

УДК 531.383–1:537.2
DOI 10.17285/0869-7035.0071

Б. Е. ЛАНДАУ, А. А. БЕЛАШ, С. С. ГУРЕВИЧ, С. Л. ЛЕВИН,
С. Г. РОМАНЕНКО, В. Н. ЦВЕТКОВ

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП В СИСТЕМАХ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

25 лет назад ЦНИИ «Электроприбор» предложил использовать для построения систем ориентации космических аппаратов (КА) бескарданный электростатический гироскоп (БЭСГ). Такая система была названа БИС-ЭГ и впервые прошла летные испытания в 2004 г. К 2013 г. было изготовлено 20 таких систем для трех типов КА. Проведенные летные испытания и штатная эксплуатация выявили ряд замечаний к БИС-ЭГ, но в то же время позволили отработать методы калибровки и определить пути повышения точности и надежности. В результате для КА следующего поколения была создана (и до сих пор эксплуатируется) модернизированная система БИС-ЭГ, отличительными особенностями которой стали более высокий уровень надежности, гироскоп повышенной стабильности и возможность полетной калибровки его модели дрейфа. Требования, касающиеся повышения точностных характеристик и необходимости работы в негерметичном отсеке КА, были предъявлены к разрабатываемой в настоящее время следующей модификации БИС-ЭГ. В статье перечисляются этапы и описываются пути усовершенствования БЭСГ и систем семейства БИС-ЭГ, а также результаты их работы на различных космических аппаратах.

Ключевые слова: электростатический гироскоп, космический аппарат, система определения ориентации.

1. Введение

Электростатический гироскоп (ЭСГ) – это самый точный гироскоп в мире [1], однако его уникальная точность обусловлена использованием карданных систем с автокомпенсационным вращением корпуса. Установить подобную громоздкую аппаратуру на КА с его жесткими ограничениями по массогабаритным характеристикам и энергопотреблению проблематично. В связи с этим в мире карданные ЭСГ нашли применение в основном в навигационных системах подводных лодок [2, 3].

Ландау Борис Ефимович. Доктор технических наук, был главным конструктором БИС-ЭГ в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург), действительным членом международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Белаш Андрей Анатольевич. Заместитель начальника отдела – начальник сектора, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Гуревич Станислав Соломонович. Ведущий инженер, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

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

Романенко Светлана Георгиевна. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Цветков Валерий Николаевич. Главный специалист, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Кроме того, ЭСГ обладает тем свойством, что большинство действующих на его ротор уводящих моментов прямо пропорциональны квадрату напряжения подвеса. Это свойство предопределяет возможность его использования в условиях космической невесомости. И если на Земле это напряжение не может быть меньше значения, компенсирующего силу тяжести, то в космосе его можно кардинально снизить до технически реализуемых пределов.

Учитывая эти обстоятельства, а также успешный опыт разработки карданного ЭСГ [4, 5], в конце 90-х годов ЦНИИ «Электроприбор» предложил для использования на космических аппаратах бескарданный ЭСГ (БЭСГ). Разработка БЭСГ проводилась под руководством Б.Е. Ландау [6].

2. Система ориентации БИС-ЭГ

Такой БЭСГ [7] (рис. 1), ранее разработанный для наземного применения и ставший базовым чувствительным элементом космической бескарданной инерциальной системы определения ориентации на электростатических гироскопах (БИС-ЭГ), представляет собой 10-миллиметровый бериллиевый сферический ротор, взвешенный в электрическом поле, создаваемом тремя парами ортогонально расположенных электродов. Напряжение на электродах подвеса составляет 450 В, что обеспечивает перегрузочную способность около 10g. Разгон ротора до частоты 3000 Гц и демпфирование его нутационных колебаний в заданной ориентации обеспечиваются с помощью шести симметрично расположенных катушек с током. Магнитное поле катушек используется только для разгона ротора до рабочей скорости, после чего отключается, а стабилизация частоты вращения ротора осуществляется электрическими силами подвеса. При этом плечом подкручивающего момента служит вектор радиального дисбаланса ротора. Получение и поддержание вакуума в приборе обеспечивает магниторазрядный насос, который создает в рабочем зазоре вакуум порядка $10^{-6} \dots 10^{-7}$ мм рт. ст. Чувствительный элемент гироскопа помещен в систему магнитных экранов. Списание информации об угловом положении ротора в полном диапазоне углов осуществляется с помощью шести ортогонально расположенных оптических датчиков по нанесенному на роторе путем электрохимического маркирования растровому рисунку.

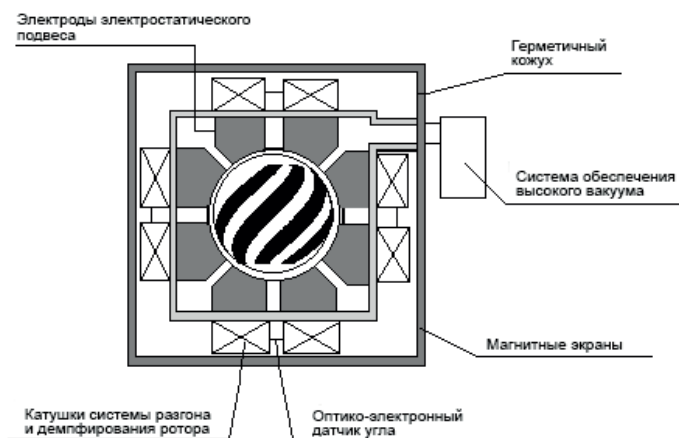


Рис. 1. Принципиальная схема бескарданного ЭСГ

Условия работы, предложенные разработчиками КА, были следующие:

- работа в герметичном отсеке;
- стабильность окружающей положительной температуры не хуже 2°C ;
- на борту имеются астродатчики (АД) [8].

Исходя из этого была спроектирована БИС-ЭГ [9], в состав которой вошли два блока – блок чувствительных элементов (БЧЭ) и блок электроники (БЭ). Конструктивное исполнение – негерметичное, без применения специальных средств термостатирования. Структурная схема БИС-ЭГ приведена на рис. 2

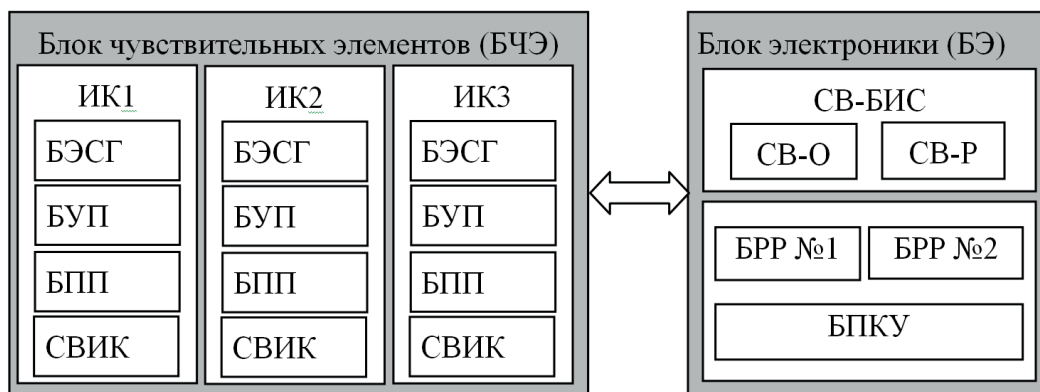


Рис. 2. Структурная схема БИС-ЭГ

В состав БЧЭ входят три БЭСГ, вектор кинетического момента $\mathbf{H}$ одного из них направлен перпендикулярно плоскости орбиты («полярная» ориентация $\mathbf{H}$), двух других – в плоскости орбиты («экваториальная» ориентация $\mathbf{H}$). Для построения гироскопического инерциального трехгранника достаточно двух БЭСГ с неколлинеарно направленными векторами кинетических моментов. Предпочтительными являются гироскопы с полярной и экваториальной ориентацией. Третий гироскоп введен с целью резервирования. Работа гироскопов обеспечивается блоками питания (БПП) и блоками управления подвеса (БУП), сбор, оцифровка и первичная обработка параметров гироскопов – вычислителем СВИК. Дублированные устройства для разгона роторов БЭСГ (блоки разгона ротора – БРР) и для решения всех вычислительных задач (СВ-БИС) входят в состав БЭ (рис. 3)

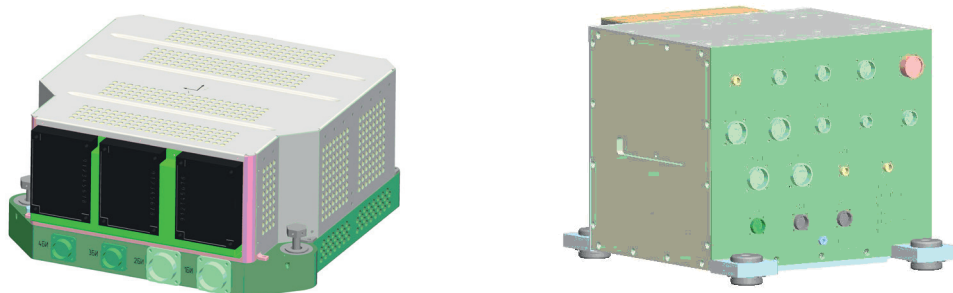


Рис. 3. БИС-ЭГ (БЧЭ и БЭ)

Задача обеспечения точности определения ориентации КА в БИС-ЭГ решалась за счет снижения погрешностей гироскопов инструментальными и алгоритмическими

методами. Инструментальным путем удастся добиться физического дрейфа гироскопа при опорном напряжении подвеса 450 В на уровне 1,0°/ч. В связи с этим было принято решение снизить опорное напряжение до 200 В при работе в невесомости, а 450 В использовать только при проведении наземных испытаний или в случае действия на борту КА перегрузок выше 1g, например при подъеме высоты орбиты.

В качестве алгоритмического метода обеспечения точности использовался прогноз дрейфа и его компенсация с помощью математической модели. В конце 90-х – начале 2000-х гг. была предложена модель дрейфа [7] БЭСГ при наземном применении в виде (проекция на ось X корпуса)

$$\begin{aligned} \omega_x = & k_0 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + \\ & + k_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) V_1 + h_1 h_2 V_2 + h_1 h_3 V_3 \right] + \\ & + k_2 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) V_1^2 + h_2^2 V_2^2 + h_3^2 V_3^2 \right] + \\ & + k_3 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1 V_1 + h_2^3 V_2 + h_3^3 V_3 \right] + \\ & + k_4 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 V_1^2 + h_2^4 V_2^2 + h_3^4 V_3^2 \right] + \\ & + \gamma_1 \left(\mu_{12} \gamma_2^2 - \mu_{31} \gamma_3^2 \right) + \gamma_2 \gamma_3 v_{23}. \end{aligned} \quad (1)$$

В выражении (1) V_i – относительные управляющие напряжения на электродах подвеса (отношение управляющих напряжений к опорному U_0); μ_{ij} – коэффициенты, характеризующие консервативную часть момента от взаимодействия неравновесного подвеса с радиально несбалансированным ротором, а коэффициенты v_{ij} – диссипативную часть данного момента; $k_i (i = \overline{0,4})$ – коэффициенты, обусловленные моментами, связывающими геометрические параметры несферичного и несбалансированного ротора с полем подвеса, в частности k_1 зависит от осевого дисбаланса и всех последующих нечетных гармоник формы ротора, в коэффициент k_3 входят 3-я и все последующие нечетные гармоники формы ротора, коэффициенты k_0, k_2, k_4 зависят от четных гармоник формы ротора, $h_i (i = 1, 2, 3)$ – направляющие косинусы оси вращения ротора в корпусной системе координат. При этом h_i, V_i являются измеряемыми величинами, а коэффициенты k_i, μ_{ij}, v_{ij} должны быть получены из данных испытаний.

Все параметры модели имеют явно выраженный физический смысл. Например, коэффициенты модели ухода (КМУ) от консервативных составляющих определяются следующими формулами:

$$\begin{aligned} k_0 = k_4 = & 35 f_0 r a_4 S_{14} H^{-1}, \\ k_1 = & 2 f_0 r (2 a_1 S_{11} - 3 a_3 S_{13}) H^{-1}, \\ k_2 = & 3 f_0 r (2 a_2 S_{12} - 3 a_4 S_{14}) H^{-1}, \\ k_3 = & 30 f_0 r a_3 S_{13} H^{-1}, \\ f_0 = & \frac{1}{2} \varepsilon_0 U_0^2 d_0^{-2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где H – кинетический момент гироскопа, d_0 – номинальный рабочий зазор в подвесе, f_0 – плотность сил предварительной нагрузки, ϵ_0 – электрическая постоянная, r – радиус ротора, a_i – амплитуда i -й гармоники формы ротора, S_i ($i = 1 - 4$) – площади электродов.

Для космических условий, когда характерные для наземной работы уходы, зависящие от влияния силы тяжести, из модели (1) должны быть исключены, использовалась модель дрейфа в виде

$$\omega_{xkn} = k_0 h_1 \left[-\left(1 - h_1^2\right) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + h_1 \left(\mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2 \right) + h_2 h_3 v_{23}. \quad (3)$$

На первых КА с БИС-ЭГ в системе управления их движением в космосе применялись значения КМУ, определенные при наземных испытаниях, а при полете с помощью информации от астродатчиков вносились угловые поправки. Вместе с тем летные испытания показали необходимость уточнения КМУ в условиях космоса. В результате сформировалась методика, реализующая режим полетной калибровки БИС-ЭГ [10]. В этом режиме определялись одновременно и КМУ гироскопов, и углы рассогласования измерительных осей гироскопов с измерительными осями астродатчиков (привязки). В качестве эталонной информации использовался кватернион углового положения связанной с КА системы координат относительно системы координат, построенной на информации от АД в течение 3-4 орбитальных витков. Обработка данных осуществлялась с применением процедуры фильтра Калмана.

Режим калибровки БИС-ЭГ осуществлялся на начальном этапе летных испытаний и обычно повторялся при последующих отключениях/включениях БИС-ЭГ из-за того, что в новом пуске КМУ гироскопов не всегда соответствовали предыдущим с необходимой точностью. В связи с тем что алгоритм калибровки не был достаточно отработан, апостериорная обработка данных проводилась на Земле с последующей передачей значений КМУ и привязок на борт КА и записью в СВ-БИС.

Летные испытания показали также, что модель (3) не полна и не позволяет достигнуть желаемого уровня точности. По этой причине в штатную программу центрального вычислителя БИС-ЭГ был введен дополнительный алгоритм, в котором остаточный дрейф, не скомпенсированный с помощью модели (3), оценивался при текущих астрокоррекциях и компенсировался путем вычисления оценок остаточных дрейфов каждого гироскопа [11, 12]. Описанные меры позволили снизить дрейф инерциального трехгранника более чем на порядок [13, 14].

Реализация потенциальной точности и надежности системы зависит также от сходимости роторов гироскопов, т.е. от величины угла между векторами кинетических моментов гироскопов H . При полной сходимости система становится практически неработоспособной, при уменьшении угла до 35° начинает существенно снижаться точность. Чтобы устранить эти проблемы, необходимо было исследовать движение гироскопов относительно орбитальной системы координат. В результате экспериментальных и теоретических исследований [15] было установлено, что вектор кинетического момента «полярного» гироскопа «следит» за плоскостью орбиты, двигаясь по эллиптической траектории, направления осей симметрии которой непрерывно меняются с частотой орбитального обращения. Вектор кинетического момента экваториального гироскопа относительно плоскости орбиты совершает низкочастотное колебательное движение с частотой дрейфа орбиты и амплитудой, зависящей от угла

наклонения орбиты. На это движение накладываются колебания с частотой орбитального обращения, амплитуда которых обусловлена дрейфом гироскопа.

Исследование особенностей движения гироскопов в условиях орбитального движения КА позволило прогнозировать сходимость векторов кинетических моментов и в критических ситуациях предотвратить потерю работоспособности системы ориентации.

Во время первых полетов было обнаружено также отрицательное влияние перегрева электронных блоков обработки информации с гироскопов и не менее отрицательное влияние помех в бортовой сети электропитания, вызывающих нарушение работы подвеса ротора БЭСГ.

Таким образом, первые летные испытания позволили получить информацию о работе БЭСГ в условиях космоса и выявить ряд недостатков БИС-ЭГ, к которым можно отнести невысокую точность, недостаточный уровень надежности (перегрев и влияние помех бортовой сети), сходимость векторов кинетических моментов гироскопов, неудобство наземной калибровки КМУ гироскопов. Часть этих проблем была решена к полету 4-го и 5-го КА с этим прибором, а часть – только в новой, модернизированной БИС-ЭГ.

3. Модернизированная система определения ориентации

Модернизированный прибор БИС-ЭГ был разработан и впервые изготовлен в 2007 г. Для решения проблем с возможным перегревом аппаратуры были проведены дополнительные тепловые испытания БИС-ЭГ, а на новых КА в герметичном отсеке был обеспечен принудительный обдув БИС-ЭГ. Для исключения влияния помех в бортовой сети на качество работы гироскопов в состав измерительных каналов введены буферные вторичные источники питания. С целью безусловного выполнения требований по надежности и обеспечения новых, повышенных требований к ресурсу работы введен 4-й измерительный канал, состоящий, так же как и в предыдущем исполнении БИС-ЭГ, из БЭСГ, блоков, обеспечивающих его работу, и спецвычислителя СВИК (рис. 4). При этом информация с двух БЭСГ используется по назначению, третий БЭСГ работает штатно и находится в «горячем» резерве, а четвертый выключен и находится в «холодном» резерве.

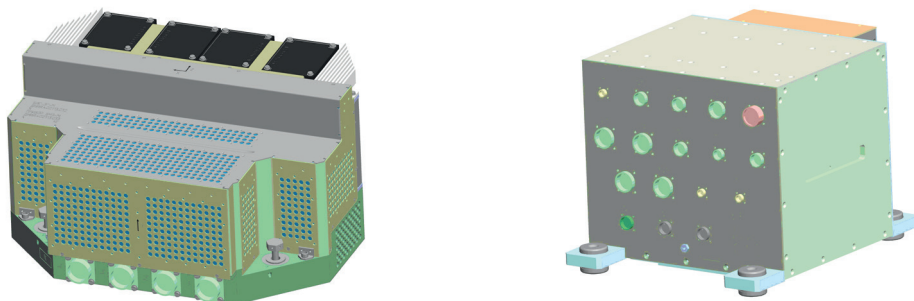


Рис. 4. Модернизированный БИС-ЭГ (БЧЭ и БЭ)

Значительные изменения коснулись конструкции БЭСГ. Как отмечалось в предыдущем разделе, важнейшим требованием для бесперебойной и оперативной работы

КА по назначению является требование повторяемости КМУ гироскопов в каждом новом запуске. С этой целью были проведены теоретические и экспериментальные исследования подвеса ротора.

Потенциал ротора представляет собой суперпозицию наведенного электродами потенциала U_r и потенциала U_q , обусловленного наличием на роторе электрического заряда Q , приобретаемого ротором в момент взвешивания [11]:

$$U_b = U_r + U_q. \quad (4)$$

Наличие в 6-электродном подвесе ротора БЭСГ трех осей (две оси с положительным опорным напряжением, одна – с отрицательным) принципиально создает индуцированный потенциал на роторе. Теоретические исследования показали [16], что наличие индуцированного потенциала на роторе приводит к существенной трансформации статических силовых характеристик подвеса: он определяет принципиальную неравножесткость подвеса по разнополярным осям, при этом значение опорного потенциала на оси с отрицательными напряжениями на электродах почти в два раза превосходит опорный потенциал на осях с положительной полярностью напряжений. Наличие потенциала, обусловленного электрическим зарядом ротора, может привести не только к изменению соотношения опорного потенциала на разнополярных осях, но и к плохо предсказуемому перераспределению неравножесткости.

Для исключения этого явления в новой конструкции БЭСГ был выполнен 12-электродный трехкоординатный подвес: три пары электродов с положительной полярностью и 3 пары – с отрицательной. Это было реализовано путем формирования на базе бывшего одного электрода двух соосных круговых с одинаковой площадью. Было показано, что такое конструктивное решение (применение двойных электродов) дает возможность как снизить уровень электрического заряда, приобретаемого ротором в момент старта, почти на два порядка, так и обеспечить кардинальную минимизацию наведенного потенциала.

Такой подвес был реализован в БЭСГ модернизированного БИС-ЭГ, и летные испытания подтвердили, что при этом существенно повысились уровень повторяемости силовых и моментных характеристик гироскопа от запуска к запуску (т.е. повторяемости КМУ гироскопа) и равножесткость подвеса. В свою очередь, снижение неравножесткости позволило значительно уменьшить моменты от взаимодействия неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором.

На КА, укомплектованных модернизированной системой БИС-ЭГ, была решена проблема потери точности при сходимости векторов кинетических моментов гироскопов. Для этого при достижении угла между векторами значения 7° включается режим приведения роторов с помощью разгонно-демпфирующих катушек БЭСГ. Вектор $\mathbf{H}$ каждого гироскопа приводится к той оси корпуса, которая наиболее близко расположена к данному вектору. Эта операция проводится последовательно на каждом гироскопе, чтобы постоянно сохранялась возможность по информации оставшихся двух гироскопов, работающих в штатном режиме, определять ориентацию КА. Режим приведения ротора включается на таком участке движения КА, когда он не выполняет целевую работу. Разработанная методика позволила постоянно поддерживать роторы двух гироскопов в положении, близком к ортогональному.

В модернизированном БИС-ЭГ существенному изменению подверглась процедура калибровки КМУ по эталонным измерениям АД, которая стала проводиться не на

Земле, а автоматически на борту КА в ходе его полета. Кроме того, была разработана и применена на КА методика калибровки гироскопов с использованием специальных движений изделия для обеспечения полной наблюдаемости калибруемых КМУ. При этом при реализации алгоритма фильтра Калмана осуществлялось поэтапное определение КМУ и привязок: сначала оценивались значения привязок, потом значения КМУ. Это позволило фильтру работать при пониженном векторе состояния и повысить точность определения калибруемых КМУ.

Благодаря принятым решениям удалось дополнительно снизить уход инерциальной системы координат [14].

Первый запуск нового КА с модернизированным БИС-ЭГ был осуществлен в 2014 г., прибор работает на КА и в настоящее время.

4. Система ориентации БИС-ЭГ в герметичном исполнении

2010-е годы принесли новые требования, среди которых следует отметить дальнейшее повышение точности и необходимость работы в негерметичном отсеке КА.

Соответствующая модификация прибора БИС-ЭГ (рис. 5) была разработана, опытные образцы изготовлены и проведены их наземные испытания.

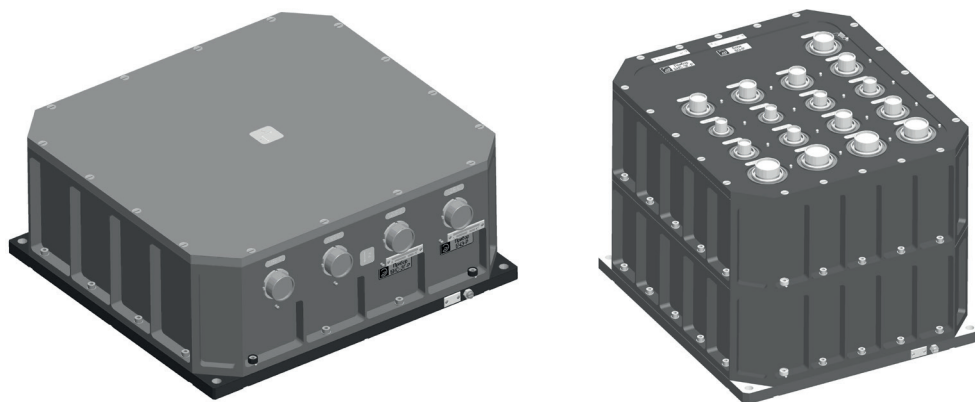


Рис. 5. Герметичный БИС-ЭГ (БЧЭ и БЭ)

Значительным изменениям подверглась конструкция: организованы теплостоки от всех тепловыделяющих элементов и плат составных частей БИС-ЭГ на дно блоков и с них на термоплату КА, блоки БЧЭ и БЭ обрели собственные герметичные корпуса, заполненные осушенным азотом.

Для дальнейшего повышения точности гироскопов и системы в целом внедрен двухуровневый подвес с опорным напряжением для наземных испытаний 200 В и с напряжением для штатной работы в условиях невесомости 50 В.

Для линейного подвеса уменьшение опорного напряжения U_0 в n раз вызывает уменьшение в n^2 раз значений коэффициентов k_i модели дрейфа (см. выражение (2)). Преобладающим в условиях космоса является момент от взаимодействия 4-й гармоники формы ротора с полем подвеса (см. выражение (3)). Аналитическая оценка соответствующего коэффициента k_0 для БЭСГ дает при опорном напряжении 200 В значение коэффициента k_0 и соответствующее ему максимальное значение скорости ухода ω_m : $k_0 = 1,6^\circ/\text{ч}$, $\omega_{m0} = 0,3^\circ/\text{ч}$. При опорном напряжении $U_0 = 50$ В получаем оцен-

ки: $k_0 = 0,1^\circ/\text{ч}$, $\omega_{m0} = 0,02^\circ/\text{ч}$. Т.е. дрейф может быть существенно снижен. В наземных условиях были проведены испытания БЭСГ с 12-электродным трехкоординатным подвесом при пониженном опорном напряжении ($U_0 = 50 \text{ В}$). Тем не менее оценить точность при испытании на Земле затруднительно, так как при опорном напряжении $U_0 = 50 \text{ В}$ плотность сил со стороны нижнего электрода практически равна нулю и подвес становится существенно нелинейным. В космосе в связи с невесомостью напряжения на верхних и нижних электродах небольшие и отличаются незначительно (данные о напряжениях подвеса, полученные с борта КА, подтверждают низкий уровень напряжений на электродах подвеса). В связи с этим подвес в космосе при $U_0 = 50 \text{ В}$ будет линейным, и снижение опорного напряжения позволит примерно на порядок снизить уровень уводящих моментов и повысить точность определения угловой ориентации КА. Кроме того, сочетание двух факторов (достаточно жесткий подвес и пониженное напряжение) позволит упростить модель дрейфа (3) путем исключения из нее коэффициентов, связанных с моментами от взаимодействия неравновесного подвеса с радиальным дисбалансом.

При принятии решения о снижении опорного напряжения необходимо учитывать и уменьшение при этом подкручивающего момента, обеспечивающего стабилизацию скорости вращения ротора. С целью проверки этих эффектов были проведены наземные испытания гироскопа при пониженном опорном напряжении. Результаты испытаний показали, что подвес выдерживает силу удара до $3g$ при его длительности 2 мс , скорость вращения ротора стабилизируется.

Другим усовершенствованием конструкции и технологии БЭСГ стало внедрение лазерного метода нанесения рисунка ротора [17], что позволило повысить технологичность изготовления самого ответственного элемента гироскопа – его ротора.

Летные образцы приборов БИС-ЭГ в герметичном исполнении поставлены предприятию-заказчику, и дальнейшие летные испытания покажут правильность реализованных новых аппаратных и программных решений.

5. Заключение

За прошедшие 20 лет освоено серийное производство систем ориентации типа БИС-ЭГ, большинство из которых прошли летные испытания и штатную эксплуатацию на четырех типах КА. Несмотря на ряд проблем, проявившихся в ходе этих испытаний, можно сказать, что применение в этих системах бескарданных электростатических гироскопов в основном оправдало ожидания разработчиков и потребителей и обеспечило требуемое качество работы системы управления движением КА в целом.

Полагаем, что достигнутые точность и надежность позволяют и дальше использовать БЭСГ (и системы определения ориентации на их основе) в качестве перспективных датчиков угловой информации для КА различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Buchman, S., Lipa, J.A., Keiser, G.M., Muhlfelder, B. and, Turneure, J.P., The Gravity Probe gyroscope, *Classical and Quantum Gravity*, 2015, vol. 32, no. 22.
2. ION Museum. Period/Dates when in use: 1978-9 to Present.
3. Elton, O.L. and Moore, J.P., Marine ESG Navigation as a Capability for the Present Navigation, *Journal of the Institute of Navigation*, Summer, 1973, vol. 20, no. 2, pp. 126–136.

4. **История создания электростатического гироскопа.** Памяти главного конструктора А.С. Анфиногенова. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011.
5. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №2 (109). С. 3–10.
6. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.
7. **Буравлев А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л. Романенко С.Г.** Модель дрейфа бескарданного электростатического гироскопа и идентификация ее параметров // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2002. №1 (13).
8. **Аванесов Г.А., Форш А.А., Бессонов Р.В., Зиман Я.Л., Куделин М.И., Залялова Р.Г.** Звездный координатор БОКЗ-М и перспективы его развития // Материалы XIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 199–205.
9. **Кирилин А.Н., Аншаков Г.И., Ахметов Р.Н., Сторож А.Д.** Космическое аппаратостроение. Научно-технические исследования и практические разработки АО «РКЦ «Прогресс». Самара, 2017.
10. **Ландау Б.Е., Романенко С.Г., Демидов А.Н.** Способ калибровки бескарданной инерциальной системы на электростатических гироскопах в условиях орбитального полета. Патент РФ №2677099 от 15.01.2019.
11. **Ландау Б.Е., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г., Гуревич С.С., Одинцов Б.В.** Основные результаты разработки и испытаний системы определения ориентации на электростатических гироскопах для низкоорбитальных космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2007. №2 (57). С. 3–12.
12. **Ландау Б.Е., Гуревич С.С., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г.** Калибровка погрешностей бескарданной инерциальной системы на ЭСГ в условиях орбитального полета // Гироскопия и навигация. 2010. №1 (68). С. 36–46.
13. **Ландау Б.Е., Белаш А.А., Гуревич С.С., Емельянцев Г.И., Левин С.Л., Романенко С.Г.** Бескарданная инерциальная система на электростатических гироскопах для орбитальных космических аппаратов и особенности ее математического обеспечения // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Вып. 6. С. 66–75.
14. **Ландау Б.Е., Левин С.Л., Гуревич С.Г., Емельянцев Г.И., Завгородний В.И., Романенко С.Г., Одинцов Б.В.** Наземная отработка методики полетной калибровки БИСО на ЭСГ для орбитальных космических аппаратов с произвольной ориентацией, *19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 2012, pp. 127–135.
15. **Егоров А.В., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г.** Движение ротора бескарданного электростатического гироскопа в условиях орбитального полета космического аппарата // Гироскопия и навигация. 2011. №4(75). С. 63–75.
16. **Буравлев А.П., Кузин В.М., Ландау Б.Е., Сумароков В.В.** Бескарданый электростатический гироскоп с подвесом на двойных электродах. Реферат доклада // XXVI конференция памяти Н.Н.Острякова. СПб., 2008. С. 17–18.
17. **Yulmetova, O.S., Scherbak, A.G.,** Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system, *Optics and Laser Technology*, 2018, vol. 101, pp. 242–247.

Landau, B.E., Belash, A.A., Gurevich, S.S., Levin, S.L., Romanenko, S.G., and Tsvetkov, V.N. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

Electrostatic Gyroscope in Spacecraft Attitude Reference Systems, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 3 (114), pp. 69–79.

Abstract. 25 years ago, the CSRI Elektropribor proposed to use a gimballess electrostatic gyroscope (ESG) in spacecraft attitude reference systems. The system called BIS-EG passed the first flight tests in 2004. By 2013, 20 such systems had been manufactured for three types of spacecraft. The flight tests and regular operation of BIS-EG revealed a number of limitations inherent in them; at the same time, calibration methods were developed and tested and the ways of improving the system accuracy and reliability were identified.

As a consequence, BIS-EG was upgraded for the next generation spacecraft, and it is still in operation. Its distinctive features are higher reliability, the gyroscope of greater stability, and the possibility of in-flight calibration of its drift model.

The next modification of the BIS-EG, which is under development now, must meet the requirements for higher accuracy characteristics and the need to work in the unpressurized spacecraft compartment.

The stages and methods for improving the gimballess ESG and BIS-EG family systems are described, as well as the results of their operation in accordance with their purposes in different types of spacecraft.

Key words: electrostatic gyroscope, spacecraft, attitude reference system.

Материал поступил 02.08.2021