

УДК 531.383
EDN CJJJKV

В. В. СУМАРОКОВ, С. Л. ЛЕВИН, А. В. КУКУШКИН

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДВЕСА В ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» накоплен большой опыт в области разработки и применения электростатических подвесов (ЭСП) чувствительных масс различных инерциальных датчиков – гироскопов и акселерометров. В статье приводятся схемы, положенные в основу того или иного прибора. Делается попытка обобщения принципов построения и поиска единых подходов к созданию инерциальных чувствительных элементов (ЧЭ) с использованием ЭСП.

Ключевые слова: гироскоп, акселерометр, электростатический подвес, инерционное тело.

1. Введение

В течение нескольких десятилетий XX века основной вектор развития гироскопии был направлен на борьбу с моментами трения в подшипниковых и камниевых опорах, однако возможности их совершенствования практически исчерпаны. В результате были разработаны так называемые «неконтактные» подвесы роторов гироскопов: аэродинамические, магнитные, сверхпроводящие и интересующие нас электростатические [1]. Физической основой электростатического подвеса является эффект возникновения электрических сил на поверхности проводника, помещенного в электрическое поле, величина которых пропорциональна квадрату приложенного напряжения [2]. Такой подвес принципиально неустойчив [3], но управление потенциалом электродов с помощью активной обратной связи позволяет устранить эту проблему.

В середине 60-х годов в ЦНИИ «Электроприбор» начались работы по созданию гироскопов с неконтактным подвесом, в том числе с электростатическим [4]. В настоящее время организация является безусловным лидером в России и мире по разработке и практическому применению высокоточных электростатических гироскопов (ЭСГ), в основе которых лежит электростатический подвес шарового ротора. На предприятии были созданы ЭСП для высокоточных карданных и бескарданных гироскопических систем, используемых в комплексах навигации и ориентации различного назначения [4, 5]. Казалось, что с появлением спутниковой навигации и новых типов гироскопов эра ЭСГ, а вместе с ним и ЭСП завершается. Однако в связи с новыми задачами в разных областях техники потребовалось вновь вернуться к вопросам создания и применения электростатического подвеса.

Сумароков Виктор Владимирович. Кандидат технических наук, главный научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Левин Сергей Львович. Кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Кукушкин Антон Владимирович. Начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

В предлагаемой статье описывается опыт разработки ЭСП для инерциальных приборов – гироскопов и акселерометров, производимых в ЦНИИ «Электроприбор».

2. ЭСП карданного электростатического гироскопа

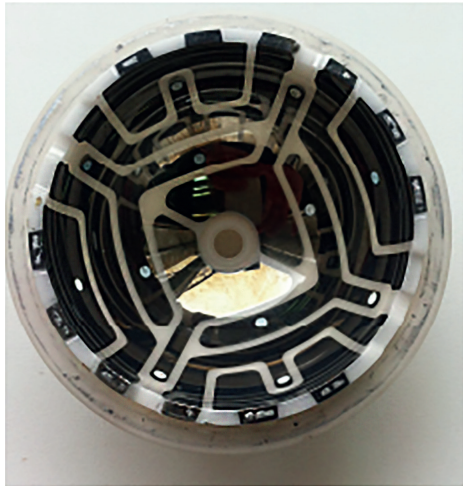


Рис. 1. Полусфера ЭСП с напыленными электродами

К гироскопу, используемому для автономной навигации подводных лодок и установленному в высокоточный карданов подвес с автокомпенсационным вращением корпуса, предъявляются самые высокие требования по стабильности, точности, ресурсу работы, надежности. Конструкция ЧЭ такого гироскопа представляет собой две керамические полусферы (рис. 1), на внутренних поверхностях которых вдоль ортогональных осей напылены с противоположных сторон две пары металлических электродов. При этом силовые электроды находятся внутри измерительных, а их площади одинаковые.

Основное достоинство такой конструкции сферических электродов заключается в простоте и точности сборки, а основной же недостаток связан с тем, что острые края напыленных электродов могут служить причиной локального повышения напряженности поля и соответствующего изменения заряда ротора.

Для обеспечения точности и надежности ЭСП его подвес должен соответствовать следующим требованиям:

- точно и долговременно удерживать ротор в центре сферы электродов;
- поддерживать высокий уровень стабильности напряжений на электродах;
- сохранять работоспособность при перегрузках под действием ускорения;
- предотвращать касания электродов (удары) при взвешивании ротора;
- обеспечивать минимально возможный потенциал ротора при включении и в процессе работы ЭСП;
- обладать сбоеустойчивостью.

Структурная схема ЭСП для одной из трех ортогональных осей показана на рис. 2. Следует отметить, что по аналогичной схеме построены практически все подвесы описываемых ниже приборов.

Выходные сигналы выпрямителей 6 и 7 поступают на вход сумматора 8, который на выходе формирует напряжение U_3 , пропорциональное смещению ротора относительно центра подвеса. Это напряжение поступает через частотный корректор 9 и высоковольтные усилители 10, 11 на силовые электроды 1, 2, замыкая обратную связь, благодаря которой ротор удерживается в центре подвеса. Напряжение U_4 на выходе частотного корректора 9 прямо пропорционально действующему на ротор ускорению. Напряжение U_4 высоковольтных усилителей складывается с опорным напряжением U_0 , чем обеспечивается линеаризация характеристик подвеса.

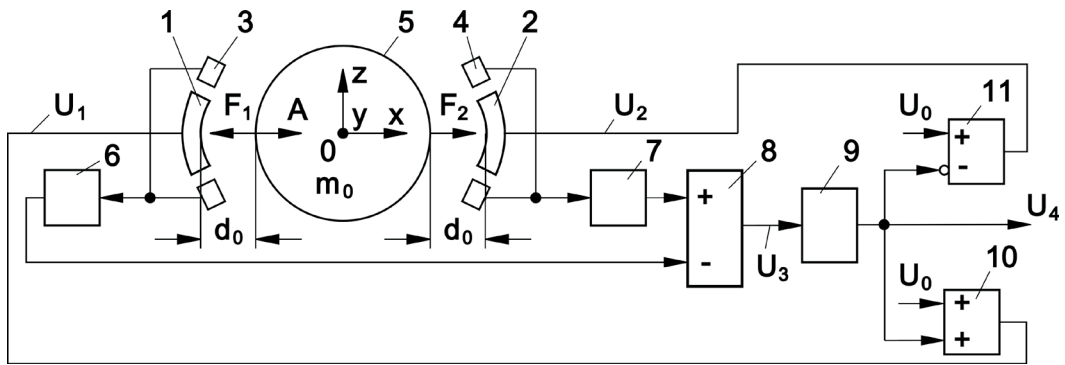


Рис. 2. Структурная схема ЭСП по оси x :

1, 2 – силовые электроды; 3, 4 – измерительные электроды; 5 – ротор; 6, 7 – выпрямители;
8 – сумматор; 9 – частотный корректор; 10, 11 – высоковольтные усилители;
 d_0 – зазор между электродами и ротором

3. ЭСП бескарданного электростатического гироскопа

Описанные в предыдущем разделе технические решения позволили создать высокоточный гироскоп и навигационную систему на его основе для осуществления длительной автономной навигации объекта без привлечения внешней информации. Тем не менее, как хорошо известно, во многих случаях в системах навигации и ориентации задействуется корректирующая внешняя информация, что дает возможность снизить требования к точности и продолжительности автономной работы гироскопических приборов. В результате отпадает необходимость в сложных, тяжелых, габаритных и дорогостоящих карданных системах – гироскопы устанавливаются на базовые элементы конструкции, непосредственно связанные с корпусом подвижного объекта. Часть задач бескарданных навигационных систем решается с использованием математических алгоритмов.

Для таких систем ориентации и навигации разрабатывался бескарданный ЭСГ (БЭСГ), нашедший применение в системах ориентации космических аппаратов (КА) [7].

ЧЭ БЭСГ (рис. 3) выполнен в виде керамического куба, на шести гранях которого размещены три пары ортогонально расположенных опор со сплошными титановыми электродами круглого сечения. В центре сферы электродов находится сплошной бериллиевый ротор (рис. 4) массой 1 г и диаметром 1 см с нанесенным на нем растровым рисунком, обеспечивающим оптический съём показаний об угловом положении ротора относительно корпуса в полном пространственном диапазоне углов. Каждая из шести опор имеет два одинаковых по площади электрода. На шесть электродов подается положительный потенциал, а на другие шесть – отрицательный. Благодаря этому суммарный наведенный потенциал ротора близок к нулю [8].

Следует отметить некоторые особенности технических решений, примененных при проектировании БЭСГ:

- 1) в связи с нестабильностью емкостей длинных проводов разработчики ЭСП всегда проектировали установку электронных блоков в непосредственной близости от ЧЭ с ротором. Вместе с тем при создании системы ориентации космических аппаратов ЧЭ БЭСГ вместе с блоками измерения линейного перемещения ротора размещались на расстоянии 15-20 см от блоков управления подвесом, од-

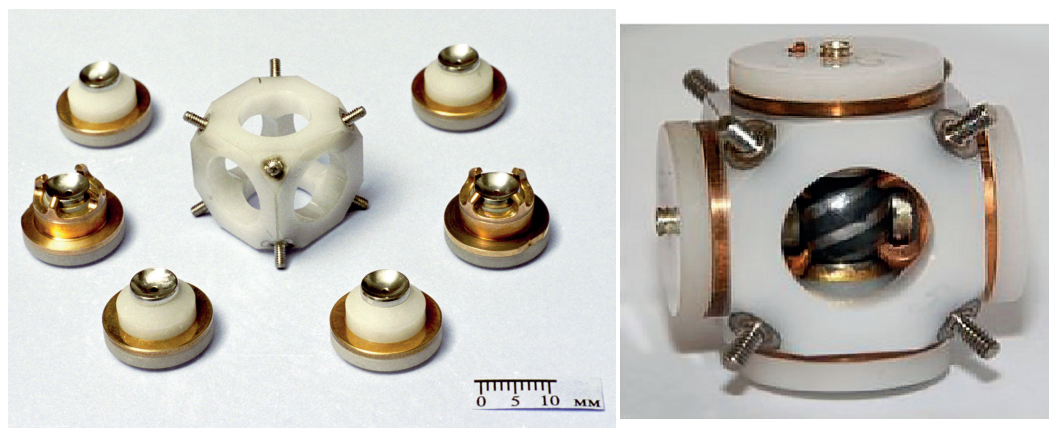


Рис 3. Опоры подвеса прибора БЭСГ

нако это не повлияло на стабильность как параметров подвеса, так и характеристик гироскопа;

- 2) опорное напряжение подвеса в космических БЭСГ может быть повышенным и пониженным. Это необходимо для того, чтобы в условиях земного тяготения использовать более высокое напряжение и тем самым обеспечить устойчивость к перегрузкам, а в условиях невесомости – низкое. Таким образом при космической эксплуатации можно кардинально уменьшить уведящие моменты, действующие на ротор со стороны поля подвеса;
- 3) в приборе одни и те же электроды выполняют как измерительные, так и силовые функции.



Рис. 4. Ротор прибора БЭСГ

4. ЭСП поплавкового гироскопа

Значительная часть навигационных систем, выпускаемых ЦНИИ «Электроприбор», оснащена двухстепенными поплавковыми гироскопами (ДПГ), на базе которых в конце XX века было создано несколько морских навигационных комплексов.

С целью снижения моментов трения в опорах камер поплавковых гироскопов в мировом приборостроении использовались различные типы разгрузочных подвесов, чаще всего магнитных [9, 10]. В 80-е гг. прошлого века в ЦНИИ «Электроприбор» была предложена схема разгрузки камневых опор с помощью электростатического подвеса [11]. Конструкция такого подвеса приведена на рис. 5.

Поплавковая камера ДПГ представляет собой цилиндр, который центрируется внутри корпуса гироскопа с помощью четырех пар электродов, расположенных на боковой поверхности. Поплавок находится в корпусе, заполненном вязкой жидкостью, в состоянии нулевой плавучести. Основное требование к ЭСП поплавкового гироскопа – стабильность центрирования поплавка в зазоре подвеса. Четыре пары электродов позволяют парировать не только линейные перемещения поплавковой камеры, но и угловые повороты ее оси относительно корпуса.

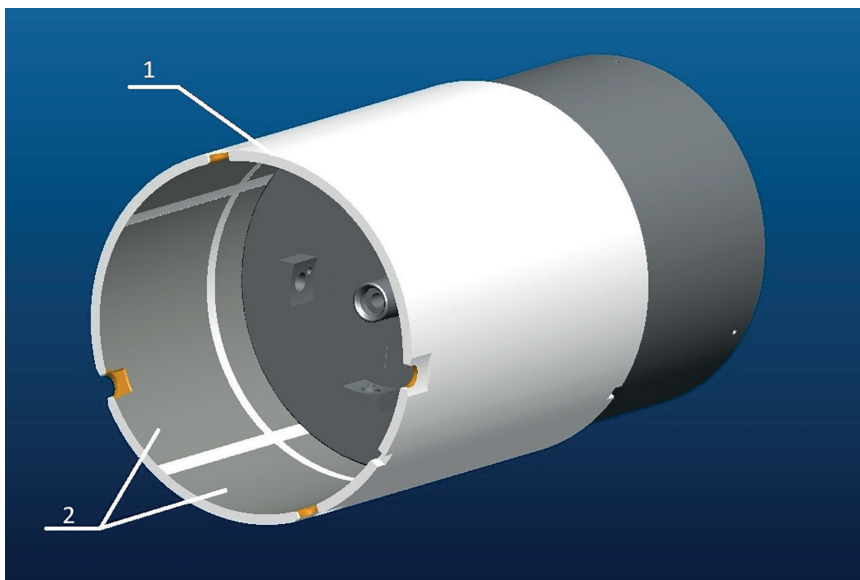


Рис. 5. Конструкция ЭСП поплавкового гироскопа: 1 – поплавок; 2 – электроды

При внедрении ЭСП в ДПГ было необходимо выполнить жесткое конструктивное требование: вся электроника четырехканального подвеса должна быть размещена на встроенной в корпус прибора круглой плате диаметром 5 см. Это повлекло за собой минимизацию количества размещенных на ней электронных компонентов. В результате схема состоит из набора резисторов, одной диодной сборки, одного операционного усилителя и двух транзисторных сборок.

Важным отличием этого подвеса от используемых в ЭСГ и БЭСГ является относительно низкий уровень напряжений, т.к. основные проблемы применения ЭСП во многих приборах связаны именно с наличием высоких напряжений. Возможно, по этой причине за все время многолетней эксплуатации сотен гироскопов типа ДПГ с ЭСП он считается надежным и качественным прибором.

5. ЭСП космического акселерометра

Изменение напряжения в цепи обратной связи ЭСП, вызванное изменением емкости «электрод–ротор» при смещении ротора, как было показано в предыдущем разделе, содержит информацию о действующем на объект ускорении. Это свойство было использовано некоторыми разработчиками акселерометров космического применения. В условиях космической невесомости может быть достигнута высочайшая точность измерения малых ускорений, необходимая, например, в задачах геодезии или управления свободным от сноса спутником [12]. Следует отметить, что требуемые для этих задач уникальные характеристики акселерометров к настоящему времени получены за счет применения либо сверхпроводящих, либо электростатических акселерометров (ЭСА) [13, 14]. Оба эти варианта были рассмотрены разработчиками и выбран второй в связи с наличием у предприятия большого опыта создания приборов с ЭСП.

Был изготовлен ЧЭ с деталями из кварца, сохраняющего высокую стабильность размеров при изменении температуры. Инерционное тело массой около 300 г в виде параллелепипеда с квадратным основанием покрыто сплошным металлическим на-

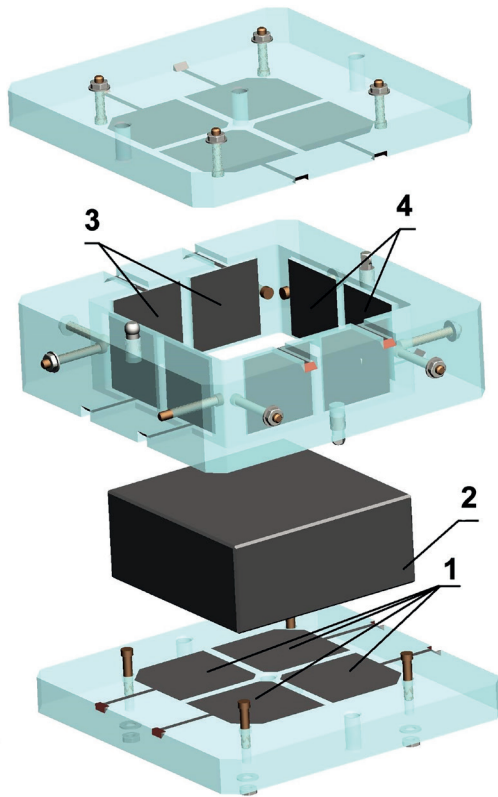


Рис. 6. Схема расположения электродов ЭСП акселерометра:

1 – электроды оси z ; 2 – инерционное тело;
3 – электроды оси x ; 4 – электроды оси y

Электроника подвеса может быть представлена в цифровом исполнении, предполагающем наличие двух шестиканальных преобразователей – аналого-цифрового на входе обратной связи подвеса и цифроаналогового на выходе [15]. При этом все операции по усилению сигналов для повышения устойчивости выполняются программным или аппаратным путем без потери точности и без внесения дополнительных шумов, что обеспечивает снижение габаритов ЭСП, повышение точности измерения и расширение динамического диапазона. Такой вариант подвеса также был изготовлен и опробован.

Следует обратить внимание еще на одну особенность такого ЭСА. Предлагаемый подвес обеспечивает измерение не только линейных ускорений по всем трем осям, но и углов поворота инерционного тела в пространстве, а кроме того, позволяет определить угловые скорости (подтверждение этих выводов не является предметом данной статьи).

6. ЭСП микромеханических акселерометров

В последние десятилетия микромеханические навигационные ЧЭ – гироскопы и акселерометры – получили широчайшее распространение в различных областях техники. В конструкции значительной их части используются емкостные датчики

пылением. На внутренних стенках корпуса ЧЭ, расположенных с зазором вокруг инерционного тела, размещены прямоугольные электроды (рис. 6).

В отличие от действующих на Земле ускорений при работе ЭСА в условиях космоса уровень ускорений не превышает 10^{-4} g, а на свободном от сноса спутнике – 10^{-6} g. Для этого диапазона необходимо обеспечить еще более высокий уровень чувствительности. Чтобы повысить чувствительность рабочих каналов подвеса x , y , номинальный зазор между телом и электродами должен составлять 300 мкм. Канал z подвеса в основном предназначен для обеспечения взвешивания тела в условиях наземных испытаний и парирования ускорений до 2 g. Для увеличения силы в 100 раз зазор по этой оси уменьшен в 10 раз и составляет 30 мкм.

В условиях космической невесомости напряжение питания подвеса устанавливается на уровне 8 В, а для испытания в наземных условиях напряжения питания по осям x , y увеличены до 40 В, по оси z – до 570 В.

Схема функционирует аналогично каналу подвеса ЭСГ, представленного на рис. 2.

для измерения положения ротора (массы) и электростатическое поле для взвешивания и создания воздействия в контуре обратной связи.

ЧЭ микромеханических акселерометров (ММА) изготавливаются по микроэлектронным технологиям: на кремниевой пластине размещаются несколько сотен чипов. Это определяет низкую стоимость и достаточно высокое качество ММА (погрешность измерения $10^{-3} \dots 10^{-4}$ g) при минимальных габаритах. Подвижным элементом ММА является инерционное тело, расположенное между электродами и закрепленное с помощью торсионов на корпусе ЧЭ. На рис. 7 приведены наиболее распространенные конструкции с консольным (рис. 7, а) и гребенчатым инерционными телами (рис. 7, б). Макеты акселерометров с подобными ЧЭ и электронной платой были изготовлены и испытаны.

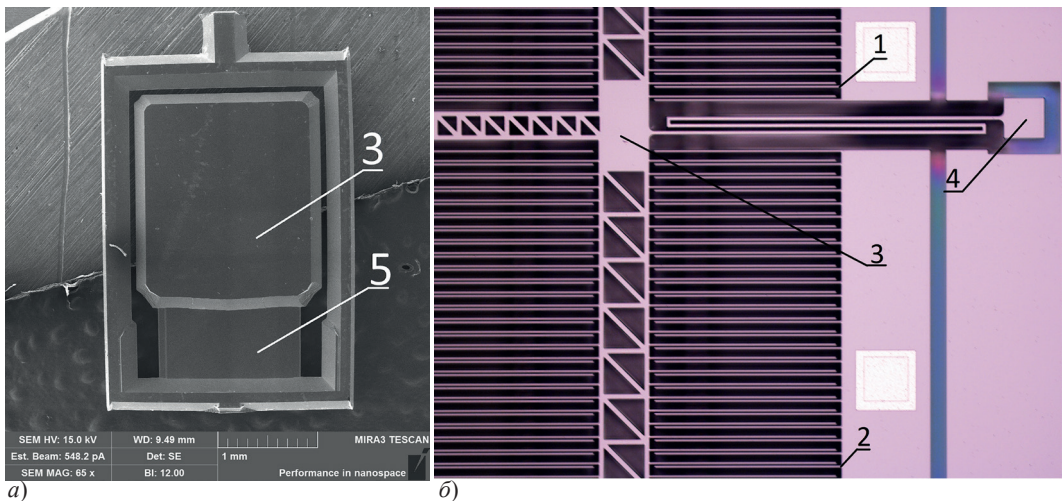


Рис. 7. Конструкции ММА с консольным (а) и гребенчатым (б) инерционными телами:
1, 2 – неподвижные электроды, 3 – инерционное тело, 4 – торсионы, 5 – консоль

Под действием ускорения тело смещается к одному из электродов, при этом величина смещения является мерой действующего ускорения. Погрешность такого прибора существенно зависит от свойств торсионов, которые в свою очередь изменяются под действием окружающей температуры. Применение ЭСП позволяет не только измерять смещение инерционного тела, но и подавать на электроды напряжение обратной связи для формирования силы, удерживающей тело в центре зазора. При этом торсионы не нагружаются, и влияние их температурных деформаций на точность ММА сказывается значительно меньше.

Из-за малых габаритов общие емкости электродов имеют небольшие значения – порядка 5...15 пФ. В связи с этим необходимо достаточно точно измерять полезные емкости зазора «тело–электроды» и выявлять их на фоне влияния паразитных емкостей, связанных с элементами монтажа.

Перемещение инерционного тела в ММА определяется упругими характеристиками пружинных торсионов. Следует учитывать также то, что остаточный газ внутри ММА имеет демпфирующие свойства, которые оказывают существенное влияние на его динамику в связи с малостью рабочих зазоров (единицы мкм). Благодаря этому можно не вводить демпфирующие устройства в электронику ЭСП.

Рассмотрим для примера ММА с консольным маятником (рис. 7, а). Электроды (находятся на верхней и нижней грани), инерционное тело 3, консоль 5 выполнены из кремния, который является проводником электрического тока.

Имитация смещения тела под действием ускорения производится путем подачи на электроды переменного напряжения амплитудой 1 В и частотой 100 кГц, причем токи, проходящие через емкости электродов, являются функцией величины зазоров. Эти токи преобразуются в переменные напряжения, которые выпрямляются, и их разность подается на вход интегратора. Выходное напряжение интегратора служит мерой действующего ускорения, оно поступает на электроды и уменьшает или увеличивает напряжение на них, тем самым позволяя удерживать тело 3 в центре зазора.

Электроника ЭСП для ММА, как правило, представляет собой специализированную микросхему, обеспечивающую прибору в целом минимальные габариты. Тем не менее электронный модуль можно построить и на основе дискретных элементов на удаленной от ЧЭ плате без потери точности ММА – за счет применения усилителей тока, входы которых замыкают по переменному напряжению, что сводит на ноль влияние паразитных емкостей монтажа и исключает их влияние на результаты измерения.

При необходимости уменьшения размеров прибора активные элементы электроники можно выполнить на основе программируемых аналоговых микросхем, микросхем смешанного типа, содержащих как аналоговые блоки, так и цифровые, а также других аппаратных решений.

7. Обсуждение конструкций ЭСП

Анализ публикаций последних десятилетий, касающихся научных экспериментов со сверхвысокоточными инерциальными датчиками (гироскопический эксперимент по проверке положений теории относительности [16], криогенный градиентометр [13], геодезическая программа GOCE [17, 18]), показывает, что в основном используются измерительные приборы либо с «холодными» сверхпроводящими подвесами инерциального тела, либо «теплые» – с электростатическими. Это объясняется уникальной стабильностью характеристик таких устройств. При этом ЭСП обладает очевидным преимуществом – позволяет обойтись без сложного и дорогостоящего криогенного оборудования. Таким образом, актуальность разработки высокоточных приборов на базе ЭСП неоспорима, в том числе и для прецизионных навигационных приборов. Стабильность ЭСП обеспечивает стабильность конструкции ЧЭ и малую зависимость параметров от внешних факторов, таких как температура, влажность, давление, магнитное поле.

Еще одним преимуществом ЭСП ротора гироскопа или инерционного тела акселерометра является возможность описания большинства происходящих в них процессов несложными математическими формулами, например [19]:

$$A = 2C_o U_o \Delta U / m_o d_o,$$

где A – ускорение, C_o – емкость электрода, m_o – масса инерционного тела, d_o – зазор «электрод – инерционное тело», U_o – опорное напряжение на электроде, ΔU – приращение напряжения на электроде. С помощью данных о конструктивных параметрах

ЧЭ и величины рабочего ускорения с высокой точностью можно определить электрические характеристики ЭСП, которые с достаточной точностью будут реализованы на практике. Это позволяет сформировать единый подход к созданию различных инерциальных ЧЭ, а также внедрить ЭСП в иные датчики, использующиеся, например, для измерения веса, наклонов, давления, удара.

Структурная схема ЭСП представлена на рис. 2. Она состоит из генератора, измерителя емкости, корректора и выходного усилителя, подключенного к электродам подвеса. В каждом конкретном приборе указанные блоки построены по разным электрическим схемам в соответствии с характеристиками ЧЭ и входным ускорением.

По сути, приведенного выше выражения для определения ускорения и базовой структурной схемы вполне достаточно, чтобы создать ЭСП для любого инерциального ЧЭ независимо от его физических основ и размеров.

Заключение

Подводя итог приведенному в настоящей работе обзору конструкций электростатических подвесов, отметим наличие ряда характерных для любого ЭСП особенностей, а именно:

- необходимо учитывать, что во многих приборах имеется высокий уровень напряженности электрического поля, что требует глубокого вакуума, сглаженных кромок электродов, обеспечения в платах и ЧЭ высоковольтной электроизоляции;
- заряд ротора гироскопов или инерционного тела акселерометров должен быть сведен к минимуму для повышения стабильности приборов;
- блоки электроники можно разместить на расстоянии от ЧЭ, если для измерения емкостей электродов использовать усилители тока, парирующие влияние паразитных емкостей удаленного блока;
- для повышения надежности лучше задействовать сбоеустойчивые аналоговые схемы (особенно для вращающихся роторов гироскопов);
- следует иметь в виду, что масса взвешиваемых с помощью ЭСП тел может варьироваться в широком диапазоне – от нескольких миллиграммов до 1 кг, а размеры тела – от миллиметра до дециметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nordsieck, A.**, *Free-gyro systems for navigation or the like*. Patent US3003356A. 05.03.1954.
2. **Мартыненко Ю.Г.** Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1988.
3. **Earnshaw, S.**, On the nature of the molecular forces, *Transactions Cambridge Phil. Society*, 1842, vol. 7, pp. 97–112.
4. **История создания электростатического гироскопа** / под ред. В.Г. Пешехонова, СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2011.
5. **Емельянец Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
6. **Hill, D.A. et al.**, Embedded, Real-Time DSP Control of an Electrostatically Suspended Gyroscope, *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Boston, Massachusetts, June 30 – July 2, 2004.
7. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. 150 с.
8. **Буравлёв А.П. и др.** Электростатический гироскоп с подвесом на двойных электродах: результаты исследования // XXVII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб., 2010. С. 16.

9. Ригли У. и др. Теория, проектирование и испытания гироскопов. М.: Мир, 1972.
10. Пельпор Д.С. и др. Гироскопические приборы систем ориентации и стабилизации. М.: Машиностроение, 1977.
11. Патент 2 641 018 РФ, МПК G01C 19/00. Двухстепенной поплавковый гироскоп / Шарыгин Б.Л., Сумароков В.В., Демидов А.Н.; патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». №2017113659; заявл. 19.04.2017; опубл. 15.01.2018.
12. Краснов А.А. и др. Высокоточный электростатический акселерометр для перспективных космических систем // Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем выведения в интересах решения задач Вооруженных Сил Российской Федерации». СПб.: Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского, 2021.
13. Moody, M., Paik, H., and Canavan, E., Three-Axis Superconducting Gravity Gradiometer for Sensitive Gravity Experiments, *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, 73, 3957.
14. Van Kann, F., Edwards, C., Buckingham, M., Penny, R., A prototype superconducting gravity gradiometer, *IEEE Transaction on Magnetics*, 1985, vol 21, no. 2, pp. 610–613, doi: 10.1109/TMAG.1985.1063855.
15. Hongyin, Li et al., A Novel Controller Design for the Next Generation Space Electrostatic Accelerometer Based on Disturbance Observation and Rejection, *Sensors*, 2017, 17, 21, doi:10.3390/s17010021.
16. Buchman, S. et al., The Gravity Probe B gyroscope, *IOP Publishing Class. Quantum Grav.*, 2015, 32.
17. Евстифеев М.И. Состояние разработок бортовых гравитационных градиентометров // Гироскопия и навигация. 2016. Том 94. №3. С.96–114.
18. Di Francesco, D., Advances and Challenges in the Development and Deployment of Gravity Gradiometer Systems, *EGM International Workshop Innovation in EM, Grav and Mag Methods: a New Perspective for Exploration*, Capri, Italy, 2007, April 15–18.
19. Некрасов Я.А., Фрезинский В.С. Активные электростатические подвесы. СПб.: ЦНИИ «Румб», 1987.

Sumarokov, V.V., Levin, S.L., Kukushkin, A.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg) Experience in Application of Electrostatic Suspension in Inertial Sensors, *Гироскопия и Навигация*, 2024, vol. 32. no. 3, pp. 21–30.

Abstract. Concern CSRI Elektropribor, JSC, has accumulated extensive experience in the development and application of electrostatic suspensions (ESS) of sensitive masses of various inertial sensors – gyroscopes and accelerometers. The article presents the schemes that form the basis of these devices. An attempt is made to generalize the principles of construction and search for unified approaches to the creation of inertial sensors using ESS.

Key words: gyroscope, accelerometer, electrostatic suspension, inertia body.

Материал поступил 09.02.2024