электронный научно-технический ж ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК

Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51036. ISSN 2307-0595

Конструктивная схема высокочувствительного осевого акселерометра на цилиндрических центрирующих элементах магниторезонансного подвеса.

05, май 2016 Корниенко А. Н. ¹, Горяева М. О. ^{1,*} УДК: 621.31

> ¹Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана *epe@bmstu.ru

Введение

Применение гиростабилизированных платформ для решения комплекса навигационных задач, в частности, при режиме высокоточного гирокомпасирования [2,3], требует обеспечения её контролируемого горизонтирования относительно местной вертикали на уровне сотых долей угловой секунды (угл. с.). Известные измерительные средства углов наклона с контактными типами опор, такие как: торсионы, виброопоры, жидкостные уровни не обеспечивают порог чувствительности менее нескольких десятых угл. с. Наиболее прогрессивное бесконтактное центрирование чувствительного элемента(ЧЭ) в маятниковых акселерометрах на магнитных опорах вращения также характеризуется достигнутым технологическим пределом ослабления моментов тяжений [1] на уровне 10^{-7} г.см. Принципиально важно представлять, что проявление магнитных тяжений в опорах вращения происходит вне зависимости от измеряемого угла наклона, а следовательно их уровень фактически определяет порог чувствительности до 0.1 угл. с.

Применение электромагнитного центрирования ЧЭ в осевом варианте акселерометра [4] на цилиндрических центрирующих элементах (ЦЭ) магниторезонансного типа в воздушной среде позволило достичь исключительного снижения пороговой чувствительности при измерении углов наклона. Полученный результат обусловлен особым схемноконструктивным построением измерительного канала МрП с управляемой жёсткостью осевым центрированием. Однако формирование дифференциально-индуктивного измерительного моста с использованием изменяющихся площадей перекрытия взаимодействующих элементов (ротор-статор) конструкции ЦЭ в кольцевых воздушных зазорах при осевом перемещении ЦЭ имеет негативные последствия. Взаимосвязь структуры измерительного канала и каналов радиального центрирования МрП проявляется изменением их жёсткости, что накладывает ограничения на допустимое смещение Δz_{max} по оси чувствительности, исключающее расстройку резонансных LC контуров. При регулируемом снижении жёсткости осевого центрирования ЧЭ величина Δz определяет не только порог чувствительности, но и границу сужения измерительного диапазона, а также крутизну и линейность характеристики преобразования $U_{выx} = \psi(\alpha)$ углов наклона α .

С целью совершенствования измерительных возможностей осевой конфигурации акселерометра предлагается разделить конструктивно и схемотехнически структуры измерительного канала и радиальных каналов центрирования МрП.

На рис.1 представлена конструктивная схема подвеса ЧЭ акселерометра с демонстрацией принципа действия, состоящего в измерении проекции силы тяжести $mg \cdot sin\alpha$ на ось z.



Рис. 1. Конструктивная схема осевого акселерометра

Радиальное центрирование ЧЭ акселерометра осуществляется конструкцией подвеса, представленной двумя цилиндрическими ЦЭ с соотношением линейных размеров роторстатор 2:1 [5] в формате $2l = l + 2\Delta l$, где *l*-длина симметрично выступающих поверхностей роторов относительно расточек полюсов статоров. Таким образом осевое смещение $\Delta z < \Delta l$ ЦЭ, образованного двумя ферритовыми роторами, объединёнными валиком, исключает нарушение перекрытия взаимодействующих поверхностей в кольцевых воздушных зазорах ЦЭ. Происходящая стабилизация жесткости радиального центрирования в ЦЭ1 и ЦЭ2 обеспечивается равно загруженностью весом mg ЧЭ. Статоры ЦЭ выполнены в четырёх полюсном варианте магнитопровода с шихтованным пакетом пермаллоевых листов марки 79HM толщиной 50 мкм под частоту источника питания до 15 кГЦ. На полюсах статоров размещаются двухсекционные катушки, которые объединяются в схему радиального центрирования МрП, изображённую на рис.2.



Рис. 2. Мостовая схема канала центрирования МрП

Схема МрП представляет четыре канала радиального центрирования ЧЭ акселерометра с чередующейся полярностью N-S-N-S полюсов статоров ЦЭ. Каждый канал формируется объединением катушек противоположно ориентированных полюсов статоров в электрические мосты с размещением секций катушек полюсов в противолежащих плечах. В диагоналях мостов включены настроечные конденсаторы $C_{\rm H}$ для обеспечения структурной устойчивости и регулирования жёсткости центрирования образованных резонансных LC контуров МрП.

Кроме основного предназначения цилиндрические ЦЭ подвеса проявляются осевой центрирующей силой, пропорциональной смещению Δz ЦЭ по оси чувствительности. Силовая реакция ЦЭ возникает вследствие взаимодействия магнитных потоков рассеяния полюсов статора с периферическими поверхностями роторов, находящихся вне площади перекрытия. Ранее опубликованные исследования[4] осевой жёсткости цилиндрических ЦЭ в комбинации длин ротор-статор 2:1 позволяет количественно оценить ее величиной $(3 \div 5) \cdot 10^{-5}$ г/мкм при радиальный жёсткости 1 г/мкм.

В диапазоне углов наклона $\pm 1^{\circ}$ (*sin*1° = 0.0175), при весе ЧЭ mg = 10 г проекция силы тяжести на ось чувствительности акселерометра составит 0,175 г, уравновешивание которой участием осевой жёсткости ЦЭ возможно при достижении смещения Δz более $5 \cdot 10^3$ мкм. Следовательно, создание автономного компенсационно-измерительного канала с существенно меньшим информационным смещением Δz ЧЭ позволяет обеспечить не только требуемый порог чувствительности, но и расширенный диапазон углов наклона.

Измерительный канал в осевой конструкции акселерометра (см. рис.1) образуется расположением двух ферритовых броневых сердечников типа СБ относительно внешних торцев роторов ЧЭ с воздушными зазорами порядка нескольких сотен мкм. В кольцевых проточках сердечников размещаются двухсекционные катушки, которые объединяются в резонансный LC мост идентичный структурно каналу радиального центрирования. Для

осуществления центрирующей функции внутренней обратной связью в диагональ моста включается конденсатор C_Z. Дифференциально-индуктивная разбалансировка измерительного канала при смещении ЧЭ на Δz проявляется силообразующим компенсирующим воздействием на проекцию силы тяжести $mg \cdot sin\alpha$ ($sin\alpha \approx \alpha$ при малых углах) определяющую величину угла наклона α .

Формирование силообразующей реакции в LC контуре автономного осевого канала на входящее воздействие $mg \cdot \alpha$ параметрически связываемое через смещение Δz ЧЭ с соответствующей величиной $U_{\text{вых}}$ в измерительной диагонали моста повышает точность функции преобразования $U_{\text{вых}} = \psi(\alpha)$. Применение источника опорного напряжения с частотой до 500 кГц для измерительной структуры канала обеспечивает достижение добротности LC контура более 100 единиц, что способствует увеличению крутизны характеристики преобразования. Возможность независимого регулирования жесткости осевого канала акселерометра варьированием частоты источника питания, позволяет оптимизировать настройку измерительного высокодобротного LC контура выбором номинала конденсатора C_Z под заданный диапазон углов наклонов с необходимым порогом чувствительности.

Для аналитического описания статической характеристики преобразования $U_{\text{вых}} = \psi(\alpha)$ рассмотрим процесс формирования центрирующей силы F_z осевом канале акселерометра без участия жесткости k от ЦЭ радиальной схемы МрП при $F_z \gg k \cdot \Delta z$. Запишем уравнения электромагнитных цепей характеризующих измерительно-компенсирующую структуру осевого канала при смещении ЧЭ:

$$w\frac{d\Phi_1}{dt} + ri_1 + w\frac{d\Phi_2}{dt} + ri_2 = U;$$
 (1)

$$\frac{d\Phi_1}{dt} + ri_1 + \frac{1}{C_z} \int_0^t (i_1 - i_2) dt - w \frac{d\Phi_2}{dt} - ri_2 = 0,$$
(2)

где Φ_1 и Φ_2 - величины магнитных потоков в воздушных зазорах броневых сердечников СБ1 и СБ2;

i1 и i2 – величины токов в катушках СБ1 и СБ2;

w, *r* – число витков и сопротивление одной секции катушки;

U – величина напряжения.

Взаимосвязь регулирующих токов i_1 и i_2 , проявляющихся при разбалансировке измерительного моста, с формируемыми магнитными потоками Φ_1 и Φ_2 устанавливается уравнениями:

$$\Phi_1 R_1 = 2wi_1; \ \Phi_2 R_2 = 2wi_2 \tag{3}$$

При относительном смещении ЧЭ $z = \Delta z / \delta_0$ (δ_0 – величина воздушного зазора при $\Delta z = 0$) магнитные сопротивления R₁ и R₂ соответствующих воздушных зазоров $\delta_0 + \Delta z$ и $\delta_0 - \Delta z$ выражаются зависимостями:

$$R_1 = R_0(1+z); R_2 = R_0(1-z),$$
(4)

где принято:

 $R_0 = \frac{2\delta_0}{\mu_0} \left(\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}\right)$ – суммарное магнитное сопротивление при $\Delta z = 0$;

 S_1 и S_2 – кольцевые площади наружной и внутренней торцовой поверхности СБ.

Результирующая центрирующая сила F_z в осевом канале определяется уравнением:

$$F_{z} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\mu_{0} S_{1}} + \frac{1}{\mu_{0} S_{2}} \right) \left(\Phi_{1}^{2} - \Phi_{2}^{2} \right), \tag{5}$$

Решая совместно систему уравнений (1), (2) и (3) относительно магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 для подстановки в (5), после соответствующих преобразований получим с учетом добротности Q и параметра настройки η_z резонансного LC контура измерительного канала следующее выражение для F_z :

$$F_{z} = 4F_{0} \left(\frac{Q\eta_{z}}{\eta_{z}^{2}} - 1\right) \frac{z}{1 + 2\frac{Q^{2} + Q\eta_{z} - \eta_{z}^{2} - 1}{(Q^{2} + 1)(\eta_{z}^{2} + 1)} z^{2} + \frac{(Q - \eta_{z})^{2} + 1}{(Q^{2} + 1)(\eta_{z}^{2} + 1)} z^{4}},$$
(6)

где $F_0 = \frac{\Phi_0^2}{2\mu_0} (\frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2})$ – величина электромагнитной силы развиваемой СБ при $\Delta z = 0$; $Q = \frac{L\omega}{r}$ – величина добротности LC контура; $L = \frac{2w^2}{R_0}$ – параметр индуктивности;

ω – частота источника питания.

Линейная часть выражения (6) позволяет представить статическое равенство сил, приложенных к ЧЭ по оси Z при наличии угла наклона α:

$$4F_0\left(\frac{Q\eta_z}{\eta_z^2+1}-1\right)z = mg\alpha,\tag{7}$$

Измерительные качества осевого канала будем характеризовать электрической реакцией $U_{\text{вых}}$ в измерительной диагонали моста, определяемой разностью токов i_1 и i_2 вызываемой его разбалансировкой смещением Δz , а также участием настроечного параметра η_z в функции номинала конденсатора C_z :

$$U_{\rm BMX} = \frac{1}{C_z} \int_0^t (i_1 - i_2) dt, \tag{8}$$

Решая систему уравнений (1), (2) и (3) относительно величин токов i_1 и i_2 , представим выражение (8) в операторной форме (p-оператор):

...2 27

$$U_{\rm Bbix} = U \frac{2\frac{w}{R_0} \cdot \frac{2z}{1-z^2}}{C_z \left\{ \left[\frac{2w^2}{R_0(1+z)} p + r \right] \left[\frac{2w^2}{R_0(1+z)} p + r + \frac{1}{c_p} \right] \right\}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{2w^2}{R_0(1-z)} p + r \right] \left[\frac{2w^2}{R_0(1-z)} p + r + \frac{1}{c_p} \right]}$$
(9)

Подставим $p=j\omega$ в (9) получим выражение для $U_{\rm Bbix}$ в комплексном виде, из которого выделим действующее значение:

$$U_{\rm Bbix} = \frac{UQ(Q-\eta_z)z}{\sqrt{(Q^2+1)(\eta_z^2) + 2(Q^2+Q\eta_z-\eta_z^2-1)z^2 + [(Q-\eta_z)^2+1]z^4}},$$
(10)

А его фаза представляется выражением:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{Q + \eta_z + (Q - \eta_z)z^2}{Q\eta_z - 1 + z^2},\tag{11}$$

При настройке измерительного канала по параметру $\eta_z = Q - \frac{1}{C_z \omega r} = 1$, $U_{\text{вых}}$ из (10) определится линеаризованным выражением:

$$U_{\rm Bbix} = \frac{UQ(Q-1)}{\sqrt{2(Q^2+1)}} z,$$
 (12)

Возможность повышения частоты источника опорного напряжения U до 500 кГц позволяет обеспечить добротность резонансного LC контура измерительного канала более 100 единиц, что свидетельствует о высокой крутизне преобразования $U_{\rm Bbix}(z)$. Для определения статической характеристики $U_{\text{вых}} = \psi(\alpha)$ необходимо при совместном решении выражений (6) и (10) исключить параметр z. Аналитически целесообразно ограничиться участием линейный составляющих, исключая члены содержание z^2 и z^4 , что представляется зависимостью:

$$U_{\rm Bbix} = \frac{UQ(Q-\eta_z)}{\sqrt{2(Q^2+1)(\eta_z^2+1)}} \cdot \frac{mg\alpha}{4F_0\left(\frac{Q\eta_z}{\eta_z^2+1} - 1\right)}$$
(13)

Как следует из полученной характеристики, если в знаменателе второго сомножителя обеспечить значение параметра η_z близким к 1/Q, тем самым уменьшая силовую реакцию в осевом канале акселерометра на входящее воздействие $mg\alpha$, можно неограниченно снижать порог чувствительности. Однако при этом будет сужаться измерительный диапазон углов наклона, который также лимитируется проявлением нелинейности жёсткости к осевого канала на смещения Δz_{max} ЧЭ в пределах δ_0 .

Для оценки измерительных возможностей акселерометра по порогу чувствительности и диапазону углов наклона в зависимости от допустимого смещения ЧЭ Δz_{max} по условию k · $\Delta z_{max} \gg mg\alpha$, которое представим отношением α/α_{max} , преобразуем (13) к нормированному виду:

$$\frac{U_{\text{Bbix}}}{U} = \frac{Q(Q - \eta_z)}{\sqrt{2(Q^2 + 1)(\eta_z^2 + 1)}} \cdot \frac{\Delta z_{max}}{\delta_0} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_{max}}$$
(14)

Численные расчёты, проведённые на базе (14) с учётом коррекции от нелинейности выражений (6) и (10) для выбранных параметров: $\eta_z = 1$, Q = 100 ед., показали возможность измерения углов наклона с точностью 10^{-4} от α_{max} , что эквивалентно обеспечению порога чувствительности 0,01 угл.с. в диапазоне ± 100 угл.с.

Дальнейшее расширение измерительного диапазона может ограничиваться высокими требованиями стабилизации источника опорного напряжения и проявлением не симметрии электрических и магнитных цепей на технологическом уровне изготовления элементов и сборки конструкции акселерометра.

Заключение

1. Представлено схемно-конструктивное решение МрП с цилиндрическими ЦЭ обеспечивающее достижение порога чувствительности менее 0.01 угл. с. в режиме горизонтирования.

2. Предложена автономная измерительно-компенсационная силовая структура осевого канала акселерометра, позволяющая варьировать порогом чувствительности и измерительным диапазоном изменением частоты опорного напряжения.

3. Аналитическим исследованием статической характеристики преобразования $U_{\rm Bbix} = \psi(\alpha)$ установлены критерии формирования управляемой осевой жёсткости изме-

рительного канала в зависимости от величины добротности Q, параметра настройки η_z и допустимого линейного смещения ЧЭ акселерометра Δz_{max} .

Список литературы

- [1]. Анцев Г. В., Богословский С. В., Сапожников Г. А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом. М.: Наука. 2010. 422 с.
- [2]. Лысенко Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет. Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 672 с.
- [3]. Джанджгава Г. И. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М.: Научтехиздат. 2015. 422 с.
- [4]. Корниенко А. Н., Свинарева М. С. Схемно-конструктивное решение магниторезонансного подвеса в осевом варианте акселерометра с низким порогом чувствительности. // Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал. 2016.
 №3. Режим доступа: <u>http://engbul.bmstu.ru/doc/836903.html</u> (Дата обращения: 6.04.16)
- [5]. Корниенко А. Н., Свинарева М. С. Конструктивное решение цилиндрических центрирующих элементов магниторезонансного подвеса для снижения осевой силовой реакции. // Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал. 2015. №7. Режим доступа: <u>http://engbul.bmstu.ru/doc/781646.html (Д</u>ата обращения: 6.04.16)