электронный научно-технический ИНЖЕНЕРНЫЙ ВЕСТНИК

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

Исследование конструктивной схемы однокомпонентного акселерометра компенсационного типа на магниторезонансном подвесе

01, январь 2017 Корниенко А. Н.^{1,*}, Горяева М. О.¹ УДК: 621.31

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

Введение

В навигационных целях при автономном наведении ракетных комплексов [1,2] для высокоточной привязки координат наземного базирования эффективно применение гиростабилизированной платформы (ГСП). Моделирование системы координат осуществляется приведением ГСП в плоскость местного горизонта с последующим определением направления меридиана в режиме гирокомпасирования [3]. Точность определения меридиана существенным образом зависит от изменения угловой ориентации оси чувствительности поплавкового интегрирующего гироскопа (ПИГа) на уровне сотых долей угловой секунды (угл.с.) от плоскости горизонта в течение отводимого времени регистрации. Таким образом потребность в разработке измерительных устройств с пороговой чувствительностью 0.01 угл.с. является актуальной задачей.

Проводимые работы по созданию перспективных конструкций линейных акселерометров на цилиндрических центрирующих элементах (ЦЭ) магниторезонансного подвеса [4] свидетельствуют о достижении порога чувствительности менее 0.01 угл.с. Однако столь весомый результат повышения чувствительности предложенных модификаций акселерометра обеспечивается уменьшением осевой жесткости измерительного канала, а, следовательно, сопровождается прогрессирующим сокращением измерительного диапазона, что ограничивает их эксплуатационные возможности.

МрП, являющийся базовым узлом конструкции осевого акселерометра, представляется сочетанием двух ЦЭ, четырехполюсные магнитопроводы статоров которых располагаются на торцах цилиндрического корпуса. Во внутренних расточках полюсов статоров размещаются с кольцевым воздушным зазором 40-50мкм цилиндрические ферритовые ротор, объединенные валиком, таким образом образующие чувствительный элемент (ЧЭ) акселерометра инерционной массой mg. Расположенные на полюсах статоров ЦЭ катушки объединяются с конденсаторами в соответствующие структуры резонансных LC-контуров для обеспечения двухканального радиального центрирования роторов. Процесс бесконтактного взвешивания ЧЭ в цилиндрических ЦЭ МрП характеризуется наличием силовой центрирующей функции F_z в осевом измерительном канал, проявляющейся при смещении роторов ΔZ из центрального симметричного расположения относительно расточек статоров по оси чувствительности Z акселерометра. Степень проявления электромагнитной жесткости $K_z=F_z/\Delta Z$ осевого канала МрП, как показали исследования, может быть существенно на несколько порядков снижена увеличением длины роторов ЦЭ к толщине пакета магнитопровода статора. По результатам оценки достаточной величины осевой жесткости K_z в планируемом диапазоне линейных смещений ΔZ_{max} ЧЭ акселерометра и приемлемой компактности конструкции ЦЭ рекомендуется пропорция линейных размеров в паре ротор-статор 2:1. При необходимости возможна реализация управляемого снижения $K_z \rightarrow 0$ особым схемно-конструктивным построением структуры МрП.

Принцип измерения углов наклона горизонтируемых объектов осевым акселерометром с цилиндрическими ЦЭ МрП демонстрируется на рис. 1.



Рис. 1. Принципиальная схема осевого акселерометра

В соответствии с представленной схемой акселерометра ЧЭ бесконтактно вывешивается радиальными каналами МрП относительно расточек полюсов статоров ЦЭ1 и ЦЭ2. При наличии отклонения оси чувствительности Z от плоскости горизонта на угол α в осевом канале проявляется проекция силы тяжести ЧЭ mgsin α приводящая к его смещению на ΔZ до уравновешивания осевой центрирующей силой F_z ЦЭ МрП. Рассматриваемая конструктивная схема акселерометра с самокомпенсацией входного воздействия относится к классу измерительных устройств с внутренней обратной связью (ОС) и имеет соответствующие ограничения взаимозависимостью с сокращением измерительного диапазона.

В представляемой далее конфигурации акселерометра сохраняется конструктивная схема МрП, однако осевая жесткость ЦЭ исключается существенным уменьшением величины ΔZ на несколько порядков на входящее воздействие mgsinα в результате формирования структуры внешнего измерительно-компенсационного контура ОС. Таким образом может обеспечиваться низкий порог чувствительности при расширенном диапазоне измерения.

Кроме решения поставленной задачи совершенствования измерительных возможностей акселерометра на цилиндрических ЦЭ МрП при минимизации смещений ЧЭ ΔZ улучшается процесс радиального центрирования. Существенно снижаются требования по стабилизации параметров источника питания, по уровню вариативности радиальной жесткости резонансных LC-контуров каналов центрирования при текущем перераспределении веса ЧЭ, исключаются краевые эффекты нелинейности F_z на предельных ΔZ_{max} . В совокупности конструктивные и технологические особенности электромагнитного центрирования ЧЭ реализуемого в конструкции осевого акселерометра способны определять уровень инструментальных погрешностей. Разработка конструкции акселерометра осуществлялась в соответствии с основными требованиями технического задания по обеспечению измерительного диапазона ± 600 угл.с. с порогом чувствительности 0,01 угл.с. при регистрации изменений угловой ориентации ГСП относительно плоскости горизонта. Кроме этого акселерометр в приборном составе ГСП должен отвечать критериям компактности и технологичности, иметь высокие эксплуатационные характеристики по виброустойчивости, надежности, обладать нулевым временем готовности.

Применение цилиндрических ЦЭ в МрП в конструктивной схеме осевого акселерометра при взвешивании ЧЭ в воздушной среде наиболее эффективно снижает жесткость К_z измерительного канала и характеризуется компактным исполнением. В отличии от активного магнитного подвеса(АМП) управляемого электронным блоком центрирования для схемы МрП достаточно к катушкам статоров ЦЭ подключить определенным образом четыре малогабаритных конденсатора. Схема управления радиальным каналом центрирования МрП представляется объединением двухсекционных катушек диаметрально противоположных полюсов статора в мостовую структуру с включением конденсатора в диагональ.

МрП, конструктивно образованный 4-х полюсными магнитопроводами статоров ЦЭ, осуществляет четырехканальное радиальное центрирование роторов в составе ЧЭ акселерометра при питании мостовых резонансных LC-контуров синусоидальным напряжением с частотой от 8 кГц. Магнитопроводы статоров ЦЭ устанавливаются в торцевых областях титанового корпуса акселерометра на рекомендуемом базовом размере 40-50мм для минимизации инструментальных погрешностей от неравножесткости каналов центрирования. Для исключения вращательного движения ЧЭ боковые цилиндрические поверхности роторов профилируют плоскими гранями, которыми происходит ориентация относительно межполюсных пространств расточек статоров ЦЭ.

Выбор конструкции ЦЭ в комбинации линейных размеров пары ротор-статор 2:1 характеризуется расчётным проявлением осевой жесткости K_z порядка (3-5)*10⁻⁵ г/мкм при радиальной жесткости МрП 1 г/мкм. При весе ЧЭ mg равном 10г пороговая величина угла наклона α =0.01 угл.с. проявляется в измерительном канале акселерометра проекцией mgsin α =5*10⁻⁶, которая может компенсироваться осевой реакцией F_z от двух ЦЭ смещением ΔZ =0.2 мкм. Формирование внешнего измерительно-компенсационного контура ОС в структуре акселерометра с жесткостью центрирования F_{oc}/ ΔZ в сотни раз превышающей K_z=F_z/ ΔZ позволяет практически исключить силовую реакцию ЦЭ и обеспечить заданный измерительный диапазон углов наклона с пороговой чувствительностью 0.01 угл.с.

Элементный состав контура OC предусматривает присутствие датчика положения (ДП)смещений ΔZ ЧЭ от входящего воздействия mgsinα, усилителя сигнала ДП, а также силового компенсационного устройства, называемого датчиком силы(ДС). Схема усилительно-

го каскада должна обеспечивать не только взаимосвязь F_{oc} и ΔZ, изменяя крутизну жесткости K_{oc} контура OC, но и его динамическую устойчивость наличием форсирующего звена.

Цилиндрический корпус акселерометра с торцевыми расточками под установку статоров ЦЭ имеет внутреннюю кольцеобразную диафрагму в центральной плоскости симметрии которой размещаются элементы двух оптических ДП. Малогабаритный ДП типа оптрон, реализуется на паре светодиод-фотоприемник, характеризуется высокой крутизной преобразования смещений ЧЭ по координате $\pm \Delta Z$ в электрический ток соответствующего знака при отсутствии реактивного силового воздействия. Дублирование двум ДП способствует стабильности производимого суммарного тока I, линейности преобразования ΔI/ΔZ, выполняет задачу резервирования. Функционирование ДП предполагается наличие так называемой шторки между светодиодом и фотоприемником, которая выполнена в виде пластинки специальной формы и закреплена крестообразно в центре валика ЧЭ. В качестве компенсационного силового элемента структуры контура ОС рекомендуется к применению магнитоэлектрический тип ДС в цилиндрическом исполнении по показателям конструктивного размещения, высокой крутизны и линейности Foc(I) на входящее воздействие mgsina. Принцип недопущения контактных воздействий на ЧЭ исключает применение токоподводов поэтому магнитопроводы и катушку ДС следует размещать по обращенному варианту. Таким образом магнитопроводы двух ДС включаются в состав ЧЭ, располагаются симметрично зеркально ориентированными кольцевыми зазорами магнитных систем для выравнивания распределения суммарной индукции. Катушки ДС закрепляются на корпусе и осуществляют спаренное силовое взаимодействие ампервитками с магнитными потоками в межполюсных зазорах магнитопроводов.

Представленные рекомендации по проектированию конфигурации акселерометра компенсационного типа на МрП позволили разработать партию изделий, детали и узлы конструкций которых отображены на рис.2.



Рис. 2. Элементы конструкции акселерометра

Просмотр номенклатуры элементов конструкции следует осуществлять сверху вниз и слева направо. Пермаллоевый кожух экранирует магнитные тяжения. Титановый корпус для размещения двух статоров ЦЭ, двух оптических ДП и двух катушек ДС. Вид на статор ЦЭ. Ниже располагается ЧЭ, состоящий из двух роторов ЦЭ, двух магнитопроводов ДС, объединенных общим валиком, в центре шторка ДП. Справа ДП в сборе на кронштейне.

Программа экспериментальных исследований акселерометра включает многостороннее тестирование комплекса показателей его работоспособности в соответствии с установленными требованиями технического задания. В настоящей публикации приводятся некоторые наиболее важные оценочные результаты эксплуатационного и метрологического характера, способные определять степень совершенства принятых технических решений при разработке конструкции высокочувствительного акселерометра.

Центральная роль прогрессивного снижения порога чувствительности принадлежит схеме центрирования МРП, которая в значительной мере обеспечивает эксплуатационные характеристики по следующим показателям:

- время готовности определено нулевым;

- собственная частота радиальных каналов центрирования МрП составляет 240Гц, что гарантирует виброустойчивость к низкочастотному спектру внешних воздействий;

- технологический разброс неравножесткости ЦЭ до 5% уровня практически не проявляется инструментальными погрешностями.

- требования к источнику питания схемы МрП допускают отклонения по амплитуде $\pm 1\%$ и частоте $\pm 3\%$ от номинальных величин.

В измерительном аспекте акселерометр тестировался на:

а) крутизну и линейность характеристик преобразования ДП и ДС по отдельности и в составе контура ОС;

б) регистрацию минимально возможного порога чувствительности;

в) установление границ измерительного диапазона угловых наклонов с требуемой чувствительностью.

Аттестация метрологических характеристик ДП и ДС, осуществляемая по стандартным методикам, а также схемотехника усилителя обеспечивающего динамическую устойчивость контура ОС не представляют интерес к освящению. Важным является лишь уровень нестабильности формируемого выходного сигнала Uвых(α), способность определять соотношение порога чувствительности и измерительного диапазона. Но это заключение возможно только для конкретной жесткости контура ОС при регистрации реального порога чувствительности акселерометра.

Определение пороговой чувствительности в отсутствие градуировочных средств задания и контроля угловых наклонов на уровне хотя бы 0.01 угл.с. потребовало создать специальное устройство для проведения экспериментального исследования. С этой целью технологический поворотный стол, применяемый для масштабирования навигационных акселерометров, был дополнен специальной конструкцией, в основе которой установлен консольно закрепленный цилиндрический стержень из бериллиевой бронзы диаметров 38мм и вылетной длиной 207мм. На свободном конце стержня имеется площадка для симметричного размещения двух испытуемых акселерометров и контрольного штатного между ними с порогом чувствительности 0.1 угл.с. Для задания угловых наклонов малой величины используется упругий прогиб стержня при его нагружении тарированными по весу грузами. Представленные расчетные размеры стержня в соответствие с модулем упругости бронзы позволяют осуществить дискретизацию изменений углов наклона 0.01 угл.с. нагружением десятикопеечной монетой.

Таким образом нагружение набором из 10 экземпляров монет эквивалентно 0.1 угл.с. и может регистрироваться штатным акселерометром, а ступенчатое различие сигнала Uвых(α) позволяет оценивать проявление порога чувствительности. Смещение зоны нагружения на меньший вылет плеча способно пропорционально сократить дискретизацию задаваемого угла наклона. Предложенная методика экспериментального определения порога чувствительности акселерометра может быть реализована при исключении воздействия ряда факторов. Экспериментальная установка должна размещаться на виброизолированном фундаменте, быть термоизолированной от внешней среды, не иметь механических тяжений от проводников регистрирующих устройств, подключаемых через токоподводы.

Измерение выходного напряжения $U_{\text{вых}}(\alpha)$ осуществлялось цифровым вольтметром типа Ф8010 с шестиразрядной шкалой дисплея в режиме 30с осреднения. Для обеспечения пяти порядков регистрации изменений величины напряжения в заданном диапазоне углов наклона следует адаптировать крутизну преобразования K_{oc} при измерении порога чувствительности относительно уровня нестабильности нулевого сигнала при $\alpha=0$. Причиной проявления нестабильности может являться предельная разрешающая способность ДП при чрезмерной жесткости контура ОС вследствие неоправданно высокого коэффициента усиления либо недостатка динамической устойчивости.

Определение уровня нестабильности нулевого сигнала достигается ориентацией поворотного стола в плоскость горизонта α =0 по изменению знака U_{вых} с последующей фиксацией минимальной величины напряжения. Затем задается наклон на фиксированный угол до ±5угл.с., который измеряется приращением $\Delta U_{вых}$ и рассчитывается эквивалентная величина напряжения, соответствующая пороговому значению в 0.01 угл.с. Сравнивая уровни полезного сигнала Uвых (0.01 угл.с.) и нестабильности заключаем о возможной эффективности регистрации требуемого порога чувствительности. Проведение этой настроечной операции, путем оптимизации величины жесткости контура OC, позволило снизить уровень нулевого сигнала в угловом эквиваленте менее 0.002 угл.с., что гарантирует возможность регистрации пороговой величины 0.005 угл.с.

Экспериментальное определение порога чувствительности акселерометра производилось дискретным 30угл.с. заданием угловых наклонов стола установки с измерением в каждом фиксированном положении создаваемых малых углов наклона в пределах 0.5 угл.с. на специальном консольном устройстве. В результате проводимых циклов нагружения тарированными грузами обеспечивалось ступенчатое пятидесятиуровневое формирование Uвых(α), которым подтверждается достижение порога чувствительности 0.01 угл.с. При этом уровни дискретных напряжений Uвых (0.01угл.с.) позволяют судить о возможности регистрации углов наклона менее 0.005 угл.с. Что было экспериментально установлено при уменьшении вылетности размера длины консоли в процессе дискретного нагружения.

Важно отметить, что при разгрузках консоли спецустройства не зафиксировано проявлений механического гистерезиса возвращением к показаниям измерительного устройства Uвых на момент начала нагружения.

Фиксирование диапазона углов наклона в границах ±600угл.с. объясняется практически значимым для линейности преобразования Uвых(α) соответствием функции sinα истинному значению α, а также измерительными качествами устройства цифровой обработки пороговых уровней ΔUвых (0.005угл.с.) При кусочно-линейной экспериментальной методике выборочной аттестации Uвых(α) в измерительном диапазоне судить о линейности преобразования позволяет постоянство разности показаний величины напряжений для 0.5 угл.с. наклонов в 40 фиксируемых положениях поворотного стола установки через 30 угл.с. Исследование специально провоцируемого дрейфа нуля ДП не отразилось на измерительных качествах акселерометра, так как проявление осевой жесткости ЦЭ Кz<<Кос эффективно устраняется контуром OC.

Заключением по представленным экспериментальным материалам исследований партии акселерометров может явиться констатация возможности повышения чувствительности.

Заключение

1. Принцип автономности измерительно-компенсационной конфигурации акселерометра позволил разделить средства достижения высокой чувствительности радиальными каналами МрП и регистрационные возможности при независимом расширении измерительного диапазона.

2. Представленные рекомендации к выбору элементной базы для схемноконструктивного формирования МрП и структуры контура ОС реализованы при разработке компактного акселерометра с перспективными измерительными качествами.

3. Экспериментальными исследованиями метрологических и эксплуатационных показателей партии акселерометров нового образца в режиме горизонтирования подтверждено достижение порога чувствительности 0.005 угл.с. в диапазоне углов наклонов ±600угл.с.

Список литературы

- [1]. Лысенко Л. Н. Наведение и навигация баллистических ракет. Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2007. 672 с.
- [2]. Джанджгава Г.И., Августов Л.И., Бабиченко А.В., Орехов М.И., Сухоруков С.Я., Шкред В.К. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. М.: Научтехлитиздат. 2015. 422 с.
- [3]. Северов Л.А. Механика гироскопических систем: учебное пособие. М.: Изд-во МАИ. 1996. 212с.
- [4]. Корниенко А.Н., Горяева М.О. Конструктивная схема высокочувствительного осевого акселерометра на цилиндрических центрирующих элементах магниторезонансного подвеса. // Инженерный вестник. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электронный журнал 2016 №5. Режим доступа: <u>http://engsi.ru/doc/841912.html</u> (дата обращения: 10.01.2017)