

электронный журнал

МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

Издатель: ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Исидорова В.В., Кулешов А.В.,

УДК 531.383.-11

МГТУ им. Н.Э. Баумана
victoriya.isidorova@gmail.com

В настоящее время одним из наиболее интенсивно и динамично развивающихся инженерных направлений является микросистемная техника, так как перспективы современного приборостроения связаны в первую очередь с созданием приборов, обладающих малой массой, габаритами, энергопотреблением, временем готовности и себестоимостью, но при этом обеспечивающих необходимую точность измерений. В свою очередь, одним из направлений микросистемной техники является разработка и усовершенствование миниатюрных гироскопических приборов, к которым относятся микромеханические гироскопы.

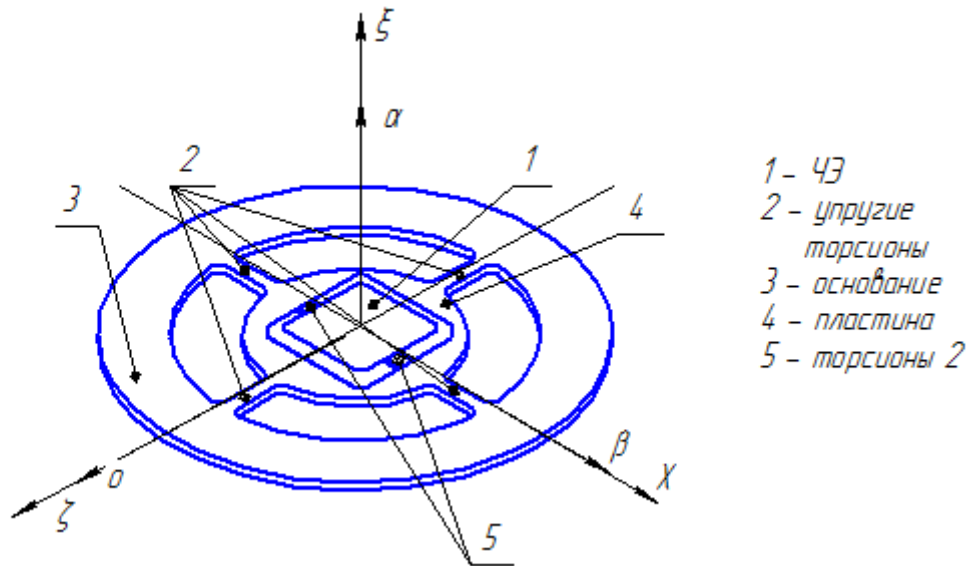
Акселерометры и гироскопы принадлежат классу инерциальных датчиков, области применения которых крайне разнообразны: от различных автомобильных устройств, как то автоблокировочные системы и подушки безопасности, до инерциальных навигационных систем, обеспечивающих определение параметров ориентации и координат наземных, подводных и воздушных объектов.

Микромеханические гироскопы являются микромеханическими системами, в которых энергия вынужденных (первичных) колебаний инерционной массы на упругом подвесе (резонаторе) при появлении переносной угловой скорости преобразуется в энергию вторичных колебаний, в которых содержится информация об измеряемой угловой скорости. Это преобразование осуществляется посредством действия на резонатор кориолисовых сил (моментов) инерции при вращении резонатора с переносной угловой скоростью, вектор которой перпендикулярен вектору кинетического момента.

По виду движения инерционных масс в режиме возбуждения различают гироскопы L-L типа, R-R типа и L-R, R-L типа.

В микромеханическом гироскопе R-R типа движение инерционных масс по оси возбуждения и по оси съема вращательное (угловые колебания)

Кинематическая схема исследуемого прибора выглядит следующим образом:



Ось $O\xi$ – ось возбуждения колебаний

Ось $O\zeta$ – измерительная ось датчика угловой скорости (ДУСа)

Ось Ox – выходная ось.

ДУС состоит из чувствительного элемента (ЧЭ) 1, который закреплен на основании 3 с помощью упругого подвеса 4. Основание (наружная рамка) соединено с внутренней рамкой посредством четырех упругих торсионов 2. Внутренняя рамка и торсионы образуют упругий подвес. Он обеспечивает одну степень свободы ЧЭ вокруг оси ξ , перпендикулярной плоскости основания 3, которая определяется углом α . Вторая степень свободы по выходной оси обеспечивается торсионами 5.

Принцип действия прибора заключается в следующем. Пусть основание вращается вокруг оси $O\zeta$ с некоей угловой скоростью Ω . Гироскопу принудительно сообщаются колебания вокруг оси возбуждения $O\xi$ с угловой скоростью α' . Возбуждение колебаний по оси $O\xi$ осуществляется в режиме автоколебаний, это обеспечивается специальной магнитоэлектрической системы возбуждения колебаний. По оси возбуждения колебания происходят в резонансном режиме с целью повышения чувствительности ДУСа в целом.

Пусть колебания по оси возбуждения подчиняются гармоническому закону:

$$\alpha = \alpha_0 \sin(\omega t)$$

Колебательное движение α' является причиной появления кинетического момента H , который стремится совместиться с вектором угловой скорости основания Ω . Вследствие этого появляется гироскопический момент $M_{гир}$ и угловая скорость β' вокруг оси Ox (которые также являются гармоническими функциями как и α').

Уравнения движения такого гироскопа имеют вид:

$$A\beta'' + D_\beta\beta' + [C_\beta + (B - C)(\alpha'^2 - \Omega^2)]\beta = (C - B - A)\alpha'\Omega - (C - B)\alpha'\beta^2\Omega - A\Omega'\alpha \quad (*), \text{ где}$$

A, B, C – осевые моменты инерции пластины вокруг осей Ox, Oy, Oz соответственно.

C_β – угловая жесткость торсионов вокруг оси β

D_β – демпфирование вокруг оси β .

Предпоследним слагаемым в правой части уравнения можно пренебречь. Тогда для постоянной измеряемой угловой скорости Ω решение для выходной координаты β для установившегося значения будет иметь вид:

$$\beta = \frac{(C - A - B)\alpha'_0}{\sqrt{(C_\beta + (B - C)(\alpha'^2 - \Omega^2) - A\omega^2)^2 + (D_\beta\omega)^2}} \Omega * \sin [\omega t + \arctg \frac{D_\beta\omega}{(C_\beta + (B - C)(\alpha'^2 - \Omega^2) - A\omega^2)}]$$

Данное выражение для β иллюстрирует, что при наличии измеряемой угловой скорости Ω , по координате β возникают установившиеся колебания на частоте возбуждения ω с амплитудой, пропорциональной измеряемой угловой скорости Ω :

$$\beta_m = \frac{(C - A - B) * \alpha'_0}{\sqrt{(C_\beta + (B - C)(\alpha'^2 - \Omega^2) - A\omega^2)^2 + (D_\beta \omega)^2}} \Omega$$

Также как и другие гироскопы, данный гироскоп может работать как в дорезонансном режиме, так и в резонансном.

В дорезонансном режиме, когда гироскопический момент полностью уравновешен упругим моментом торсионов, выходная координата равна

$$\beta = \frac{(C-A-B)*\Omega*\alpha'_0}{C_\beta} * \sin \omega t$$

Для такого режима характерны высокая стабильность выходного сигнала, но низкая чувствительность прибора, широкая полоса пропускания.

В резонансном (частота колебаний по оси возбуждения и по оси съема равны, гироскопический момент уравновешен моментом аэродинамического демпфирования) режиме:

$$\beta = \frac{(C-A-B)*\Omega*\alpha'_0}{D_x \omega} * \sin [\omega t - \frac{\pi}{2}]$$

Для него характерны противоположные характеристики: максимальная чувствительность ДУСа, нестабильность выходного сигнала, узкая полоса пропускания.

Для исследования полосы пропускания данного прибора, необходимо построить амплитудно-частотную характеристику гироскопа. Поскольку β модулируется частотой возбуждения для получения выходного сигнала на постоянном токе, сигнал с датчика угла по оси съема поступает на выход через ФЧВ.

Пусть $\Omega = \Omega_0 \cos \vartheta t$. Тогда уравнение (*) можно представить в следующем виде:

$\beta'' + 2\xi_\beta \omega_{\beta 0} \beta' + \omega_{\beta 0}^2 \beta = \frac{K}{2} \Omega_0 [\sin(\omega - \vartheta) t + \sin(\omega + \vartheta) t]$, где $K = \frac{(C-B-A)\alpha'}{A}$, то составляющая решения для первой и второй боковых частот ($\omega_1 = \omega - \vartheta$ и $\omega_2 = \omega + \vartheta$ соответственно) будет равна:

$$\beta_1 = \frac{\Omega_0}{2} \left[\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \sin(\omega_1 t) + \frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} (\omega - \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \cos(\omega_1 t) \right];$$

$$\beta_2 = \frac{\Omega_0}{2} \left[\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \sin(\omega_2 t) + \frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} (\omega + \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \cos(\omega_2 t) \right]$$

Приведем выражения для β_1 и β_2 к одной функции:

$$\beta_1 = \frac{\Omega_0}{2} \sqrt{\left[\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - \omega_1^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - \omega_1^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 \omega_1^2} \right]^2 + \left[\frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} \omega_1}{[\omega_{\beta 0}^2 - \omega_1^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 \omega_1^2} \right]^2} \left[\sin \left(\omega_1 t + \arctg \left(\frac{2\xi_\beta \omega_{\beta 0}}{\omega_{\beta 0}^2 - \omega_1^2} \right) \right) \right]$$

$$\beta_2 = \frac{\Omega_0}{2} \sqrt{\left[\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - \omega_2^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - \omega_2^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 \omega_2^2} \right]^2 + \left[\frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} \omega_2}{[\omega_{\beta 0}^2 - \omega_2^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 \omega_2^2} \right]^2} \left[\sin \left(\omega_2 t + \arctg \left(\frac{2\xi_\beta \omega_{\beta 0}}{\omega_{\beta 0}^2 - \omega_2^2} \right) \right) \right]$$

Сложим решения β_1 и β_2 , получим решение на частоте модуляции:

$$\beta = \frac{\Omega_0}{2} \left[\left(\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} - \frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \right) \sin(\vartheta t) + \right.$$

$$\left. \left(\frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} (\omega - \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} + \frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} (\omega + \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \right) \cos(\vartheta t) \right] \cos(\omega t) +$$

$$\frac{\Omega_0}{2} \left[\left(\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} + \frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \right) \cos(\vartheta t) + \right.$$

$$\left. \left(\frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} (\omega - \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} - \frac{K2\xi_\beta \omega_{\beta 0} (\omega + \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_\beta^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \right) \sin(\vartheta t) \right] \sin(\omega t)$$

Введем

обозначения:

A =

$$\frac{\Omega_0}{2} \left[\left(\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} - \frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \right) \sin(\vartheta t) + \left(\frac{K2\xi_{\beta} \omega_{\beta 0} (\omega - \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} + \frac{K2\xi_{\beta} \omega_{\beta 0} (\omega + \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \right) \cos(\vartheta t) \right]$$

$$B = \frac{\Omega_0}{2} \left[\left(\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} + \frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \right) \cos(\vartheta t) + \left(\frac{K2\xi_{\beta} \omega_{\beta 0} (\omega - \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} - \frac{K2\xi_{\beta} \omega_{\beta 0} (\omega + \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \right) \sin(\vartheta t) \right]$$

Тогда выражение для β примет вид:

$$\beta = A \cos(\omega t) + B \sin(\omega t)$$

В общем виде выходной сигнал ФЧВ можно получить умножением последнего выражения на гармоническую функцию в соответствующей фазе (например, на $\sin(\omega t)$):

$$\beta = A \cos(\omega t) \sin(\omega t) + B \sin(\omega t) \sin(\omega t) = \frac{A}{2} \sin(2\omega t) + \left(\frac{B}{2} - \frac{B}{2} \cos(2\omega t) \right)$$

Сигналы с двойной частотой будут отфильтрованы, и на выходе останется сигнал:

$$\frac{B}{2} = \frac{B_1}{2} \cos \vartheta t + \frac{B_2}{2} \sin \vartheta t = \sqrt{\frac{B_1^2}{4} + \frac{B_2^2}{4}} \sin(\vartheta t + \varphi), \text{ где}$$

$$B_1 = \left(\frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} + \frac{K[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} \right)$$

$$B_2 = \left(\frac{K2\xi_{\beta} \omega_{\beta 0} (\omega - \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega - \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega - \vartheta)^2} - \frac{K2\xi_{\beta} \omega_{\beta 0} (\omega + \vartheta)}{[\omega_{\beta 0}^2 - (\omega + \vartheta)^2]^2 + 4\xi_{\beta}^2 \omega_{\beta 0}^2 (\omega + \vartheta)^2} \right)$$

Т.о. выражение для АЧХ примет вид:

$$A = \sqrt{\frac{B_1^2}{4} + \frac{B_2^2}{4}}$$

Исследование данной характеристики позволит получить информацию о полосе пропускания гироскопа для различных режимов его работы и параметрах, влияющих на ее ширину, на основании чего определить требования к параметрам датчиков для обеспечения требуемой полосы пропускания.

Литература

1. В.Я. Распопов «Микромеханические приборы»: учебное пособие, - Москва: Машиностроение, 2007
2. Ю.А. Пономарев, А.В. Кулешов, И.Э. Джеббаров «Макет микромеханического осцилляторного гироскопа R-R типа», Труды ФГУП «НПЦ АП» №2, 2009
3. С.Ф. Коновалов, А.В. Кулешов, Е.Н. Фролов «Микромеханический вибрационный датчик угловой скорости для вращающегося носителя», Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции «Приборы и приборные системы», Тула, 2001
4. А.В. Кулешов, Курс лекций по дисциплине «Микромеханические гироскопы и акселерометры»