

УДК 621.3

ВЫСОКОТОЧНЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

А.В. Кукушкин

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Россия, 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская, ул., 30
E-mail: wuym89@gmail.com

С.Л. Левин

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Россия, 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская, ул., 30
E-mail: sl_levin@mail.ru

В.В. Святой

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Россия, 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская, ул., 30
E-mail: vasilyevsviatyi@gmail.com

В.В. Сумароков

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Россия, 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская, ул., 30
E-mail: biseg2@mail.ru

Ключевые слова: акселерометр, электростатический подвес, космический аппарат.

Аннотация: Рассмотрены задачи навигации, геодезии, фундаментальных физических исследований, при решении которых могут применяться измерители ускорений, базирующиеся на электростатическом подвесе инерционного тела. Анализируются основы создания такого прибора, и приводится пример его практической реализации. Описаны технологические и схемотехнические основы разработки, методы и результаты экспериментальных исследований.

1. Введение

Приборы, предназначенные для измерения действующих на объект ускорений (акселерометры) обычно содержат пробное инерционное тело (ИТ), взвешенное с помощью контактных или бесконтактных подвесов. Основные погрешности измерения таких акселерометров вызваны силами и моментами взаимодействия подвеса с ИТ. Контактные подвесы обладают большей зависимостью от напряжений в материалах, от температурных изменений, более значительными диссипативными свойствами. Акселерометры, в которых левитация ИТ обеспечивается бесконтактными пондеромоторными силами, обеспечивает взвешивание, наиболее свободное от возмущающих моментов [1].

Анализ публикаций последних десятилетий, касающихся проведения сверхвысокоточных научных экспериментов (гироскопический эксперимент по проверке положений теории относительности [2], криогенная градиентометрия [3], геодезическая программа GOCE [4, 5]) показывает, что основные используемые в них

измерительные приборы базируются либо на "холодных" сверхпроводящих подвесах, либо на "теплых" электростатических. Это объясняется уникальной стабильностью их характеристик. При этом электростатический подвес (ЭСП) обладает очевидным преимуществом, позволяя обойтись без сложного и дорогостоящего криогенного оборудования и без создания сверхпроводящих материалов с уникальными свойствами. Высокая стабильность ЭСП обеспечивается стабильной конструкцией ЧЭ, малой зависимостью параметров электронных схем от влияния внешних факторов, отсутствием диссипативных возмущающих сил и моментов.

Работы по созданию акселерометров с электростатическим подвесом ИТ (ЭСА) начались в середине прошлого века с началом освоения космического пространства. Одним из первых разработчиков электростатических акселерометров является французская фирма «ONERA» [6]. Разработкой акселерометров с электростатическим подвесом ИТ занимаются фирмы и других стран: компанией «Ball Aerosystems» (США) спроектирован трехосный микромеханический акселерометр (Si-MESA) с ЭСП [7], «Институт аэронавигационных исследований и испытаний» (Чехия) разработал несколько моделей ЭСА в рамках программы МАС [8], в «Хуачжунском университете науки и технологии (Китай) также ведутся разработки ЭСА для космических исследований [9]. Погрешности измерения микроускорений такими акселерометрами в зависимости от поставленных задач при космических исследованиях варьируются от 10^{-9} до 10^{-13} м/с². В России акселерометры такого класса до последнего времени не созданы.

2. Принцип действия

Один из вариантов конструкции чувствительного элемента ЭСА фирмы «ОНЕРА» акселерометра MicroSTAR [10] представлен на рис. 1. ИТ кубической формы установлено в корпусе из стабильного материала. На корпусе, против каждой грани расположены электроды, при подаче напряжения на которые возникает сила притягивающая ИТ к электродам на которые подается напряжение. Поскольку, в соответствии с теоремой Ирншоу [11], такой подвес принципиально неустойчив, то для обеспечения его работы требуется управление потенциалом электродов с помощью активной обратной связи.

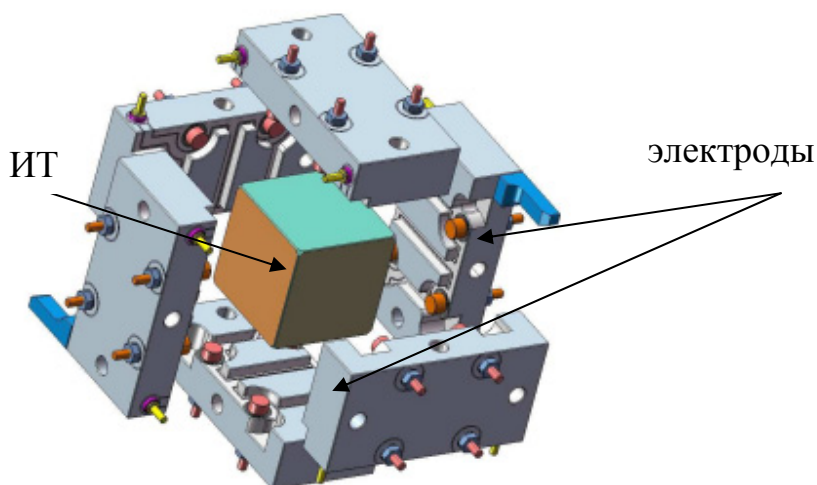


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента ЭСА.

При этом линейное положение и угловая ориентация ИТ контролируются шестью парами электродов, потенциалы которых регулируются контуром управления (рис. 2).

Следует отметить, что количество электродов может изменяться в зависимости от решаемых задач.

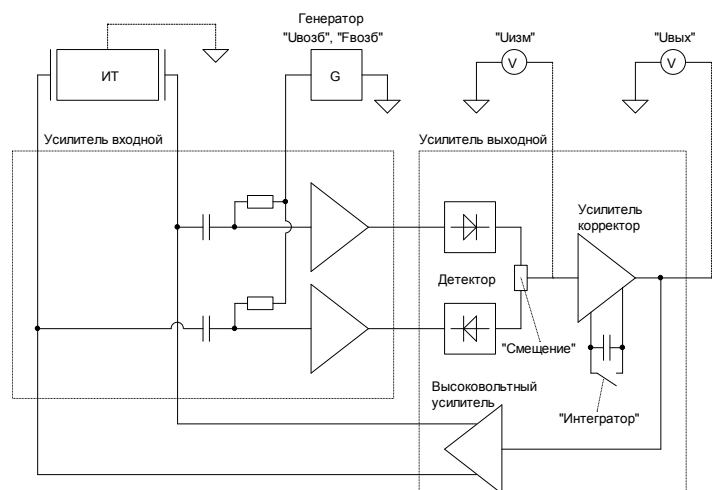


Рис. 2. Схема электростатического подвеса.

На указанной схеме для упрощения представлена структура только одного силового элемента электростатического подвеса, включающего два электрода, расположенных с противоположных сторон ИТ. Полностью же подвес реализуется из нескольких аналогичных силовых элементов, располагающихся по всем трем осям системы координат, связанной с корпусом камеры электростатического подвеса. Каждый силовой элемент имеет собственный независимый канал управления, аналогичный представленному на рис. 2. Схема работает следующим образом: во входном усилителе переменное напряжение ($U_{\text{возб}}$, $F_{\text{возб}}$) от генератора (G) поступает на электроды силового элемента подвеса, и его амплитуда модулируется емкостями, образованными электродами подвеса и поверхностями ИТ. После этого промодулированное напряжение поступает на выходной усилитель, где детектируется и преобразуется в сигнал постоянного тока ($U_{\text{изм}}$), изменяющийся в соответствии смещению ИТ в камере подвеса. Затем полученный сигнал поступает на вход усилителя корректора, где преобразуется в напряжение ($U_{\text{вых}}$), которое через усилитель в виде $U = U_0 \pm kU_{\text{в}}U_{\text{в}}$ подается на электроды силового элемента подвеса и создает на нем усилие, компенсирующее смещение ИТ под действием ускорения a . При этом выходное напряжение является мерой ускорения:

$$U_{\text{вых}} = \frac{dm}{2kCU_0} \cdot a,$$

а максимальное измеряемое ускорение составляет

$$a_m = \frac{2C}{m \cdot d_0} \cdot U_0^2,$$

где: U_0 – опорное напряжение; C – емкость электрода; d – зазор между электродом и ПМ; m – пробная масса; k – коэффициент усиления высоковольтного усилителя.

Изменяя напряжение U_0 при постоянной конструкции акселерометра, можно в широком диапазоне, в зависимости от условий эксплуатации, изменять предельное значение измеряемого ускорения (от $a_m = 10^{-4} \text{ м/с}^2$ – для космических условий эксплуатации до $2 \cdot 10^2 \text{ м/с}^2$ – для наземных).

Основные погрешности ЭСА связаны с температурной и временной нестабильностью конструкции и электронных компонентов.

3. Реализованные схема и конструкция

В «ЦНИИ «Электроприбор» имеется большой опыт создания электростатических подвесов для гироскопических приборов [12, 13], что позволило приступить к разработке акселерометра с электростатическим подвесом ИТ.

Разработанный макет предназначен для использования на космических аппаратах в условиях невесомости. Он состоит из чувствительного элемента и блока обеспечивающей электроники. Основой чувствительного элемента служат ИТ и электроды ЭСП (рис. 3).

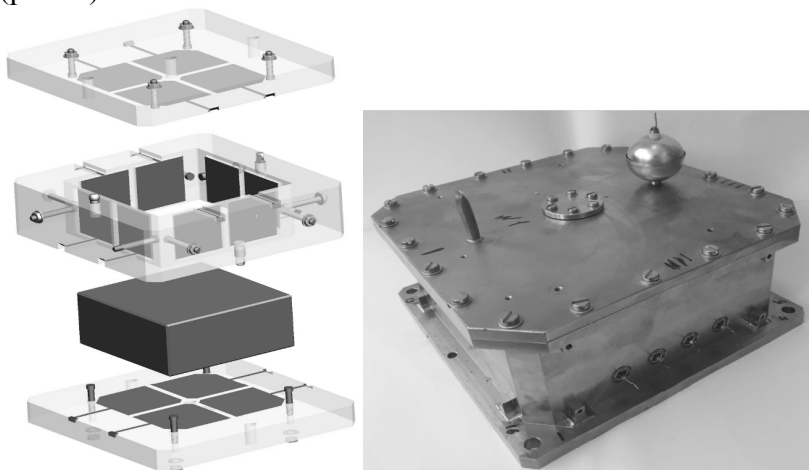


Рис. 3. Макет ЧЭ ЭСА в герметичном корпусе.

Геометрия ИТ и конфигурация электродов подвеса акселерометра выбраны таким образом, чтобы реализовать возможность экспериментальной отработки прибора в наземных условиях. ИТ выполнено в виде прямоугольного параллелепипеда массой 0,32 кг. Зазор между электродами подвеса и ИТ по вертикали составляет 0,03 мм на сторону, по горизонтали – 0,30 мм. Такие масса, зазоры и площади граней ИТ позволяют осуществить его свободное взвешивание в условиях наземных испытаний при действии силы тяжести, а за счет разницы жесткости вертикальных и горизонтальных силовых элементов подвеса удастся обеспечить требуемую для невесомости чувствительность в направлении горизонтальных осей. Перегрузочная способность подвеса по вертикали, необходимая для устойчивого взвешивания ИТ, составляет порядка 2g, а по горизонтали – не более $5 \cdot 10^{-4}$ g.

Для обеспечения необходимой стабильности геометрических параметров конструкции в качестве основного материала подвеса выбран плавленный кварц КУ-1, из которого выполнены элементы корпуса камеры подвеса и ИТ. Требования по непараллельности и неортогональности граней ИТ и поверхностей, образующих электроды подвеса – не более 0,5 угловых секунд, асимметрия расположения электродов – не более 3 мкм. Кварцевые детали подвеса изготавливались при помощи гидроабразивной резки с последующей обработкой химическим травлением, плоскости рабочих поверхностей ИТ и подвеса доводились путем глубокой шлифовки-полировки (ГШП) с использованием химически активной полировальной суспензии. Для придания электрической проводимости на поверхность ИТ нанесено сплошное титановое покрытие. Электроды подвеса также выполнены из титана методом магнетронного напыления. Для обеспечения нулевого заряда ИТ соединяется с корпусом тонким витым безмоментным золотым проводником.

Герметичный корпус чувствительного элемента выполнен из титанового сплава. Титановое покрытие электродов и титановый корпус совместно с эрбиевым

магнитоэлектрическим вакуумным насосом обеспечивают и поддерживают вакуум менее 10^{-5} Па в течение всего срока службы акселерометра для обеспечения уровня вакуума, необходимого для работы электростатического подвеса и предотвращения электрического пробоя.

В электрическую схему подвеса входят восемь каналов управления, образованных парами электродов, расположенных на противоположных стенках камеры ИТ, при этом четыре силовых элемента предназначены для взвешивания ИТ в направлении вертикальной оси и по два силовых элемента – в направлении горизонтальных измерительных осей. Емкостная схема измерения положения ИТ в камере подвеса реализована на тех же электродах, что и силовые элементы. С помощью блока электроники производится измерение положения ИТ в камере подвеса и управление усилием, развиваемым силовыми элементами подвеса, путем изменения подводимого к электродам напряжения, таким образом, чтобы парировались проекции ускорения, действующие в направлении конструктивных осей подвеса, а положение ИТ в камере оставалось неизменным. Вырабатываемое напряжение управления в данном случае пропорционально величине действующего ускорения и служит полезным выходным сигналом ЭСА. В состав блока электроники входят также преобразователи вторичного высоковольтного электропитания для питания подвеса и приборного насоса. Структурная схема автоматического управления ИТ акселерометра показана на рис. 4.

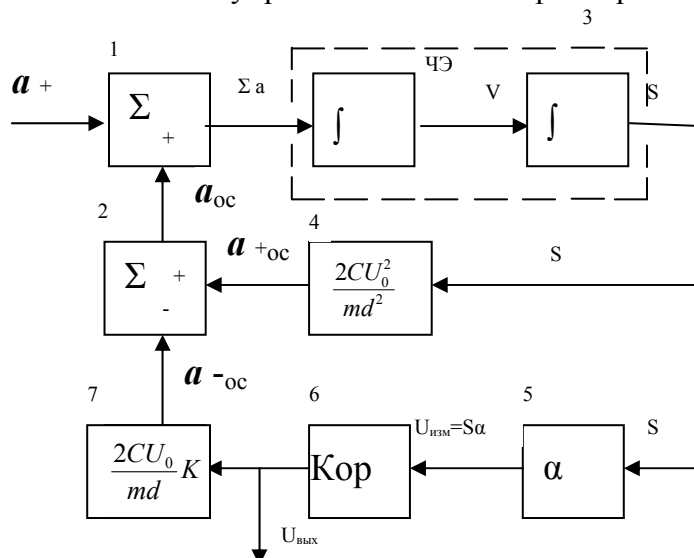


Рис. 4. Структурная схема акселерометра: 1, 2 – Сумматоры; 3 – Чувствительный элемент с двумя интеграторами; 4 – Внутренняя положительная обратная связь; 5 – Измеритель перемещения ПМ; 6 – Корректор (интегратор и дифференциатор); 7 – Внешняя отрицательная обратная связь

Измеряемое ускорение a через двойное интегрирование смещает ИТ на величину S . При наличии постоянного опорного напряжения U_0 на электродах подвеса возникает положительная обратная связь (ОС) в виде ускорения ($a +oc$), которая стремится переместить ПМ к электродам подвеса, однако при наличии внешней отрицательной ОС, через блоки 5, 6, 7 ($a -oc$), ПМ удерживается в середине между электродами подвеса. Отрицательная ОС на всех частотах должна быть сильнее положительной ОС, должно выполняться условие $K\alpha \gg U_0/d$. Корректор имеет в своем составе дифференциатор, обеспечивающий устойчивость системы управления и интегратор, обеспечивающий нулевое смещение ИТ при воздействии постоянного ускорения.

Следует отметить, что в ходе проведенных исследований также проработаны возможность создания цифровой схемы управления подвесом и возможность создания

безопорного электростатического подвеса с линейной выходной характеристикой, обеспечивающей существенное повышение чувствительности и точности измерения ускорений.

4. Методы и результаты испытаний

Задание требуемого «космического» уровня ускорения в наземных условиях выполнялось поворотом испытуемого прибора в гравитационном поле Земли, при использовании в качестве эталона проекции ускорения свободного падения при известных углах поворота. При других испытаниях микроускорения задавались путем перемещения относительно испытуемого прибора источника сверхмалого гравитационного поля – контрольной массы. Следует отметить, что оба эти метода имеют принципиальные ограничения по минимальному уровню воспроизводимого эталонного воздействия, обусловленные сейсмикой и естественными долговременными (сезонными, суточными) поводками основания (фундамента), на котором установлен испытуемый прибор. Преодолеть указанные ограничения становится возможным в том случае, если задание эталонирующего воздействия производится по определенному закону, например, гармоническому, за счет чего в частотном плане можно выделить полезный сигнал. Метод задания эталонирующего воздействия по гармоническому закону поворотом в гравитационном поле земли реализован в установке сейсмометрической УСГ-3М, а метод задания перемещением источника гравитационного поля – в установке сейсмометрической горизонтальной УСГ-Г, которые входят в состав Государственного специального эталона ускорения для сейсмометрии в диапазоне частот 0,001÷30 Гц [14.].

По результатам лабораторных испытаний макета ЭСА методом поворота в гравитационном поле Земли (рис. 5) подтверждены следующие характеристики макета:

- диапазон измеряемых ускорений – от минус $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ до $+1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$;
- масштабный коэффициент – $5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2/\text{В}$;
- шум (при осреднении 1 с) – $2,8 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$;
- предел чувствительности – $4,3 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$.

Дальнейшие испытания, проводимые на установке сейсмометрической горизонтальной УСГ-Г, подтвердили погрешность измерения ускорения на уровне 10^{-7} м/с^2 и чувствительность не хуже 10^{-8} м/с^2 .

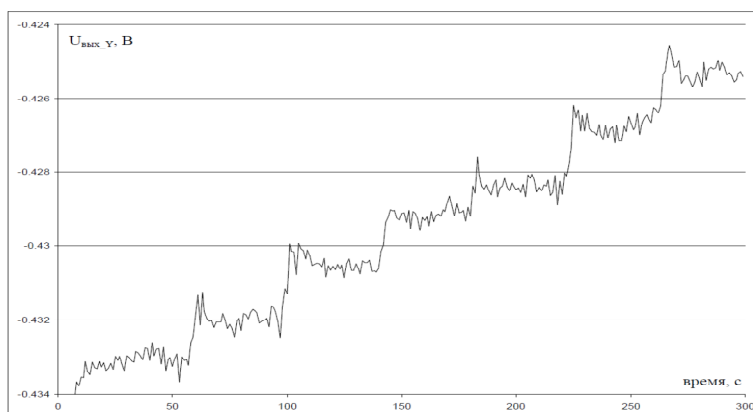


Рис.5. Изменение выходного сигнала при эталонном воздействии $4,3 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$.

5. Заключение

Результаты работ, проведенных в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» по созданию акселерометра на базе электростатического подвеса, обеспечивают технологический задел для построения различных систем гравитационного зондирования. Создан действующий макет электростатического акселерометра, при конструировании, изготовлении и экспериментальной отработке которого решен ряд существенных конструктивных и технологических вопросов, предложены и опробованы разные методы испытаний. Получены экспериментальные данные, подтверждающие возможность создания ЭСА космического применения с уровнем погрешности $10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ м/с}^2$ для применения в уникальных геодезических и физических экспериментах, в системах управления спутниками, свободными от сноса, при мониторинге уровней микрогравитации.

Список литературы

1. Осокин Ю.А. и др. Теория и применение электромагнитных подвесов. М.: Машиностроение, 1980.
2. Buchman S., et al. The Gravity Probe B gyroscope // IOP Publishing. Class. Quantum Grav, 2015. Vol. 32.
3. Moody, M., Paik, H., Canavan E. Three-Axis Superconducting Gravity Gradiometer for Sensitive Gravity Experiments // Rev. Sci. Instrum. 2002. Vol. 73. P. 3957.
4. Евстифеев М.И. Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 94, №3. С.96–114.
5. DiFrancesco D. Advances and Challenges in the Development and Deployment of Gravity Gradiometer Systems // EGM 2007 International Workshop Innovation in EM. Grav and Mag Methods: a new Perspective for Exploration. Capri, Italy. April 15-18, 2007.
6. ONERA. Трехосный электростатический акселерометр. Патент № 1346058, 21.04.1983.
7. Toda R., Takeda N., Murakoshi T., Nakamura S., Esashi M., Electrostatically levitated spherical 3-axis accelerometer // Proc. of 15th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). P. 710-713.
8. Peresty R., Chvojka M., Fedosov V. Use of the highly sensitive electrostatic accelerometer for orbit perturbation effects investigation on board of LEO spacecraft // Proceedings of the 61st IAC. Prague, Czech Republic, Sept. 27-Oct. 1, 2010. IAC -10.B1.3.2.
9. Zhu Z., Zhou Z.B., Cai L., Bai Y.Z., Luo J. Electrostatic gravity gradiometer design for the future mission // Advances in Space Research. 2013. Vol. 51. P. 2269-2276.
10. Lenoir B., Lévy A., Foulon B., Lamine B., Christophe B., Reynaud S. Electrostatic accelerometer with bias rejection for gravitation and Solar System physics // Advances in Space Research. 2011. Vol. 48. P. 1248-1257.
11. Earnshaw S. On the nature of the molecular forces // Transactions Cambridge Phil. Society. 1842. Vol. 7, P. 97-112.
12. История создания электростатического гироскопа / Под ред. В.Г. Пешехонова. С.Пб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2011.
13. Ландау Б.Е. Электростатический гироскоп со сплошным ротором. С.Пб.: ГИЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020, 150 с.
14. Установка сейсмометрическая горизонтальная гравитационная УСГ-Г, Хд1.453.097. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева.