

## Схемно-конструктивное решение магниторезонансного подвеса в осевом варианте акселерометра с низким порогом чувствительности

# 03, март 2016

Корниенко А. Н.<sup>1</sup>, Свинаярева М. С.<sup>1,\*</sup>

УДК: 621.31

<sup>1</sup>Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

\*[deadkeng@gmail.com](mailto:deadkeng@gmail.com)

### Введение

В современных эксплуатационных условиях автономных систем предстартовой подготовки мобильных пусковых комплексов ракет необходима высокая привязка к координатам наземного базирования [3]. С этой целью наиболее эффективно применяются поплавковые интегрирующие гироскопы (ПИГ) в составе гиросtabilизированной платформы (ГСП). Моделируемая ГСП система координат приводится в плоскость местного горизонта и в режиме гирокомпасирования устанавливается направление меридиана [2,4]. При этом точность его определения зависит от величины изменения угловой ориентации оси чувствительности ПИГа относительно плоскости горизонта за отводимое время измерения. На пороговой чувствительности имеющихся измерительных средств (навигационный акселерометр) 0.1 угловой секунды (угл.с.) погрешность в определении направления меридиана превышает 2 угл.с., что не отвечает предъявляемым требованиям по позиционированию. В связи с этим необходимо обеспечить соответствующие условия для высокоточного гирокомпасирования путем регистрации угловых отклонений ГСП на уровне 0.01 угл.с.

Анализ перспектив совершенствования измерительных возможностей углов наклона в классе устройств с контактным типом взаимодействия между подвижным и неподвижным узлами их конструкции, таких как: жидкостные уровни, виброопоры, торсионы, свидетельствует о достижении предельного технологического уровня порога чувствительности до нескольких десятых угл.с. Для решения поставленной задачи уменьшения порога чувствительности при измерении углов наклона следует признать [1] в качестве приоритетного направления применение бесконтактных электростатических и электромагнитных подвесов в акселерометрах, отвечающих условиям бортового размещения.

По имеющимся данным [1] наиболее продвинутой тип высокоточного маятникового навигационного акселерометра в поплавковом исполнении с электромагнитными опорами вращения чувствительного элемента характеризуется достижением порога чувствительности  $10^{-7}g$ , что позволяет регистрировать угловые отклонения величиной 0.05 угл.с. после

обработки по специальному алгоритму измерений трех изделий в комплекте. Сложность в обеспечении меньшего порога чувствительности рассматриваемого варианта акселерометра заключается в проявлении ряда отрицательных факторов, специфичных для магнитных опор вращения, жидкостного заполнения и ограничениях на маятниковость.

Магнитное центрирование чувствительного элемента (ЧЭ) маятникового акселерометра осуществляется коническими центрирующими элементами (ЦЭ) в условиях гидростатической разгрузки с нулевой плавучестью. Отсутствие механического взаимодействия между роторами и статорами ЦЭ подвеса при их вращательном движении тем не менее сопровождается проявлением магнитных тяжений из-за геометрических погрешностей изготовления и анизотропии магнитных свойств применяемых материалов. Достигнутый минимальный уровень возмущающих моментов от магнитных опор вращения [1] оценивается величиной  $10^{-6}$  г·см при нестабильности  $(2\div 5)10^{-7}$  г·см в условиях симметричного распределения магнитных потоков в магнитопроводе ЦЭ. Наличие маятниковости и тепловых градиентов мощности, выделяемой в ЦЭ, приводящих к локальным перетеканиям жидкости, ухудшают эти показатели. Технологические возможности совершенствования качества изготовления опор вращения и уровня термостабилизации контура жидкостного заполнения не позволяют ожидать существенного снижения магнитных тяжений менее  $10^{-7}$  г·см, что необходимо для обеспечения пороговой чувствительности 0.01 угл.с.

Другим ограничением, свойственным маятниковой конфигурации акселерометра в измерении малых углов наклона, является лимитированная маятниковость в несколько единиц г·см и невозможность значительного ее увеличения по представленным условиям магнитного центрирования. В этих обстоятельствах формирование входного измеряемого воздействия  $mg \sin \alpha$ , превышающего нестабильность возмущающих моментов по оси вращения ЦЭ, не представляется технически осуществимым. Принципиальная схема маятникового акселерометра с вертикальной ориентацией оси вращения в двух ортогональных плоскостях представлена на рис. 1.

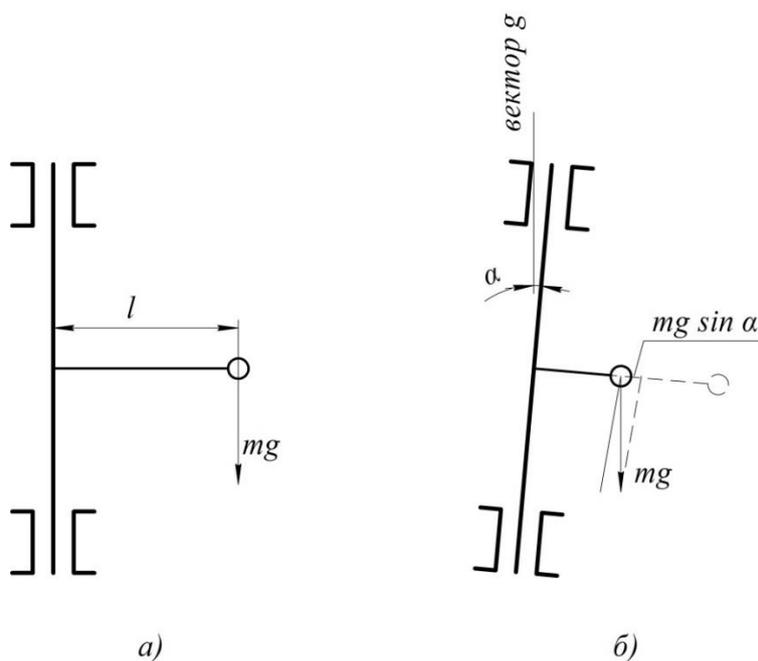


Рис.1. Схема маятникового акселерометра с вертикальной осью вращения

На схеме приняты следующие обозначения величин:

- вектор  $g$  – местная вертикаль, характеризующая направление силы тяжести;
- $\alpha$  – измеряемый угол отклонения оси вращения;
- $l$  – длина маятника, определяющая смещения центра масс –  $mg$ ;
- $mg \sin \alpha$  – проекция силы тяжести, приложенная к центру масс.

Плоскость рис. 1б повернута на  $90^\circ$  относительно первоначального положения рис. 1а, из сопоставления которых понятен принцип действия и смысл принятых обозначений. Если имеется угол наклона  $\alpha$  оси вращения акселерометра относительно местной вертикали – вектора  $g$ , то под действием проекции силы тяжести  $mg \sin \alpha$  на плече  $l$  создается момент, который стремится развернуть маятник в положение равновесия приложенных к нему сил по дуге окружности длиной  $\pi l/2$ .

Таким образом, принципиальная особенность восприятия входящего воздействия  $mg l \sin \alpha$  маятникового акселерометра состоит в том, что уровень возмущающих моментов от ЦЭ вращения проявляется при измерении углов наклона любой величины. Поэтому уменьшение порога чувствительности маятниковой конфигурации акселерометра может связываться с существенным прогрессом снижения величины момента магнитных тяжений ЦЭ вращения.

Исследование аксиальных силовых характеристик [5] цилиндрических ЦЭ магниторезонансного подвеса (МрП) позволило установить пропорциональный характер осевой реакции на относительные смещения в паре ротор-статор. Проведенная оценка степени силовой реакции МрП с цилиндрическим ЦЭ позволяет предложить осевую конструкцию акселерометра с перспективными качествами уменьшения порога чувствительности при измерении малых углов наклона.

Для формирования подвеса ЧЭ осевого акселерометра применены ЦЭ с одинаковыми линейными размерами роторов и расточек полюсов статоров. Схемно-конструктивное решение акселерометра основано на возможности уменьшения жесткости и линейном характере осевого центрирования ЧЭ, образованного системой двух роторов, объединенных валом и смещенных к центру подвеса на одну четверть длины расточки статоров.

На рис. 2 представлена принципиальная схема осевого акселерометра с цилиндрическими ЦЭ МрП.

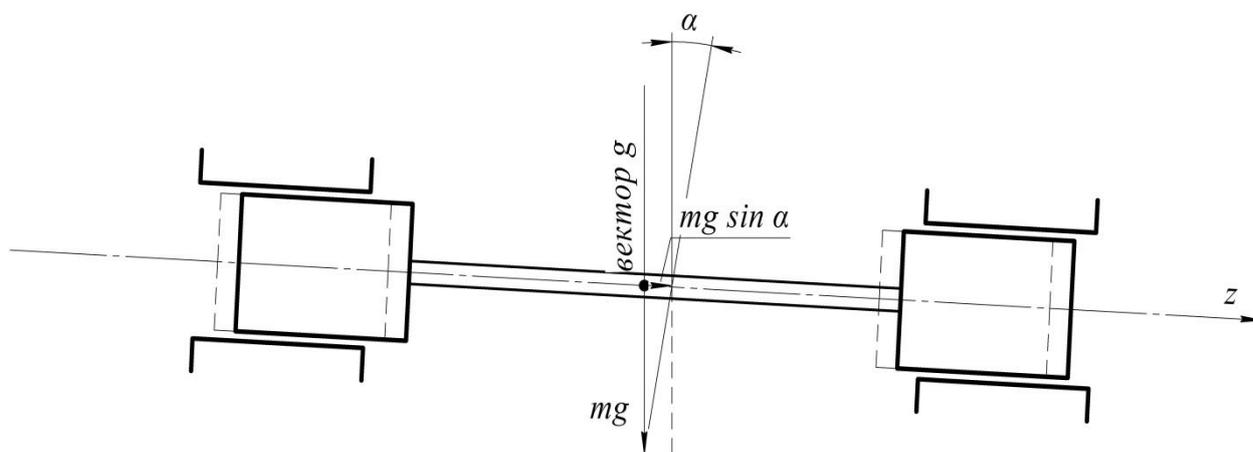


Рис.2. Принципиальная схема осевого акселерометра

В режиме измерения углов наклона  $\alpha$  относительно местной вертикали (вектор  $g$ ) чувствительный элемент акселерометра вследствие центрирующих сил в осевом канале МрП занимает либо симметричное положение относительно расточек статоров ЦЭ при отсутствии наклона ( $\alpha=0$ ), либо под действием проекции силы тяжести  $mg \sin \alpha$  смещается по координате  $z$  до уравнивания приложенных сил. Мерой угла наклона может быть величина происходящего смещения ЧЭ, регистрируемого дополнительными средствами, в частности, оптическим датчиком положения или оценка входящего воздействия  $mg \sin \alpha$  собственным контуром силовой компенсации. В предложенной конфигурации специализированного акселерометра на достижение минимально возможного порога чувствительности оказалось целесообразным реализовать компенсационный вариант формирования управляемой силовой реакции в осевом канале МрП. Пространственное центрирование ЧЭ в осевом акселерометре осуществляется в воздушной среде и лишено негативных проявлений, характерных для поплавковых маятниковых акселерометров с комбинированным типом взвешивания.

Для рассмотрения измерительной структуры акселерометра необходимо представить базовые элементы конструкции статоров ЦЭ, которые выполнены в четырехполюсном варианте магнитопровода с размещенными двухсекционными катушками на полюсах. Секции катушек на диаметрально ориентированных полюсах статоров объединены в электрические мосты с включением настроечных конденсаторов  $C_H$  в диагоналях, образуя резонансные LC-контуры четырех каналов радиального центрирования МрП. Осевой канал центрирования подвеса формируется объединением каналов радиального центрирования в общий измерительно-компенсационный мост с размещением LC-контуров каждого ЦЭ в противоположных плечах электрической схемы. Управление осевой жесткостью центрирования МрП реализуется включением конденсатора  $C_z$  в диагональ моста, изображенного на рис. 3.

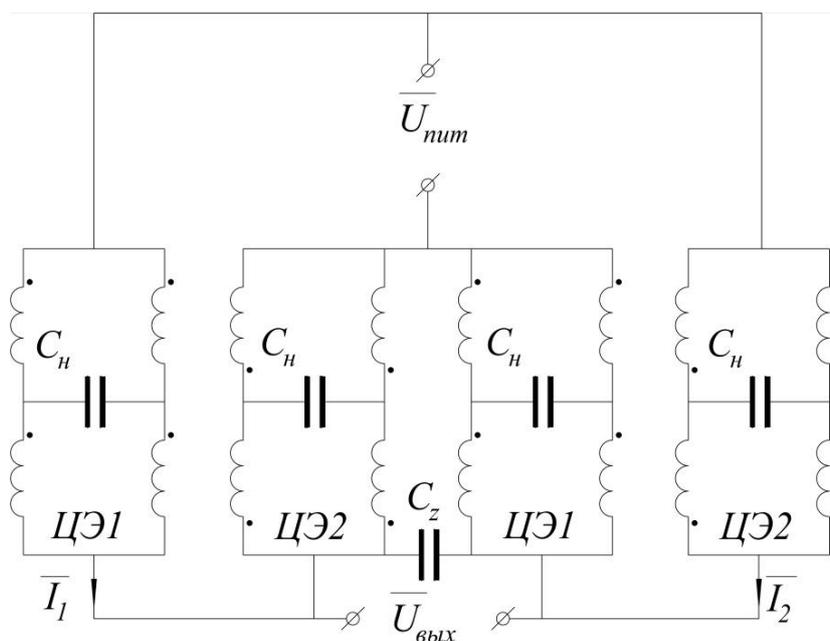


Рис.3. Измерительная структура акселерометра

Выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$ , снимаемое в измерительной диагонали мостовой схемы МрП пропорционально степени ее разбалансировки, происходящей вследствие неравенства площадей перекрытия полюсов статоров ЦЭ1 и ЦЭ2 при осевом смещении ЧЭ акселерометра. Особенностью представленной схемы МрП является разграничение регулирующих функций настройки каналов радиального и осевого центрирования. В связи с чем выбором номинала конденсатора  $C_z$  становится возможным компенсировать центрирующее действие от ЦЭ и обеспечить принципиально нулевую жесткость подвеса по оси чувствительности акселерометра, что эквивалентно достижению бесконечно малого порога чувствительности. Однако также необходимо учитывать, что снижение порога чувствительности происходит за счет сужения измерительного диапазона.

В предложенной конфигурации осевого акселерометра используются специфические особенности МрП создавать силовую реакцию на смещение ЧЭ и одновременно измерять ее путем формирования  $U_{\text{вых}}$  в электрической схеме. Центрирующая функция МрП определяется как параметрами элементов конструкции ЦЭ, при соответствующей настройке LC-контуров радиального центрирования, так и регулированием осевой жесткости измерительного канала.

Центрирующую силу  $F_z$  осевого канала подвеса можно рассчитать по изменению магнитной энергии  $W$  в зазорах  $\delta$ , разделяющих взаимодействующие поверхности ЦЭ при абсолютных смещениях  $\Delta z$  роторов по оси чувствительности  $z$ .

$$F_z = -\frac{dW}{d\Delta z} = \sum_{i=1}^2 \sum_{k=1}^4 -\frac{\Phi_{ik}}{2} \frac{dR_{ik}}{d\Delta z} \quad (1)$$

$\Phi_{ik}$  – величина магнитного потока полюсов ЦЭ1 и ЦЭ2;

$R_{ik}$  – величина магнитных сопротивлений зазоров под полюсами статоров ЦЭ при смещении  $\Delta z$ ;

$i$  – номер центрирующего элемента ( $i=1,2$ );

$k$  – номер полюса статора ( $k=1,2,3,4$ );

Запишем выражения для магнитных сопротивлений:

$$R_{1,2} = \frac{\delta_0}{\mu_0 S_{1,2}} = \frac{\delta_0}{\mu_0 b(l \mp \Delta z)} = \frac{R_0}{l \mp z} \quad (2)$$

$S_{1,2}$  – площадь перекрытия полюсов статоров с линейными размерами;

$b$  – ширина;  $l$  – длина;

$R_0$  – магнитное сопротивление при равенстве  $S_1=S_2$ ;

$z=\Delta z/l$  – относительное смещение ЧЭ;

$\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость воздуха.

С учетом дифференцирования (2), а также выражений, определяющих магнитные потоки  $\Phi_{1,2}$  по параметрам добротности  $Q=L\omega/r$  ( $L$  – величина индуктивности;  $\omega$  – циклическая частота питания;  $r$  – величина активного сопротивления LC-контура) и параметра настройки осевого канала  $\eta_z$  суммарная центрирующая сила определяется выражением:

$$F_z = -8 \frac{\Phi_0^2 R_0}{l} \cdot \frac{Q \eta_z}{1 + \eta_z^2} \cdot \frac{z}{1 + \frac{2Q^2(1-Q\eta_z)}{(1+Q^2)(1+\eta_z^2)} z^2 + \frac{Q^4}{(1+Q^2)(1+\eta_z^2)} z^4} \quad (3)$$

Осевой канал центрирования согласно принципу действия акселерометра при измерении углов наклона уравнивает проекцию силы тяжести ЧЭ –  $mg\alpha$ , откуда взаимосвязь  $\alpha(F_z)$  определяется выражением:

$$\alpha = 4 \frac{\delta_0^2}{l\Delta y(Q-2)} \cdot \frac{Q\eta_z}{(1+\eta_z^2)} \cdot \frac{z}{1 + \frac{2Q^2(1-Q\eta_z)}{(1+Q^2)(1+\eta_z^2)}z^2 + \frac{Q^4}{(1+Q^2)(1+\eta_z^2)}z^4} \quad (4)$$

Первый сомножитель характеризует запас магнитной энергии в воздушных зазорах ЦЭ1 и ЦЭ2 с учетом вертикального смещения  $\Delta y$  роторов из центрального расположения относительно расточек статоров при заданной жесткости радиального центрирования. В качестве регулятора чувствительности следует считать настройку осевого канала в соответствии со вторым сомножителем по выражению

$$1 - Q\eta_z + \eta_z^2 = 0 \quad (5)$$

Граничные значения параметров  $Q=2$  и  $\eta_z=1$  обеспечивают достижение нулевой жесткости осевого канала МрП при смещениях ЧЭ акселерометра. Знаменатель последнего сомножителя при выбранном  $\eta_z$  характеризует нелинейность диапазона преобразования.

Для дальнейшего анализа измерительных возможностей схемы МрП определим зависимость  $U_{\text{вых}}$  в функции смещения  $z$  ЧЭ в осевом канале центрирования, через уравнение, учитывающее градиент перераспределения магнитных потоков  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , а также разность токов  $I_1=\Phi_1R_1/2\omega$  и  $I_2=\Phi_2R_2/2\omega$  LC-контура ЦЭ2 выражением:

$$U_{\text{вых}} = 2\omega \frac{d\Phi_1}{dt} + \frac{rR_1}{\omega} \Phi_1 - 2\omega \frac{d\Phi_2}{dt} - \frac{rR_2}{\omega} \Phi_2 \quad (6)$$

После подстановки комплексных величин  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  и соответствующих операций их дифференцирования выражение (6) приводится к виду:

$$\overline{U_{\text{вых}}} = U \frac{2Q(Q-\eta_z)z}{Q^2z^2+(Q-j)(\eta_z-j)} \quad (7)$$

Откуда действующее значение  $U_{\text{вых}}$  определяется зависимостью:

$$U_{\text{вых}} = U \frac{Q(Q-\eta_z)z}{\sqrt{(1+Q^2)(1+\eta_z^2)+2Q^2(1-Q\eta_z)z^2+Q^4z^4}} \quad (8)$$

Статическая характеристика преобразования входного воздействия в электрический сигнал  $U_{\text{вых}}=\psi(\alpha)$  может быть получена подстановкой  $z$  от  $\alpha$  из (4) в (8). В первом приближении, без учета составляющих, зависящих от  $z^2$  и  $z^4$ , ее выражение представляется в виде:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U(Q-\eta_z)}{\eta_z} \sqrt{\frac{\eta_z^2+1}{Q^2+1}} \cdot \frac{l\Delta y(Q-2)}{4\delta_0^2} \alpha \quad (9)$$

Анализ статической характеристики позволяет установить возможность обеспечения практически не ограничиваемое повышение чувствительности при значении параметра настройки осевого канала  $\eta_z$  близким к нулю. В то же время управление жесткостью осевого канала МрП должно осуществляться в соответствии с требуемым диапазоном измерения по величине максимального угла наклона  $\alpha_{\text{max}}$  и степени проявления нелинейности преобразования смещением ЧЭ на  $\Delta z_{\text{max}}$ , взаимосвязь которых отображается выражением:

$$\frac{\Delta z_{max}}{l} = \frac{l\Delta y(Q-2)(1+\eta_z^2)}{4\delta_0^2 \cdot Q\eta_z} \alpha_{max} \quad (10)$$

При  $Q^2 \gg 1$  и стремлении  $\eta_z^2 \rightarrow 0$  трансформация (10) позволяет получить условие настройки осевого канала МрП под задаваемые требования в измерении углов наклона:

$$\eta_z = \frac{l^2 \Delta y (Q-2) Q}{4\delta_0^2} \cdot \frac{\alpha_{max}}{\Delta z_{max}} \quad (11)$$

Итоговым результатом проведенного исследования способности существенного снижения пороговой чувствительности осевого акселерометра в измерении малых углов наклона горизонтируемых объектов является предложенная схемно-конструктивная реализация регулируемого центрирования в измерительном канале МрП с цилиндрическими ЦЭ.

### Заключение

1. Представлена оригинальная конструкция высокочувствительного осевого акселерометра с цилиндрическими ЦЭ магниторезонансного типа.

2. Предложено схемное решение структуры МрП, обеспечивающего управляемое снижение центрирующей силы в измерительном канале акселерометра практически до нулевой величины, чем может достигаться принципиально не ограничиваемое уменьшение порога чувствительности.

3. Проведено аналитическое описание силовой реакции осевого канала МрП, позволяющее оценить воздействие базовых параметров элементов структуры на выбор порога чувствительности и измерительного диапазона углов наклона.

### Список литературы:

- [1]. Анцев Г.В., Богословский С.В., Сапожников Г.А. Проектирование устройств с электромагнитным подвесом. М.: Наука. 2010. 422 с.
- [2]. Осокин Ю.А., Герди В.Н., Майков К.А., Станкевич Н.Н. Теория и применение электромагнитных подвесов. М: Машиностроение. 1980. 284 с.
- [3]. Лысенко Л.Н. Наведение и навигация баллистических ракет: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2007. 672 с.
- [4]. Северов Л.А. Механика гироскопических систем: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. 1996. 212 с.
- [5]. Корниенко А.Н., Свиная М.С. Конструктивное решение цилиндрических центрирующих элементов магниторезонансного подвеса для снижения осевой силовой реакции // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал 2015 № 7. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/781646.html> (дата обращения: 24.02.2016)