

К. т. н. Н. Г. ЧЕРНЯК, Н. А. МУХОЕД

Украина, г. Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»
E-mail: alex@cisavd.ntu-kpi.kiev.ua

Дата поступления в редакцию
18.04 2001 г.
Оппонент к. т. н. В. В. ЛЯХИН

ПОСТРОЕНИЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ И УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Показана возможность разработки инерциального датчика с заданными параметрами на основе вибрирующих и вращающихся линейных акселерометров.

Инерциальный датчик (ИД) предназначен для одновременного измерения переносных линейного ускорения и угловой скорости летательного аппарата (ЛА) в связанной с ним системе координат. Отличительной особенностью ИД является то, что в качестве инерциальных чувствительных элементов он содержит только линейные акселерометры. При этом в основу принципа измерения датчиком угловой скорости ЛА положено измерение акселерометрами ускорения Кориолиса, возникающего при создании в ИД требуемого относительного движения акселерометров и наличии переносной угловой скорости движения ЛА. Величина ускорения Кориолиса, при условии постоянства параметров относительного движения акселерометров, является мерой величины угловой скорости ЛА.

Ориентировочные технические характеристики ИД: диапазон измеряемых линейных ускорений $w_{\text{вп}} = \pm 50g$, диапазон измеряемых угловых скоростей $\Omega_{\text{вп}} = \pm 300$ °/с; приведенные к диапазонам погрешности измерения, соответственно, $\Delta_w = 2\%$ и $\Delta_\Omega = 5...10\%$.

Принцип измерения

В ИД для возникновения ускорения Кориолиса могут быть реализованы вращательное или поступательное относительное движение акселерометров. Рассмотрим принцип измерения датчиком линейного ускорения и угловой скорости ЛА для обоих случаев формирования относительного движения акселерометров.

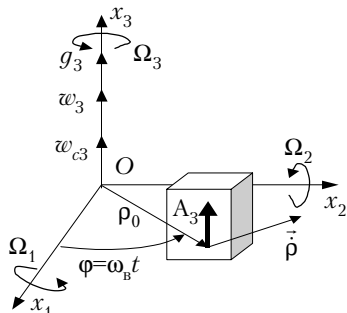


Рис. 1. Кинематическая схема вращающегося акселерометра

Случай *вращательного относительного движения акселерометров.*

Акселерометр A_3 (см. **рис. 1**) установлен на ЛА так, что его ось чувствительности (она же — измерительная ось) параллельна оси x_3 связанной с объектом системы координат $Ox_1x_2x_3$ и вращается (вокруг оси x_3) при помощи приводного механизма с постоянной круговой частотой ω_B по периодическому закону

$$\vec{\rho} = \{\rho_0 \cos \omega_B t; \rho_0 \sin \omega_B t; 0\}, \quad (1)$$

где ρ_0 — расстояние от центра масс чувствительного элемента акселерометра до центра вращения O ;

t — время.

Если ЛА совершает пространственное переносное движение с линейным ускорением $\vec{w}_e = \{w_1; w_2; w_3\}$ и угловой скоростью $\vec{\Omega} = \{\Omega_1; \Omega_2; \Omega_3\}$, то абсолютное ускорение чувствительного элемента акселерометра определяется выражением [1, с. 81]

$$\vec{w} = \vec{w}_e + \vec{w}_r + \vec{w}_c,$$

где \vec{w}_e — вектор переносного ускорения, $\vec{w}_e = \vec{w} + \vec{\Omega} \times \vec{\rho} + \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{\rho})$;

$$\vec{\Omega} — вектор углового ускорения, \vec{\Omega} = \frac{d\vec{\Omega}}{dt};$$

$$\vec{w}_r — вектор относительного ускорения, \vec{w}_r = \frac{d^2 \vec{\rho}}{dt^2};$$

$$\vec{w}_c — вектор ускорения Кориолиса, \vec{w}_c = 2\vec{\Omega} \times \frac{d\vec{\rho}}{dt};$$

$$\frac{d\vec{\rho}}{dt} — вектор скорости относительного движения акселерометра.$$

При этом кажущееся ускорение, измеряемое акселерометром, имеет вид

$$a_3 = (w_3 - g_3) + 2\rho_0 \omega_B (\Omega_1 \cos \omega_B t + \Omega_2 \sin \omega_B t) + \rho_0 \cos \omega_B t (\Omega_1 \Omega_3 - \dot{\Omega}_2) + \rho_0 \sin \omega_B t (\Omega_2 \Omega_3 + \dot{\Omega}_1), \quad (2)$$

где g_3 — проекция ускорения силы тяготения Земли.

В формулу (2) входят постоянное или медленно меняющееся слагаемое, пропорциональное линейному ускорению основания w_3 , и гармонические (на частоте ω_B вращения привода) слагаемые, сдвинутые друг относительно друга по фазе на $\pi/2$, про-

порциональные переносным угловым скоростям Ω_1 и Ω_2 и угловым ускорениям $\dot{\Omega}_1$ и $\dot{\Omega}_2$ движения основания.

Для разделения информации об измеряемых компонентах переносных линейного ускорения w_3 и угловых скоростей Ω_1 и Ω_2 в выходном сигнале акселерометра может быть применена схема, представленная на **рис. 2**, где 1 – акселерометр; 2 – генератор синусоидальных сигналов с частотой ω_b ; 3 – приводной механизм, осуществляющий вращательное относительное движение акселерометра с частотой ω_b ; 4 – электронный процессор системы обработки выходного сигнала акселерометра. Разделение информации реализуется путем построения отдельных каналов по линейному ускорению и угловым скоростям в электронном процессоре при обработке выходного сигнала акселерометра.

Для определения оценки \hat{w}_3 измеряемой составляющей w_3 вектора кажущегося ускорения выражение (2) интегрируется по периоду T в блоке интегрирования 5 (см. рис. 2):

$$\hat{w}_3 = \frac{1}{T} \int_0^T a_3 dt = \frac{1}{T} [w_3 - g_3] \int_0^T dt = w_3 - g_3. \quad (3)$$

Для получения оценки по угловой скорости Ω_1 кажущееся ускорение a_3 предварительно модулируется по функции $\text{Sign} \cos \omega_b t$ в блоке 6. В результате последующего интегрирования по периоду T (блок 7) получается сигнал, линейно зависящий от измеряемой составляющей Ω_1 вектора переносной угловой скорости:

$$\begin{aligned} \hat{\Omega}_1 &= \frac{1}{8\rho_0} \int_0^T a_3 \text{Sign} \cos \omega_b t dt = \\ &= \frac{1}{8\rho_0} (2\Omega_1 \rho_0 \omega_b + \Omega_3 \rho_0) \int_0^{2\pi/\omega_b} \cos \omega_b t \text{Sign} \cos \omega_b t dt = \\ &= \frac{\omega_b}{4} \left(\Omega_1 + \frac{\Omega_1 \Omega_3}{2\omega_b} \right) \frac{1}{\omega_b} \int_0^{2\pi} \cos \omega_b \text{Sign} \cos \omega_b t d(\omega_b t) = \\ &= \left(\Omega_1 + \frac{\Omega_1 \Omega_3}{2\omega_b} \right) \int_0^{\pi/2} \cos \omega_b t d(\omega_b t) = \Omega_1 \left(1 + \frac{\Omega_3}{2\omega_b} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом,

$$\hat{\Omega}_1 = k_{\Omega} \Omega_1, \quad (4)$$

где $k_{\Omega} = 1 + \frac{\Omega_3}{2\omega_b}$.



Рис. 2. Функциональная схема инерциального датчика

По каналу угловой скорости Ω_2 выражение (2) в блоке 8 соответственно умножается на периодическую функцию $\text{Sign} \sin \omega_b t$, а затем также интегрируется по периоду T (блок 9):

$$\hat{\Omega}_2 = \frac{1}{8\rho_0} \int_0^T a_3 \text{Sign} \sin \omega_b t dt \approx \Omega_2 \left(1 + \frac{\Omega_3}{2\omega_b} \right) = k_{\Omega} \Omega_2. \quad (5)$$

Методическая дополнительная погрешность в формулах (4) и (5) от влияния перекрестной угловой скорости Ω_3 невелика, поскольку Ω_3 мала, а ω_b – велика.

Рассмотрим случай *поступательного относительного вибрационного движения акселерометра*.

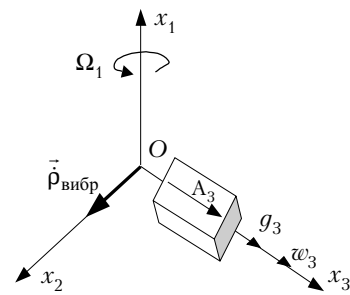


Рис. 3. Кинематическая схема поступательно вибрирующего акселерометра

Пусть акселерометр A_3 (**рис. 3**) совершает относительное поступательное вибрационное движение с постоянной круговой частотой ω_b вдоль оси x_2 по закону

$$\vec{r}_{\text{вибр}} = \{0; x_0 \sin \omega_b t; 0\}, \quad (6)$$

где x_0 – амплитуда вибрации.

Тогда кажущееся ускорение основания, измеряемое акселерометром, описывается выражением

$$a_3 = (w_3 - g_3) + 2\Omega_1 x_0 \omega_b \cos \omega_b t + (\Omega_2 \Omega_3 + \dot{\Omega}_1) x_0 \sin \omega_b t. \quad (7)$$

В формулу (7), так же как и в формулу (2), входят постоянное или медленно меняющееся слагаемое, пропорциональное линейному ускорению ос-

нования ω_3 , и гармоническое слагаемое, пропорциональное переносной угловой скорости Ω_1 движения основания.

Обработка выходного сигнала акселерометра в этом случае также происходит согласно схеме, представленной на рис. 2, но отличается тем, что не содержит канала обработки выходного сигнала акселерометра по переносной угловой скорости Ω_2 (отсутствуют блоки 8 и 9). Значения измеряемых линейного ускорения и угловой скорости на выходе электронного процессора определяются согласно выражениям (3) и (4). При этом $k_\Omega=1$, т. е. отсутствует методическая дополнительная погрешность определения угловой скорости Ω_1 от влияния перекрестной угловой скорости Ω_3 .

Базовые схемы построения инерциального датчика

Рассмотрим две базовые схемы построения инерциального датчика.

В *первой схеме* (рис. 4) два акселерометра A^1 и A^2 диаметрально установлены на платформе. Оси чувствительности акселерометров параллельны оси

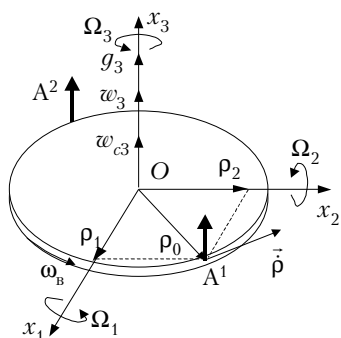


Рис. 4. Базовая схема построения инерциального датчика на основе вращающихся акселерометров

x_3 объекта. Платформа с акселерометрами вращается вокруг оси x_3 по закону (1). Измеряемые акселерометрами кажущиеся ускорения имеют вид

$$a_{\text{вращ}}^{1,2} = (\omega_3 - g_3) \pm 2\rho_0\omega_b(\Omega_1 \cos \omega_b t + \Omega_2 \sin \omega_b t) \pm \rho_0 \cos \omega_b t(\Omega_1\Omega_3 - \dot{\Omega}_2) \pm \rho_0 \sin \omega_b t(\Omega_2\Omega_3 - \dot{\Omega}_1), \quad (8)$$

где в парных знаках "±" верхний знак соответствует акселерометру A^1 , а нижний — акселерометру A^2 .

В выражения (8), аналогично выражению (2), входят постоянное или медленно меняющееся слагаемое, пропорциональное линейному ускорению основания ω_3 , и гармонические слагаемые, сдвинутые друг относительно друга по фазе на $\pi/2$, пропорциональные переносным угловым скоростям Ω_1 и Ω_2 движения основания.

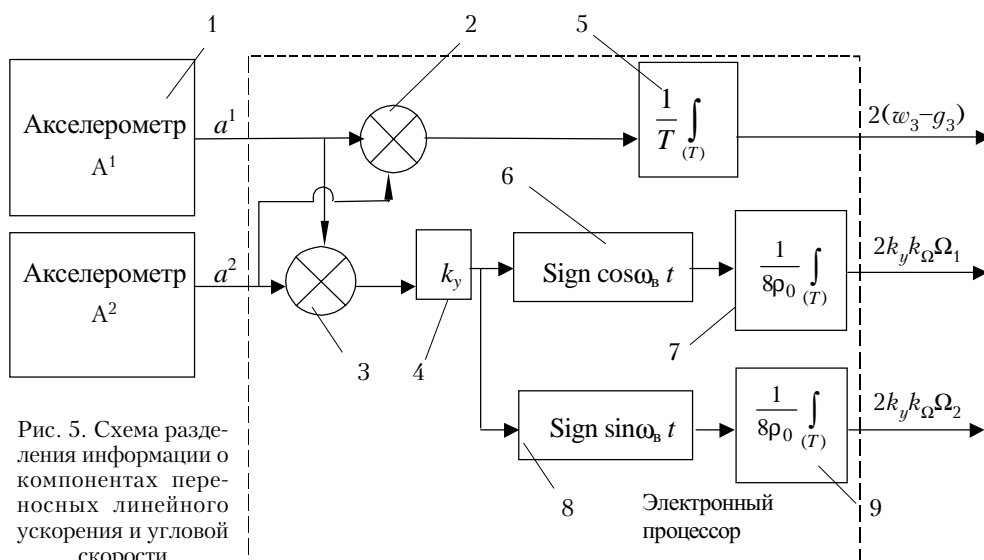


Рис. 5. Схема разделения информации о компонентах переносных линейного ускорения и угловой скорости

Разделение информации о компонентах переносных линейного ускорения и угловой скорости в данной схеме построения инерциального датчика происходит по описанному ранее принципу согласно функциональной схеме, приведенной на рис. 5. При этом в схеме рис. 5 выполняется предварительное сложение в сумматоре 2 выходных сигналов акселерометров по каналу поступательного ускорения и вычитание в сумматоре 3 выходных сигналов акселерометров по каналам угловой скорости Ω_1 и Ω_2 . Сумматор 2 формирует сумму

$$a_{\text{вращ}}^1 + a_{\text{вращ}}^2 = 2(\omega_3 - g_3),$$

которая в дальнейшем, после обработки в блоке интегрирования 5 по формуле (3), и является выходным сигналом электронного процессора по каналу линейного ускорения.

Сумматор 3 формирует разность

$$a_{\text{вращ}}^1 - a_{\text{вращ}}^2 = 4\rho_0\omega_b \left[\cos \omega_b t \left(\Omega_1 - \frac{\dot{\Omega}_2}{2\omega_b} + \frac{\Omega_1\Omega_3}{2\omega_b} \right) + \sin \omega_b t \left(\Omega_2 - \frac{\dot{\Omega}_1}{2\omega_b} + \frac{\Omega_2\Omega_3}{2\omega_b} \right) \right],$$

которая поступает в блоки 6, 7 электронного процессора по каналу переносной угловой скорости Ω_1 и в блоки 8, 9 по каналу переносной угловой скорости Ω_2 (см. рис. 5). Значения оценок угловых скоростей Ω_1 и Ω_2 на выходе электронного процессора описываются выражениями

$$\hat{\Omega}_1^{\text{вращ}} = \frac{k_y}{8\rho_0} \int_0^T (a_{\text{вращ}}^1 - a_{\text{вращ}}^2) \text{Sign} \cos \omega_b t dt = 2k_y k_\Omega \Omega_1$$

и

$$\hat{\Omega}_2^{\text{вращ}} = \frac{k_y}{8\rho_0} \int_0^T (a_{\text{вращ}}^1 - a_{\text{вращ}}^2) \text{Sign} \sin \omega_b t dt = 2k_y k_\Omega \Omega_2,$$

где k_Ω соответствует выражению (4).

Данная схема, по сравнению со схемой с одним вращающимся акселерометром, позволяет в два раза повысить чувствительность по каналам линейного ускорения и угловой скорости, а также (после ис-

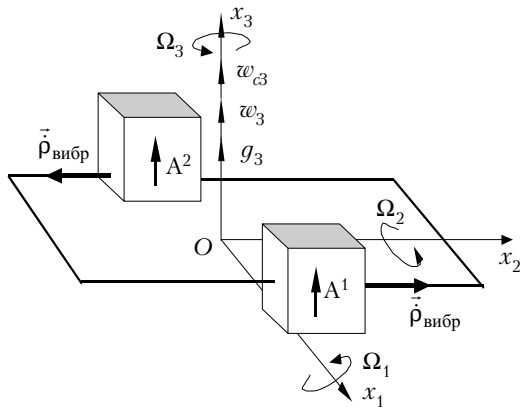


Рис. 6. Базовая схема построения инерциального датчика на основе поступательно вибрирующих акселерометров

ключения на выходе второго сумматора достаточно большой постоянной составляющей, пропорциональной поступательному ускорению w_3) осуществить требуемое предварительное усиление на коэффициент k_y (блок 4 на рис. 5) достаточно малого по величине переменного сигнала, зависящего от угловой скорости, перед его обработкой в блоках 6 и 8.

Вторая схема (рис. 6) также содержит два акселерометра A^1 и A^2 с осями чувствительности, параллельными оси x_3 объекта. Акселерометры установлены в раме, которая совершает относительное поступательное вибрационное движение вдоль оси x_2 таким образом, что акселерометры движутся в противоположные стороны по закону (6) [2].

В этом случае кажущиеся ускорения, измеряемые акселерометрами, определяются выражением, аналогичным выражению (7):

$$a_{\text{вибр}}^{1,2} = (w_3 - g_3) \pm 2\Omega_1 x_0 w_b \cos \omega_b t \pm (\Omega_2 \Omega_3 + \dot{\Omega}_1) x_0 \sin \omega_b t,$$

где в парных знаках "±" верхний знак также соответствует акселерометру A^1 , а нижний — акселерометру A^2 .

Разделение информации о компонентах переносных поступательного ускорения и угловой скорости в данной базовой схеме отличается от рассмотренной ранее тем, что канал по переносной угловой скорости Ω_2 отсутствует. Второй сумматор формирует разность вида

$$a_{\text{вибр}}^1 - a_{\text{вибр}}^2 = 4\Omega_1 x_0 w_b \cos \omega_b t + 2(\Omega_2 \Omega_3 + \dot{\Omega}_1) x_0 \sin \omega_b t,$$

при этом значение оценки переносной угловой скорости Ω_1 на выходе электронного процессора по каналу переносной угловой скорости Ω_1 описывается выражением

$$\hat{\Omega}_1^{\text{вибр}} = \frac{k_y}{16\rho_0} \int_0^T (a_{\text{вибр}}^1 - a_{\text{вибр}}^2) \text{Sign} \cos \omega_b t dt = 2k_y \Omega_1.$$

Преимущества данной базовой схемы:

— по сравнению со схемой с одним поступательно вибрирующим акселерометром, она также позволяет в два раза повысить чувствительность по каналам линейного ускорения и угловой скорости и осу-

ществить требуемое предварительное усиление на коэффициент k_y достаточно малого по величине переменного сигнала, зависящего от угловой скорости;

— по сравнению со схемой с двумя вращающимися акселерометрами она проще при задании относительного движения.

Требования к функциональным элементам инерциального датчика

Основными функциональными элементами инерциального датчика, определяющими его точностные, массогабаритные и эксплуатационные характеристики, являются акселерометры и приводной механизм.

Численный анализ выражения (7) для наиболее приоритетной схемы построения ИД с поступательно вибрирующими акселерометрами (см. рис. 6) показывает, что в ИД с приведенными в начале статьи техническими характеристиками целесообразно применить:

— акселерометры средней точности компенсационного типа, обеспечивающие диапазон измерения не менее $\pm 550 \text{ м/с}^2$, пороговую чувствительность не более $\pm 2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$, приведенную к диапазону измерения погрешность не более $0,1 \dots 0,2\%$, полосу пропускания не менее 400 Гц ;

— приводной механизм магнитоэлектрического или пьезоэлектрического принципа действия, обеспечивающий относительное поступательное вибрационное движение рамы с акселерометрами (согласно рис. 6) на частоте 100 Гц с амплитудой не менее $4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$.

Следует отметить, что требуемые величины пороговой чувствительности и приведенной погрешности измерения акселерометров определяются требованиями по приведенной погрешности измерения угловой скорости инерциальным датчиком и, в случае уменьшения величины последней, должны быть также пропорционально уменьшены. Это приведет к необходимости применения в составе ИД акселерометров более высокой точности.

Выводы

Таким образом, предложены две базовые схемы построения нового типа инерциального датчика для измерения линейного ускорения и угловой скорости ЛА, а также рассмотрены физико-технические основы его работы. Как показано, более перспективна схема ИД с двумя поступательно вибрирующими акселерометрами. Предъявленные требования к акселерометрам и приводному механизму как к основным функциональным узлам датчика и полученные результаты позволяют разработать ИД такой схемы с заданными техническими характеристиками.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Павловский М. А., Путья Т. В. Теоретическая механика. — К.: Вища шк., 1985.
2. Пат. 4510802 США, МКИ G 01 C 19/56, 23/00, G 01 P 15/08. Angular rate sensor utilizing two vibrating accelerometers secured to a parallelogram linkage / Rex B. Peters (США); Sundstrand Data Control Inc. — Оpubл. 16.04.85.