

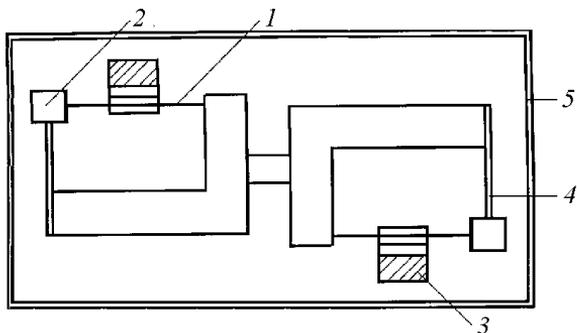
И. А. Харьков, А. Д. Шустров,  
Л. М. Селиванова

## ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ВИБРАЦИОННО-СТРУННЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

*Рассмотрена схема трехкомпонентного резервированного акселерометра на основе четырех однокомпонентных дифференциальных вибрационно-струнных чувствительных элементов с определенной ориентацией их измерительных осей. По сравнению с традиционной резервированной схемой на основе шести чувствительных элементов с ортогональными измерительными осями эта схема позволяет значительно уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость прибора, обеспечить аналитическую регулировку направлений измерительных осей относительно установочных баз.*

Разработанные в НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова под руководством д-ра техн. наук проф. Ю.С. Кричевского вибрационно-струнные акселерометры (ВСА) [1] нашли широкое применение в инерциальных навигационных системах отечественных космических аппаратов. Акселерометрические системы на базе ВСА были установлены на орбитальной научной станции “Мир”, грузовых кораблях “Прогресс-М”, пилотируемых кораблях “Союз-ТМ”, спутниках серии “Космос”. Эти системы обладают высокой надежностью: на протяжении двадцати восьми лет эксплуатации не было ни одного случая отказа или ненормальной работы ВСА при том, что многие сотни образцов были использованы в штатной работе. ВСА применены в режимах коррекции орбиты, сближения, стыковки и управляемого спуска с использованием аэродинамического качества (причем все эти задачи решаются одним и тем же прибором). ВСА обеспечивают высокую точность работы системы управления; в частности, среднеквадратическая величина отклонения космических кораблей при посадке составила несколько километров.

Разработка ВСА была предпринята вследствие научно-технической революции в области микроэлектроники и вычислительной техники, сделавшей возможным широкое внедрение вычислительных устройств на борту подвижных объектов, что, в свою очередь, потребовало разработки адекватных чувствительных инерциальных элементов. Такие чувствительные элементы должны обладать частотным выходом, малыми габаритными размерами и массой, низким энергопотреблением, высокой скоростью выдачи информации. Достоинством струнного принципа измерений является непосредственное преобразование измеряемой величины в частоту электрического сигнала, в отличие от аналоговых устройств не требующее для сопряжения с ЭВМ применения сложных аналого-цифровых преобразователей. С метрологической точки зрения частотные датчики обладают наивысшей точностью, так как точность воспроизведения образцовых мер частоты на несколько порядков выше точности воспроизведения аналоговых величин (тока, напряжения



### Схема вибрационно-струнного акселерометра:

1 — струна; 2 — инерционная масса; 3 — постоянный магнит; 4 — пружина;  
5 — корпус

и т.п.). Важным положительным качеством ВСА является малый уровень собственных шумов. Сравнительный анализ влияния тепловых шумов на показания ВСА и маятникового акселерометра с емкостным съемом информации показывает, что теоретически достижимый предел шумов ВСА на порядки меньше вследствие существенно меньшего значения выходного сопротивления. Малый уровень собственных шумов позволяет получить высокую разрешающую способность (малую дискретность) выходной информации и, вследствие этого, измерять постоянные и переменные ускорения с величинами частот до 100 Гц.

ВСА, разработанный в НИИ ПМ, построен по дифференциальной схеме с разделенными массами (см. рисунок) и содержит, по существу, два независимых однострунных акселерометра. Разработка такого однострунного акселерометра, являющегося чувствительным элементом (ЧЭ) прибора, была основной задачей при создании прибора, решение которой обеспечило получение его высокой точности. Высокие метрологические характеристики ЧЭ были получены благодаря применению оригинальных конструктивно-технологических решений и мер, основными из которых являются: применение пружинного поддержания силы натяжения струны; использование в качестве струны специальной детали — вибратора, в котором его тонкая часть, являющаяся собственно струной, выполнена как одно целое с концевыми утолщениями, служащими для установки вибратора в ЧЭ посредством сварки; выбор материалов элементов конструкции и режимов их механической, термической и другой обработки; тщательная отработка частотных свойств ЧЭ и многое другое.

Построение ВСА по дифференциальной схеме с двумя независимыми ЧЭ, помимо повышения точности из-за частичной компенсации некоторых погрешностей, обеспечивает избыточность информации на выходе, вследствие чего возможна также алгоритмическая компенсация погрешностей и, в случае необходимости, линеаризация показаний ВСА.

При практическом применении ВСА на космических аппаратах его свойства полностью не используются, так как имеющаяся инструментальная точность без учета систематических погрешностей и без термостатирования прибора достаточна для решения поставленных задач. Приведем основ-

ные технические характеристики ВСА, примененного на упомянутых выше космических аппаратах:

Диапазон измерения .....	$\pm 25 g$
Коэффициент преобразования .....	$25 \frac{Гц}{м/с^2}$
Стабильность коэффициента преобразования за 5 лет .....	не более 0,001 %
Температурная зависимость коэффициента преобразования .....	$(0,5 \pm 1,5) \cdot 10^{-3} \% / ^\circ C$
Мощность, потребляемая измерителем .....	не более 0,2 мВт
Ресурс .....	150000 ч
Время готовности к работе .....	менее 1 с
Разрешающая способность по скорости .....	не более 0,00005 м/с

Для реализации разрешающей способности необходимо определить информацию на выходе с точностью до малых долей выходных импульсов, что можно осуществить, в частности, путем заполнения сигналов на выходе колебаниями стабильной высокой частоты и подсчета числа этих колебаний. Высокая разрешающая способность ВСА по скорости позволяет практически исключить погрешность, обусловленную температурным и временным дрейфом нуля прибора, так как позволяет измерять и учитывать его нулевые показания с точностью на уровне  $10^{-6} g$  за время порядка 10 с на участке невесомости непосредственно перед включением двигательной установки.

С целью обеспечения высокой надежности, требуемой в системах управления пилотируемых космических аппаратов, на орбитальной станции “Мир” и кораблях “Союз-ТМ” и “Прогресс-М” использовалось троирирование измерителей. Например, на станции “Мир” использовался трехкомпонентный троирированный блок ВСА, содержащий девять акселерометров, по три вдоль каждой из взаимно ортогональных осей. Подобные схемы резервирования, как очевидно, могут привести к существенному ухудшению габаритно-массовых характеристик блока акселерометров.

Используя ЧЭ, который входит в ВСА, разработанный в НИИ ПМ, и учитывая последние тенденции в развитии инерциальных навигационных систем, можно предложить иной вариант построения трехкомпонентного резервированного ВСА, который позволяет значительно уменьшить габаритные размеры и массу прибора, а также обладает рядом других положительных свойств.

Построим трехкомпонентный акселерометр, измерительные оси которого расположены вдоль осей  $X, Y, Z$  правой прямоугольной декартовой системы координат, задаваемой базовыми элементами прибора. Измерительную ось однострунного ЧЭ, содержащего струну и инерционную массу, определим как единичный вектор (орт), направленный вдоль струны от инерционной массы. Расположим четыре ЧЭ с измерительными осями, определенными как орты  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ , в системе координат  $0XYZ$  таким образом, что их ориентация задается таблицей направляющих косинусов.

	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{c}$	$\bar{d}$
$X$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
$Y$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
$Z$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$

Заметим, что при этом векторы  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$  направлены к вершинам правильного тетраэдра. Орты  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$  направлены под равными углами друг к другу, так как  $\bar{a}\bar{b} = \bar{a}\bar{c} = \bar{a}\bar{d} = \bar{b}\bar{c} = \bar{b}\bar{d} = \bar{c}\bar{d} = -1/3$ . Угол между любой парой ортов равен  $\beta = \arccos(-1/3) = 109^\circ 28' 16,3''$ . Каждый орт образует с осями системы координат, составляющими октант, в котором расположен данный орт, равные углы  $\beta/2 = 54^\circ 44' 8,2''$ . Предлагаемая ориентация измерительных осей ЧЭ обеспечивает помимо компактности конструкции прибора простоту преобразования выходных показаний ЧЭ в три компоненты вектора ускорения, определяемые по дифференциальным частотным выходам при минимальном числе ЧЭ [2].

Действительно, проекции ускорения  $\bar{W} = (W_X, W_Y, W_Z)$  на направления ортов  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}, \bar{d}$ , совпадающие с измерительными осями ЧЭ, определяются, соответственно, соотношениями

$$\begin{aligned}
 W_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(W_X + W_Y + W_Z), \\
 W_2 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-W_X - W_Y + W_Z), \\
 W_3 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(-W_X + W_Y - W_Z), \\
 W_4 &= \frac{1}{\sqrt{3}}(W_X - W_Y - W_Z).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Тогда проекции вектора ускорения  $\bar{W}$  на оси  $X, Y, Z$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 W_X &= \frac{\sqrt{3}}{4}(W_1 - W_2 - W_3 + W_4), \\
 W_Y &= \frac{\sqrt{3}}{4}(W_1 - W_2 + W_3 - W_4), \\
 W_Z &= \frac{\sqrt{3}}{4}(W_1 + W_2 - W_3 - W_4).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

При этом

$$W_1 + W_2 + W_3 + W_4 = 0. \tag{3}$$

Для каждого струнного ЧЭ справедливо соотношение

$$f_i = f_{0i} + KW_i, \quad (4)$$

где  $f_i$  — частота колебаний струны,  $f_{0i}$  — частота колебаний струны при отсутствии ускорения,  $K$  — коэффициент преобразования,  $W_i$  — проекция ускорения на измерительную ось ЧЭ,  $i = 1, \dots, 4$ .

С учетом равенства (4) соотношения (2) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} W_X &= \frac{\sqrt{3}}{4K} [(f_1 - f_2 - f_3 + f_4) - (f_{01} - f_{02} - f_{03} + f_{04})], \\ W_Y &= \frac{\sqrt{3}}{4K} [(f_1 - f_2 + f_3 - f_4) - (f_{01} - f_{02} + f_{03} - f_{04})], \\ W_Z &= \frac{\sqrt{3}}{4K} [(f_1 + f_2 - f_3 - f_4) - (f_{01} + f_{02} - f_{03} - f_{04})]. \end{aligned} \quad (5)$$

Выражения, находящиеся в первых круглых скобках в формулах (5), можно рассматривать как дифференциальные частотные выходы трехкомпонентного акселерометра, измеряющего проекции ускорения  $W_X$ ,  $W_Y$ ,  $W_Z$  на три взаимно ортогональные оси  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Выражения во вторых круглых скобках в формулах (5) представляют собой значения этих выходов при отсутствии измеряемых ускорений, т.е. нулевые показания прибора. Существенно при этом, что если ЧЭ подобрать или отрегулировать, обеспечив равенство температурных коэффициентов их частот, то можно значительно уменьшить температурный дрейф нулевых показаний. Подобным образом компенсируются и другие погрешности, вносимые факторами, оказывающими одинаковое влияние на ЧЭ.

Как видно из изложенного, реализуется дифференциальный трехкомпонентный струнный акселерометр, который, в отличие от традиционной компоновки, содержит четыре ЧЭ вместо шести (при расположении по два дифференциально включенных ЧЭ вдоль каждой из трех взаимно ортогональных осей), что позволяет уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость прибора и повысить его надежность.

Рассмотренная схема построения акселерометра удобна также тем, что позволяет легко регулировать направления его измерительных осей относительно установочных баз. Обыкновенно подобная регулировка, особенно при финишной доводке, сопряжена с необходимостью выполнения точных слесарных работ, трудоемких и требующих высокой квалификации. В предлагаемом акселерометре эта операция может быть выполнена аналитически — изменением коэффициентов в формулах (5). Пусть, например, требуется изменить направление оси  $X$  на малый угол  $\alpha$  в плоскости  $0XY$  в сторону оси  $Y$ . Обозначая новое направление оси  $X$  как  $X'$ , проекцию ускорения на это направление в первом приближении можем определить по формуле

$$W_{X'} = W_X + \alpha W_Y. \quad (6)$$

С учетом соотношений (2), (4) последнюю формулу можно представить в виде

$$W_{X'} = \frac{\sqrt{3}}{4K} \left( ((1 + \alpha)(f_1 - f_2) - (1 - \alpha)(f_3 - f_4)) - \right. \\ \left. - ((1 + \alpha)(f_{01} - f_{02}) - (1 - \alpha)(f_{03} - f_{04})) \right). \quad (7)$$

Используя этот прием, можно скорректировать любую измерительную ось в любом направлении.

При любом единичном отказе в рассмотренной схеме имеющаяся избыточность информации позволяет измерить все три компоненты ускорения, но в этом случае невозможно будет построить дифференциальные частотные выходы и погрешность измерения существенно возрастет. Эта ситуация аналогична отказу одной струны в однокомпонентном дифференциальном ВСА.

Для измерения трех компонент вектора ускорения с обеспечением повышенных требований к надежности и сохранением дифференциальных частотных выходов следует скомпоновать по предложенной схеме блок из четырех дифференциальных струнных акселерометров. В этом случае отказ одного из ВСА может быть выявлен по превышающему критическое значение изменению суммы частот его струн, которая в первом приближении не зависит от величины измеряемого ускорения, а три компоненты вектора ускорения могут быть рассчитаны по дифференциальным выходам трех исправных акселерометров.

Заметим в заключение, что высокая точность ВСА и высокая разрешающая способность по измеряемой скорости делают возможным его применение в гравиметрии. При имеющемся разрешении по скорости  $5 \cdot 10^{-5}$  м/с для достижения измерения ускорения силы тяжести с точностью не менее 0,1 мГал достаточно времени наблюдения не более 1 мин, что делает возможным использование ВСА в гравиметрических измерениях на подвижных объектах. При таком применении также целесообразно построение акселерометра по рассмотренной трехкомпонентной схеме, что позволит измерять полный вектор ускорения силы тяжести без жестких требований к приведению в горизонтальное положение основания прибора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chichinadze N., Ilyin V., Novgorodski A., Barbour N. The 3rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation, 1996.
2. Харьков И. А., Шустров А. Д. Трехкомпонентный дифференциальный струнный акселерометр. Патент РФ № 2101712 на изобретение, 1995.

Статья поступила в редакцию 19.09.2003

Игорь Алексеевич Харьков родился в 1938 г., окончил в 1961 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, начальник лаборатории НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова. Автор более 30 научных работ в области инерциальных систем управления и их элементов.

I.A. Kharkov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Ph. D. (Eng.), head of laboratory of the Research Institute for Applied Mechanics n. a. academician V.I. Kuznetsov. Author of over 30 publications in the field of inertial control systems and their components.