \cos 2\vartheta \cos \gamma & 0 \\ 0 & (J_x + J_z - J_y) \sin \vartheta \cos \gamma & 0 \end{vmatrix}.
 \end{aligned}$$

В случае, когда основанием прибора является постоянный магнит или сверхпроводник, коэффициенты $\mathbf{K}_X$ и $\mathbf{K}_I$ имеют вид:

$$\mathbf{K}_X = \left| \begin{array}{c} \partial \mathbf{A}_M / \partial x_1 \mathbf{I} \dots \partial \mathbf{A}_M / \partial x_n \mathbf{I} \\ \mathbf{I} = \mathbf{I}_0, \\ \mathbf{X} = \mathbf{X}_0, \end{array} \right|$$

$$\mathbf{K}_I = \mathbf{A}_M \big|_{\mathbf{X} = \mathbf{X}_0},$$

где $\mathbf{I}_0$, $\mathbf{X}_0$ — равновесные значения векторов тока и фазовых координат соответственно.

Матричные коэффициенты $\partial A_j / \partial x_i$ в уравнении (4) определяются при численном расчете магнитного поля известными методами [3].

Динамика токов $\mathbf{I}$ в электромагнитах описывается уравнением:

$$\mathbf{L} d\mathbf{I}/dt + \mathbf{R} \mathbf{I} = \mathbf{U}, \quad (5)$$

где $\mathbf{L}$ — матрица взаимной индукции электромагнитов магнитного подвеса; $\mathbf{R} = \text{diag}(r_1, \dots, r_m)$ — матрица активных сопротивлений электромагнитов магнитного подвеса; m — количество электромагнитов; $\mathbf{U}$ — вектор управляющих напряжений, приложенных к электромагнитам магнитного подвеса.

Матрицы $\mathbf{L}$ и $\mathbf{R}$ определяются в ходе численных расчетов напряженности магнитного поля [3].

Система управления может быть синтезирована любым из известных методов [4].

ИЗМЕРИТЕЛЬ МАССЫ В НЕВЕСОМОСТИ НА СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКЕ

С использованием сверхпроводящих МП могут быть реализованы не только акселерометры, но и другие измерительные приборы. Рассмотрим, например, как может быть реализован измеритель массы в невесомости [5].

Устройство, структурная схема которого приведена на рис. 3, совмещает функции датчика силы F и измерителя действующего ускорения. Масса определяется согласно второму закону Ньютона для абсолютно твердых тел.

Устройство состоит из трех электромагнитов МП (2, 3, 4), в поле которых размещается чувствительный элемент — взвешенное тело ВТ (1). ВТ выполнено из немагнитного легкого материала, с прикрепленными к нему ферромагнитными сердечниками.

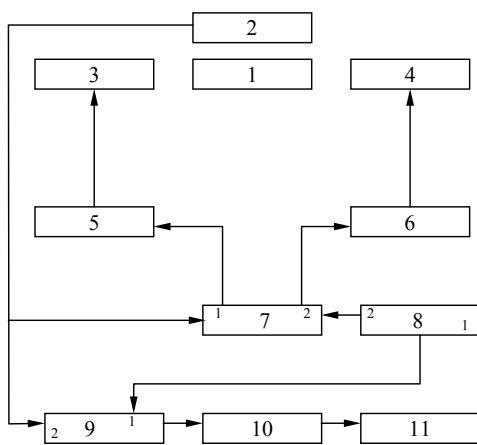


Рис. 3. Измеритель массы в невесомости

Два пассивных МП обеспечивают левитацию ВТ в плоскости, перпендикулярной оси чувствительности, а активный измерительный МП (3) — вдоль оси чувствительности. Управление МП обеспечивается блоком управления (5) по сигналам с датчика перемещения (2). С помощью блока задатчика идентифицирующего сигнала (6) и активного МП (3) к ВТ прикладывается тестовое усилие, изменяющееся по гармоническому закону. Активный МП (3) одновременно является и измерителем ускорения, действующего на ВТ.

Рассмотрим работу устройства. Если ВТ (1) не содержит измеряемой массы m_n , то устройство работает следующим образом. С блока задатчика распознающего сигнала (6) подается тестовый сигнал на блок управления (5), реализующий стандартный пропорционально-дифференциальный закон управления [3]. Сигнал с блока управления (5) через регуляторы индукции (4) поступает на исполнительную часть рассматриваемого устройства — электромагниты активного МП (3). Электромагниты (3) передают заданное тестовое усилие на ВТ (1) без измеряемой массы. Масса ВТ в этом случае равна m_n .

Датчик перемещения (2), состоящий из индукционного датчика перемещения и фильтров для идентификации линейного перемещения и скорости, фиксирует положение ВТ (1). Сигнал с датчика перемещения (2) поступает на блок управления (5) и детектор рассогласования (9). Блок управления (5) обеспечивает заданные динамические свойства устройства: или автоколебательный режим, или режим вынужденных колебаний с параметрами, задаваемыми блоком задатчика распознающего сигнала (6). В качестве тестового сигнала используется синусоидальный сигнал. Однако могут быть рассмотрены и другие стандартные методы идентификации по переходным процессам в динамической системе, где измеряемая масса m_n рассматривается как идентифицируемый параметр.

На блок детектора рассогласования (9) одновременно поступает сигнал с датчика перемещения (2) и с блока задатчика распознающего сигнала (6). С блока детектора рассогласования (9) сигналы поступают на блок распознавания (8) и далее на блок индикации (7). В случае использования режима автоколебаний или вынужденных колебаний с тестовой амплитудой A_n , детектор рассогласования (9) по информации, поступающей с датчика перемещения (2), определяет действующую амплитуду колебаний ВТ (1), обозначаемую A_6 .

Тогда измеряемая масса m_n определяется из очевидного выражения

$$m_n = k / A_6 - m_n. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае ВТ (1) не содержит измеряемой массы и поэтому $A_6 = A_n$ и $m_n = 0$, так как $k/A_n = m_n$, где k — коэффициент пропорциональности, который необходимо определить экспериментально.

Тестовая сила F определяется с высокой точностью по напряжениям, приложенным к электромагнитам (3), и по координатам перемещения ВТ. В случае, когда ВТ (1) содержит измеряемую массу, устройство работает аналогично, но амплитуды A_6 и A_n не будут совпадать, и масса определяется по формуле (6).

Технические характеристики устройства:

- максимальная измеряемая масса — 0.5 кг;
- смещение нуля (постоянная составляющая, уточняется в ходе эксперимента) — не более 0.005 кг;
- нестабильность смещения нуля от запуска к запуску (уточняется в ходе эксперимента) — не более 0.005 кг;
- порог чувствительности — 0.00005 кг;
- габаритные размеры устройства — 150×80×80 мм;
- масса устройства 0.8 кг.

Дальнейшее увеличение точности измерения массы сыпучих и жидких материалов может быть достигнуто на основе применения вращения взвешенного тела относительно оси измерения.

Применение предлагаемого устройства для определения массы особенно эффективно в условиях невесомости (на орбитальных космических станциях), где не годится большинство стандартных способов измерения массы, основанных на действии силы тяжести.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно отметить следующие свойства сверхпроводящих электромагнитных подвесов.

В сверхпроводящем МП не наблюдается явление гистерезиса и поэтому отпадает необходимость использования переменного тока высокой частоты (50 кГц).

Использование в МП постоянного тока позволяет существенно увеличить перегрузочную способность МП, его жесткость.

Использование в МП постоянного тока также позволяет на порядок повысить точность измерений, поскольку параметры постоянного тока измеряются со значительно большей точностью.

Отрицательными свойствами МП при использовании сверхпроводимости является возможная хрупкость элементов (потеря прочности) конструкции при низких температурах и высоких

динамических нагрузках, увеличение стоимости, габаритов и готовности к использованию времени.

Таким образом, применение сверхпроводящих МП позволяет существенно повысить точность приборов, созданных на их основе (например, акселерометров, измерителей массы в невесомости), однако имеет и ряд недостатков. Поэтому решение об их использовании должно приниматься с учетом указанных технических, экономических и эргономических характеристик. В качестве критерия принятия решения об использовании той или иной схемы МП можно рекомендовать критерий, предложенный в работе [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапожников Г.А., Богословский С.В., Кизимов А.Т. Теория и практика измерительных электромагнитных подвесов. СПб.: ГУАП, 2001. 384 с.
2. Богословский С.В. Особенности математического моделирования динамических аэромагнитных комплексов // Научное приборостроение. 2000. Т. 10, № 4. С. 48–59.
3. Важнов С.А., Калимов А.Г., Кошурников Е.К., Сведенцов М.Л. Выбор конфигурации и расчет магнитного поля магнитной системы электродинамического подвеса // Задачи и методы экспериментальной аэродинамики: Сб. науч. тр. / Ред. В.А. Коробков. СПб.: Изд-во СПб ГААП, 1994. С. 26–33.
4. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 1987. 711 с.
5. Приоритет № 2001118631 на патент. Устройство измерения массы в невесомости / Сапожников Г.А., Богословский С.В., Синяков А.Н., Кадкин А.Д. 2001.
6. Сапожников Г.А., Богословский С.В. Модель технико-экономической эффективности многофункциональных приборов в городских системах управления движением транспортных средств. (Логистика в современном бизнесе) // Сборник материалов Международной конференции 23–24 мая 2001 г. / Ред. проф. В.И. Сергеев. М.: Гос. ун-т, Высшая школа экономики, 2001. С. 125–128.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Материал поступил в редакцию 08.10.2001.

PRECISION MEASURING DEVICES BASED ON MULTICOMPONENT MAGNETIC LEVITATION SUSPENSIONS

S. V. Bogoslovsky, G. A. Sapozhnikov, A. O. Kadkin

Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The small-sized measuring instruments based on the magnetic levitation suspension find increasing application in the systems of automatic control of vehicles. Main technical characteristics of accelerometers with a sensing element based on the magnetic suspensions are considered and the perspective of application of high-temperature superconducting materials to increase the accuracy of transducers based on the magnetic levitation suspension is evaluated. The description of the scheme of low mass meter based on a sensor with the superconducting magnetic levitation suspension for the zero-gravity state is given.