

Д. М. КАЛИХМАН, В. А. ТУРКИН

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ БЛОКОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НЕОРТОГОНАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОСЕЙ

В статье описывается методика контроля шестиосных блоков чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) – измерителей угловой скорости и кажущегося ускорения с неортогональной ориентацией измерительных осей. Разработка методики осуществлялась в рамках модернизации транспортной системы космических кораблей типа «Союз» по программе Международной космической станции (МКС). Эффективность предложенного подхода была подтверждена результатами наземных и летных испытаний на 86 кораблях типа «Союз» и «Прогресс» с 2002 по 2023 г.

Ключевые слова: результаты испытаний, блок измерителей угловой скорости, блок измерителей линейного ускорения, методика, комплексный параметр, неортогональная ориентация осей чувствительности, относительная погрешность.

Введение

Блоки чувствительных элементов (БЧЭ) для БИНС получили широкое распространение в системах управления (СУ) ракетно-космической техникой (РКТ) [1–3, 5–9]. В их состав входят инерциальные чувствительные элементы (ИЧЭ) – измерители угловых скоростей (ИУС) и кажущихся ускорений (ИКУ), оси чувствительности (ОЧ) которых ориентированы неортогонально, т.е. расположены под определенными углами к осям системы координат, связанной с летательным аппаратом.

В приборостроении разработано множество методов повышения надежности навигационных систем, один из них – это формирование избыточной информации на основе использования БЧЭ с неортогональной ориентацией измерительных осей [11, 14, 15, 17, 18, 27, 28, 29]. В настоящее время в мире существует большое количество типов ИУС и ИКУ: поплавковые, динамически настраиваемые (ДНГ), волоконно-оптические (ВОГ), лазерные (ЛГ), волновые твердотельные (ВТГ), на основе явления ядерного магнитного резонанса (ЯМГ), микромеханические гироскопы; поплавковые, струнные, кремниевые, кварцевые маятниковые (КМА), а также микромеханические акселерометры [10, 16, 19–22]. Ведутся разработки инерциальных измерителей на холодных атомах. Избыточная БИНС с неортогональной ориентацией ОЧ может быть скомпонована в виде отдельных БЧЭ ИУС и ИКУ, как это сделано

Калихман Дмитрий Михайлович. Доктор технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, Филиал АО «НПЦАП» – «ПО «Корпус»; профессор кафедры технической механики и мехатроники, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. (г. Саратов). Председатель Саратовского отделения международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Туркин Виталий Андреевич. Ведущий инженер-программист научно-исследовательской лаборатории, Филиал АО «НПЦАП» – «ПО «Корпус».

в СУ космическими кораблями (КК) типа «Союз» и «Прогресс» и в российском модуле МКС [4, 11, 13], либо в виде единого блока, содержащего одновременно и те и другие измерители вместе с бортовым процессором – по такому принципу построены многие зарубежные СУ, например БИНС на ВТГ и КМА [22].

Необходимо отметить, что БЧЭ с неортогональной ориентацией измерительных осей применяются, как правило, в БИНС на объектах РКТ. Это связано с тем, что именно там предъявляются повышенные требования к навигационным системам в отношении точности измерения проекций векторов угловой скорости и линейного ускорения, надежности (работа при одновременном отказе до трех датчиков), временной стабильности параметров [2, 4–7, 11–13].

Избыточные БЧЭ обладают структурной надежностью, под которой понимается формирование в системе дополнительной информации, за счет чего при отказе в одном из измерительных каналов (ИК) можно получать достоверные данные о действующих на объект угловой скорости и кажущегося ускорения. Такие системы, например состоящие из 6 ИУС или ИКУ, позволяют определить до 2-х каналов, выдающих ошибочную информацию [2].

Вместе с тем возможность оперативного высокоточного контроля параметров БЧЭ перед установкой на изделие с учетом сложности и трудоемкости проверки параметров блоков с неортогональной ориентацией измерительных осей, а также обеспечение неизменности параметров БЧЭ после летных испытаний остаются актуальными задачами [11, 12, 14, 27, 28].

Постановка задачи

Чтобы выполнить перечисленные выше условия, необходима методика контроля избыточных БЧЭ для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей, которая могла бы использоваться до летных испытаний, в том числе для проверки параметров приборов при изготовлении и перед установкой в СУ КК, а так же при анализе сохранности значений параметров БЧЭ после летных испытаний. Специфичность аттестации разработанных приборов после летных испытаний на КК типа «Союз» связана с тем, что из космоса на Землю возвращается аппарат, на котором отсутствует часть БЧЭ: датчики угловой скорости в корпусе КК «Союз» сгорают в плотных слоях атмосферы, а блоки акселерометров остаются в аппарате и вместе с космонавтами спускаются на Землю. Ввиду этого провести аттестацию БЧЭ после летных испытаний возможно не на каждом приборе [4, 11, 12, 14, 27, 28]. Совершенно понятно, что в авиационных и морских системах подобных проблем не возникает.

Настоящая статья посвящена проверке БЧЭ для БИНС на предприятии-потребителе (в нашем случае РКК «Энергия») при входном контроле блока измерителей линейного ускорения (БИЛУ) и модернизированного ИУС (ИУС-М) для КК типа «Союз» и «Прогресс» посредством комплексного параметра [27, 28]. Такой параметр вводится для оперативного высокоточного контроля приборов перед установкой в СУ КК и характеризует относительную погрешность измерения вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли или ускорения силы тяжести. Его проверка позволяет обеспечить соответствие установленным допускам всех параметров БЧЭ, при этом исключается необходимость использования трудоемких алгоритмов для контроля на предприятии-изготовителе. Введение комплексного параметра позволяет также

сократить этап входного контроля БЧЭ для БИНС с одной недели до нескольких часов. Следует отметить, что указанные приборы рассматриваются в настоящей статье лишь в качестве примеров. Методика с применением комплексного параметра подходит для контроля ИУС и ИКУ любого типа с неортогональной ориентацией ОЧ в БИНС. Конкретные условия, при которых она может быть привлечена для других типов датчиков, должны определяться разработчиками БЧЭ исходя из характера нестабильности параметров датчиков.

Перечень решаемых задач

Введение комплексного параметра, физический смысл которого подробно рассматривается ниже, дает следующие основные преимущества:

- 1) обеспечивает соответствие установленным допускам всех параметров БЧЭ, внесенных в формуляр на прибор и в дальнейшем сохраняемых в памяти бортовой ЭВМ;
- 2) существенно сокращает время входного контроля параметров прибора – с одной недели до нескольких часов.

Кроме того, необходимо создать методику формирования предельно допустимых значений комплексного параметра на этапе проектирования, в основу которой будут положены допуски, установленные в технических условиях на прибор в соответствии с техническим заданием (ТЗ).

Именно по этой причине при создании и наземной аттестации БЧЭ для БИНС космического применения необходимо сформулировать следующий комплекс задач:

- 1) построение методики и разработка программно-математического обеспечения (ПМО) для контроля параметров избыточных БЧЭ в диапазоне рабочих температур с использованием специального оборудования в условиях производства;
- 2) введение комплексного параметра для оперативного высокоточного контроля приборов на предприятии-потребителе перед установкой в СУ КК, проверка которого позволит гарантировать соответствие установленным допускам всех параметров БЧЭ;
- 3) создание алгоритмов и ПМО для контроля комплексного параметра на предприятии-потребителе;
- 4) разработка методик формирования допуска на комплексный параметр на этапе проектирования на основе допусков, заданных в ТЗ на прибор;
- 5) анализ сохранности значений параметров БЧЭ после летных испытаний.

Реализация всех пяти пунктов и составляет суть предлагаемой методики.

Описание БЧЭ, входящих в состав БИНС КК «Союз» и «Прогресс»

Как уже говорилось выше, предложенная методика испытывалась на шестиканальном блоке ИУС-М с неортогональной ориентацией ОЧ (рис. 1, 3), чувствительными элементами которого являются безобогревные датчики угловой скорости (ДУС) поплавкового типа [19, 20], и шестиканальном БИЛУ с неортогональной ориентацией ОЧ (рис. 2, 4), его чувствительными элементами служат КМА. Оба прибора разработаны на предприятии ПО «Корпус» (г. Саратов) по техническому заданию РКК «Энергия» (г. Королев) [4, 11, 13].

БИЛУ относится к измерителям навигационного класса точности, а ИУС-М – среднего класса точности. Несмотря на это, методика проектирования и контроля БЧЭ даже в случае применения в качестве ИЧЭ измерителей других классов точности, как уже отмечалось выше, останется неизменной.

Разработка алгоритмов и ПМО для контроля параметров избыточных БЧЭ в условиях производства

В настоящем разделе описываются алгоритмы и ПМО [23–28] для контроля основных параметров избыточного БЧЭ в условиях производства: масштабного коэффициента и его изменения,



Рис. 1. Прибор ИУС-М



Рис. 2. Прибор БИЛУ

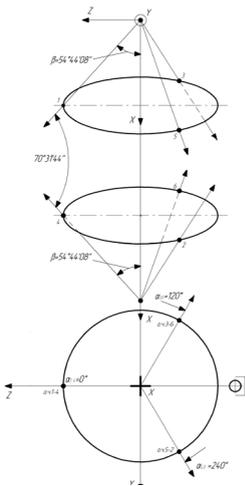


Рис. 3. Ориентация ОЧ ИУС-М

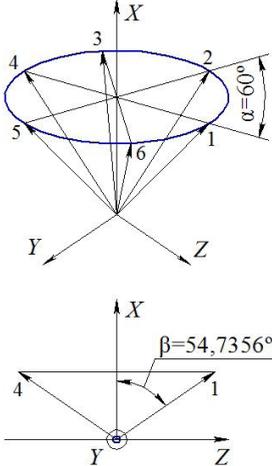


Рис. 4. Ориентация ОЧ БИЛУ

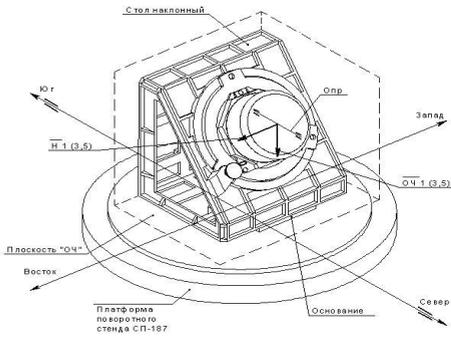


Рис. 5. Пример установки ИУС-М на поворотном стенде

систематической составляющей нулевого сигнала, случайной составляющей нулевого сигнала в запуске и между запусками, двух углов ориентации ОЧ относительно осей базовой системы координат, связанной с корпусом прибора, оценки их стабильности. Точностная оценка погрешности измерения угловой скорости вращения Земли для ИУС-М и ускорения силы тяжести в точке контроля для БИЛУ производится с применением комплексного параметра.

Проверка ИУС-М осуществляется при температурах 25°C, 0°C и 40°C. Контроль масштабного коэффициента выполняется путем задания угловых скоростей $\pm 3^\circ/\text{с}$, $\pm 6^\circ/\text{с}$ и $\pm 12^\circ/\text{с}$ положительного и отрицательного направления с помощью поворотного стенда. Установка ИУС-М на поворотном стенде показана на рис. 5. Контроль его параметров осуществляется при одновременном включении всех каналов. Точностная оценка погрешности измерения прибором угловой скорости вращения Земли производится при установке прибора в три ориентированных по вертикали места положения X, Y, Z относительно базовой системы координат.

Далее приведены алгоритмы контроля избыточного блока ИУС-М, параметры которого рассчитываются следующим образом.

1. Масштабный коэффициент (МК) i -го измерительного канала прибора (заносятся в память бортовой ЭВМ):

$$K_M^{\omega_\xi} = \frac{3600 \cdot \theta}{\left(N_{uki}\right)_{\omega_\xi} - (f_{uki})_j \cdot T_j}, \text{ "/бит}, \quad (1)$$

где j – количество циклов в запуске, $j = 5$; $\left(N_{uki}\right)_{\omega_\xi^+}$, $\left(N_{uki}\right)_{\omega_\xi^-}$ – числа импульсов, полученные на выходе проверяемого канала за время разворота платформы поворотного стенда T на угол θ , имп.; $(f_{uki})_j$ – частота импульсов, соответствующая систематической составляющей нулевого сигнала, Гц; ω_ξ – задаваемая угловая скорость, °/с; ξ – номер задаваемой угловой скорости (в нашем случае – приведенные выше угловые скорости, используемые для поплавкового ДУС, в случае иного типа прибора эти величины могут быть другими).

2. Нелинейность МК измерительного канала прибора для каждого значения угловой скорости:

$$\delta K_M^{\omega_\xi} = \left| \frac{K_M^{\omega_\xi} - \bar{K}_M^{\omega_\xi}}{\bar{K}_M^{\omega_\xi}} \right| \cdot 100, \%, \quad (2)$$

где, $\bar{K}_M^{\omega_\xi}$, "/бит – среднее значение МК ИК во всем диапазоне задаваемых угловых скоростей.

3. Погрешность МК ИК прибора во всем диапазоне угловых скоростей:

$$\Delta K_M^{\omega_\xi} = \left| \frac{\bar{K}_M^{\omega_\xi} - (K_M)_p}{(K_M)_p} \right| \cdot 100, \%, \quad (3)$$

где $(K_M)_p = 1,35$ "/имп – расчетное значение масштабного коэффициента.

4. Систематическая составляющая нулевого сигнала ИК ИУС-М (вводится в память бортовой ЭВМ):

$$\bar{\omega}_{ukij} = \frac{\bar{K}_M^{\omega_\xi} \cdot \bar{N}_{ukij}^{2\tau}}{100} - \omega_3^z, \text{ } ^\circ/\text{ч}, \quad (4)$$

где ω_3^z , °/ч – горизонтальная составляющая скорости вращения Земли; $\bar{N}_{ukij}^{2\tau}$ – число импульсов в двухчасовом запуске, соответствующее систематической составляющей нулевого сигнала, имп.

5. Случайная составляющая нулевого сигнала ИК в запуске:

$$\delta \bar{\omega}_{ukij} = \frac{\bar{K}_M^{\omega_\xi}}{100} \cdot \left[\left(\Delta N_{ukij}^{100c} \right)^{\max} - \bar{N}_{ukij}^{2\tau} \right], \text{ } ^\circ/\text{ч}, \quad (5)$$

6. Случайная составляющая нулевого сигнала ИК от запуска к запуску:

$$\Delta \omega_{uki} = \left(\bar{\omega}_{ukij} \right)^{\max} - \bar{\omega}_{uki}, \text{ } ^\circ/\text{ч}, \quad (6)$$

где $(\bar{\omega}_{ukij})^{\max}$, °/ч – систематическая составляющая нулевого сигнала ИК в запуске, максимально отличающаяся от среднего его значения по трем запускам – $\bar{\omega}_{uki}$.

7. Значение угла ориентации ОЧ относительно опорной плоскости ИУС-М β_{uki} проверяемого ИК определяется при установке прибора на платформе поворотного стенда в положение X по формуле (вводится в память бортовой ЭВМ)

$$\beta_{uki} = \frac{\beta_{uki}^{+10^\circ/c} + \beta_{uki}^{-10^\circ/c}}{2}, \dots \dots \dots, \quad (7)$$

где $\beta_{uki}^{+10^\circ/c}$ и $\beta_{uki}^{-10^\circ/c}, \dots \dots \dots$ – углы, определяющие положение ОЧ i -го ИК относительно опорной плоскости, измеренные при задании угловой скорости $10^\circ/c$ положительного и отрицательного направлений, при установке прибора на платформу поворотного стенда в положение X ;

$$\beta_{uki}^{+10^\circ/c} = \arcsin \frac{\left[(N_{uki}^{+10^\circ/c})_X - (f_{\text{дрuki}})_X \cdot T_X^{+10^\circ/c} \right] \cdot \bar{K}_M^{\omega_\xi}}{T_X^{+10^\circ/c} \cdot \omega_X^{+10^\circ/c}}, \quad (8)$$

$$\beta_{uki}^{-10^\circ/c} = \arcsin \frac{\left[(N_{uki}^{-10^\circ/c})_X - (f_{\text{дрuki}})_X \cdot T_X^{-10^\circ/c} \right] \cdot \bar{K}_M^{\omega_\xi}}{T_X^{-10^\circ/c} \cdot \omega_X^{-10^\circ/c}}, \quad (9)$$

где $(N_{uki}^{+10^\circ/c})_X, (N_{uki}^{-10^\circ/c})_X$ – количество информационных импульсов на выходе ИК; $T_X^{+10^\circ/c}, T_X^{-10^\circ/c}$, с – время разворота платформы поворотного стенда на заданный угол; $(f_{\text{дрuki}})_X$ Гц – частота, соответствующая систематической составляющей нулевого сигнала; $\omega_X^{+10^\circ/c}, \omega_X^{-10^\circ/c}$, "/с – фактические значения угловых скоростей.

8. Среднее значение угла ориентации ОЧ по образующей конуса ИУС-М α_{uki} i -го ИК определяется при установке прибора на платформе поворотного стенда в положение Y по формуле (заносится в память бортовой ЭВМ)

$$\alpha_{uki} = \frac{\alpha_{uki}^{+10^\circ/c} + \alpha_{uki}^{-10^\circ/c}}{2}, \dots \dots \dots, \quad (10)$$

где $\alpha_{uki}^{+10^\circ/c}$ и $\alpha_{uki}^{-10^\circ/c}, \dots \dots \dots$ – углы, определяющие ориентацию ОЧ ИК, измеренные при задании угловой скорости $10^\circ/c$ положительного и отрицательного направлений, при установке прибора на платформу поворотного стенда в положение Y ;

$$\alpha_{uki}^{+10^\circ/c} = \arcsin \frac{\left[(N_{uki}^{+10^\circ/c})_Y - (f_{\text{дрuki}})_Y \cdot T_Y^{+10^\circ/c} \right] \cdot (\bar{K}_M^{\omega_\xi})_{uki}}{T_Y^{+10^\circ/c} \cdot \omega_Y^{+10^\circ/c} \cdot (-\cos \beta_{uki})}, \quad (11)$$

$$\alpha_{uki}^{-10^\circ/c} = \arcsin \frac{\left[(N_{uki}^{-10^\circ/c})_Y - (f_{\text{дрuki}})_Y \cdot T_Y^{-10^\circ/c} \right] \cdot (\bar{K}_M^{\omega_\xi})_{uki}}{T_Y^{-10^\circ/c} \cdot \omega_Y^{-10^\circ/c} \cdot (-\cos \beta_{uki})}, \quad (12)$$

где $(N_{uki}^{+10^\circ/c})_Y, (N_{uki}^{-10^\circ/c})_Y$ – количество информационных импульсов на выходе ИК; $T_Y^{+10^\circ/c}, T_Y^{-10^\circ/c}$, с – время разворота платформы поворотного стенда на заданный угол; $(f_{\text{дрuki}})_Y$ Гц – частота, соответствующая систематической составляющей нулевого сигнала; $\omega_Y^{+10^\circ/c}, \omega_Y^{-10^\circ/c}$, "/с – фактические значения угловых скоростей.

Контроль БИЛУ осуществляется путем измерения проекций вектора ускорения силы тяжести при установке прибора в положения с различными ориентациями в зависимости от измеряемого параметра. Проверки проводятся на двух кронштейнах при температурах 25°C, 0°C и 40°C. Кронштейн №1 закреплен в оптической делительной головке (ОДГ) и предназначен для установки прибора в положения, ориентированные на любые углы. Кронштейн №2 предназначен для точностных испытаний прибора с применением комплексного параметра. Примеры установки БИЛУ приведены на рис. 6–9.

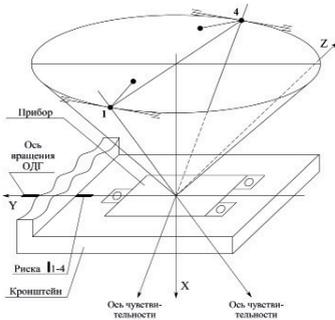


Рис. 6. Кронштейн №1 (установка пары каналов 1 и 4)

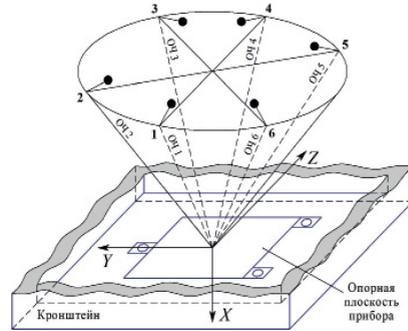


Рис. 7. Кронштейн №2 (пример установки в положение X)

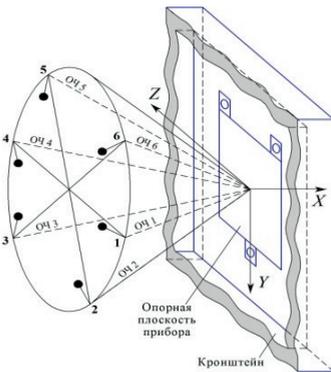


Рис. 8. Кронштейн №2 (пример установки в положение Y)

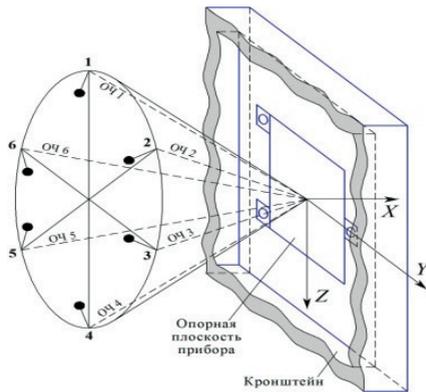


Рис. 9. Кронштейн №2 (пример установки в положение Z)

Контроль параметров прибора осуществляется последовательно для каждой пары ИК: 1–4, 2–5, 3–6. Так как БИЛУ имеет неортогональную ориентацию ОЧ, то геометрия расположения ИК в корпусе блока при установке, например, канала №1 в положение для замера систематической составляющей нулевого сигнала позволяет одновременно измерить масштабный коэффициент другого канала, в данном случае №4. За счет этого значительно уменьшается время проведения испытаний и увеличивается объем накопленной информации, что повышает качество контроля параметров БЧЭ. Методика и примеры оценки погрешности измерения вектора ускорения силы тяжести с применением комплексного параметра будут рассмотрены в следующем разделе.

Алгоритм контроля блока измерителей линейного ускорения на примере БИЛУ включает расчет следующих параметров.

1. Масштабный коэффициент n -го ИК при действии ускорения силы тяжести $1g$ в i -м запуске:

$$(K'_m)_{ni} = \frac{1 \cdot g}{(f_{1g}^{10\text{мин}})_{ni}}, \text{ г/Гц}, \quad (13)$$

где $(f_{1g}^{10\text{мин}})_{ni}$, Гц – частота на выходе ИК за 10 мин при линейном ускорении $1g$.

2. Систематическая составляющая нулевого сигнала ИК за 10 мин (вводится в память бортовой ЭВМ):

$$(g_T)_{ni} = (K'_m)_{ni} \cdot (f_T^{10\text{мин}})_{ni}, \text{ г}, \quad (14)$$

где $(f_T^{10\text{мин}})_{ni}$, Гц – частота на выходе прибора, определяющая величину систематической составляющей нулевого сигнала за 10 мин.

3. Погрешность угла наклона ОЧ ИК к опорной плоскости БИЛУ:

$$\Delta\beta_{ni} = (K'_m)_{ni} \cdot (f_{\beta}^{10\text{мин}})_{ni}, \text{ рад}, \quad (15)$$

где $(f_{\beta}^{10\text{мин}})_{ni}$, Гц – частота на выходе прибора, определяющая погрешность угла наклона ОЧ ИК к опорной плоскости за 10 мин.

4. Угол наклона ОЧ ИК к опорной плоскости БИЛУ β_n , погрешность угла $\Delta\beta_n$ переведена в "...'" (вводится в память бортовой ЭВМ):

$$\beta_n = 35^\circ 15' 52'' + \Delta\beta_n, \dots^\circ \dots' \dots''. \quad (16)$$

5. МК сигнала n -го измерительного канала прибора в i -м запуске для каждого значения действующего линейного ускорения $\xi_k \cdot g$ ($1,00 \cdot g$, $0,94 \cdot g$, $0,57 \cdot g$, $0,33 \cdot g$) положительного и отрицательного направлений:

$$(K_M^{\xi_k})_{ni} = \frac{\xi_k \cdot g}{(f_{K_M^{\xi_k \cdot g}})_{ni}}, \text{ мм/с-бит}, \quad (17)$$

где $(f_{K_M^{\xi_k \cdot g}})_{ni}$, Гц – частота, на выходе ИК за 10 мин при фактическом значении линейного ускорения $\xi_k \cdot g$; g – ускорение силы тяжести для места контроля параметров прибора, мм/с².

6. Среднее значение МК ИК прибора во всем диапазоне измерений линейных ускорений (вводится в память бортовой ЭВМ):

$$(\bar{K}_M)_n = \frac{\sum_{k=1}^8 (K_M^{\pm \xi_k \cdot g})_n \cdot (\xi_k \cdot g)^2}{\sum_{k=1}^8 (\xi_k \cdot g)^2}, \text{ мм/с-бит}. \quad (18)$$

7. Случайное отклонение МК ИК прибора от запуска к запуску:

$$(\Delta K'_m)_n = \frac{(K'_m)_{ni \text{ max}} - (K'_m)_n}{(K'_m)_n} \cdot 100, \%, \quad (19)$$

где $(K'_m)_{ni \text{ max}}$, мм/с-бит – МК ИК прибора, максимально отличающийся от его средней величины по трем запускам; $(K'_m)_n$, мм/с-бит – среднее значение технологического МК ИК по трем запускам.

8. Случайная составляющая нулевого сигнала ИК от запуска к запуску:

$$(\Delta g_T)_n = (g_T)_{ni \text{ max}} - (g_T)_{ni}, \text{ г}, \quad (20)$$

где $(g_T)_{ni \max}$ – систематическая составляющая нулевого ИК в запуске, максимально отличающаяся от среднего значения по трем запускам.

9. Погрешность угла α_n , определяющая положение ОЧ ИК по образующей конуса в приборе:

$$\Delta\alpha_{nj} = (K'_m)_{ni} \cdot (f_{\alpha}^{10min})_{nj} \cdot \frac{1}{\cos\beta_n}, \text{ рад}, \quad (21)$$

где $(f_{\alpha}^{10min})_{nj}$ Гц – частота информационного сигнала, которая соответствует значению погрешности угла α_n за 10 мин.

10. Значения углов $\alpha_n, \dots, \alpha_n$, определяющих положение ОЧ n -го ИК (погрешность $\Delta\alpha_n$ переведена в \dots') (вводится в память бортовой ЭВМ):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0^\circ 00' 00'' \pm \Delta\alpha_1; & \alpha_2 &= 60^\circ 00' 00'' \pm \Delta\alpha_2; \\ \alpha_3 &= 120^\circ 00' 00'' \pm \Delta\alpha_3; & \alpha_4 &= 180^\circ 00' 00'' \pm \Delta\alpha_4; \\ \alpha_5 &= 240^\circ 00' 00'' \pm \Delta\alpha_5; & \alpha_6 &= 300^\circ 00' 00'' \pm \Delta\alpha_6. \end{aligned} \quad (22)$$

Для наземных испытаний изготавливаются специальные образцы разработанных приборов. На этом этапе строится методика и создается специализированное ПМО для контроля параметров ИУС и ИКУ. В связи с неортогональной ориентацией ОЧ каждый измеритель необходимо ориентировать так, чтобы его ОЧ занимала строго определенное положение относительно вектора угловой скорости вращения Земли или вектора ускорения силы тяжести.

Кратко опишем ПМО, предназначенное для специальных испытаний ИУС-М и БИЛУ в условиях производства, его схема приведена на рис. 10.

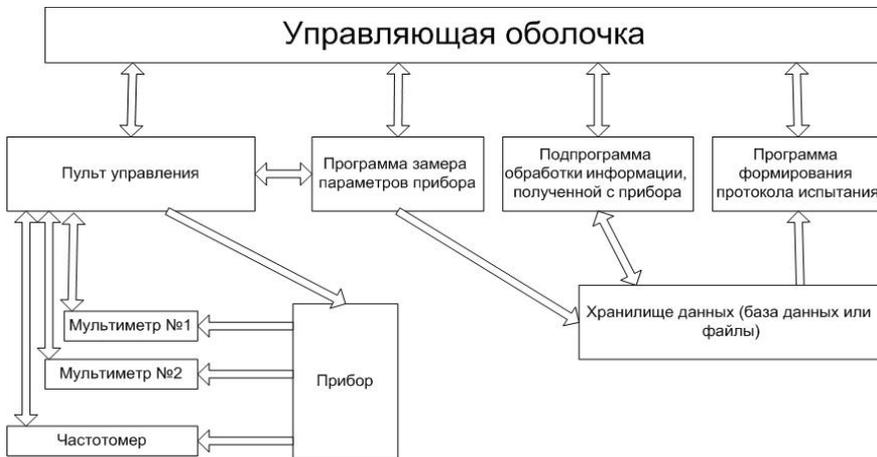


Рис. 10. Схема ПМО для специальных испытаний в условиях производства

Принципы функционирования ПМО рассмотрены в ряде публикаций [23–28]. За работой ПМО в автоматическом режиме следит основная программа – управляющая оболочка, контролирующая весь процесс испытаний БЧЭ. Она получает данные и команды от оператора и в соответствии с ними выстраивает работу ПМО, на каждом этапе которой вычисляется какая-либо характеристика прибора, заносимая в итоговый протокол испытаний и выводимая на печатающее устройство. Выдача команд на

исполнительные устройства осуществляется с помощью подпрограммы. Программа для съема информации замеряет параметры БЧЭ и записывает полученные результаты в базу данных. Далее с помощью модуля обработки информации рассчитываются характеристики прибора.

При помощи разработанного ПМО проводится проверка параметров прибора до и после летных испытаний [14, 15, 27, 28].

Введение комплексного параметра для оперативного высокоточного контроля приборов

В разделе доказывается необходимость введения комплексного параметра для контроля БЧЭ в условиях производства и на входном контроле перед установкой в СУ КК. Предложена методика проверки комплексного параметра, обосновывается величина его допуска, а также рассматриваются методы вывода матрицы направляющих косинусов (МНК) и формирования псевдообратной матрицы.

В бортовую ЭВМ СУ КК вносятся параметры для каждого ИК БЧЭ. Например, при изготовлении БИЛУ получают значения МК, систематической составляющей нулевого сигнала и двух углов ориентации ОЧ относительно осей базовой системы координат, записывают их в формуляр и используют далее для расчета комплексного параметра и сохраняют в памяти бортовой ЭВМ. Таким образом, для шестиосного БЧЭ формируется 24 параметра. Определение каждого из них на предприятии-изготовителе требует больших временных затрат и сложного оборудования, обеспечивающего заданную точность измерения. Входной контроль такого измерителя перед установкой на объект также является сложной и ответственной задачей, поскольку нужно проверить данные формуляра, вносимые в память бортовой ЭВМ. Введение комплексного параметра позволяет обеспечить соответствие фактических значений параметров, вносимых в формуляр прибора, установленным допускам, поскольку в нем учтены погрешности всех 24-х параметров, а в качестве эталонного значения используется модуль вектора ускорения силы тяжести, измеренный с высокой точностью в месте проведения испытаний. Оперативность контроля улучшается за счет исключения проверки параметров каждого ИК в отдельности.

Объясним физический смысл комплексного параметра. БИЛУ устанавливается последовательно в три взаимно ортогональные положения (рис. 7–9), при которых каждая из трех базовых осей X , Y , Z поочередно ориентируется вдоль вертикали места. В каждом положении измеряется выходная информация 6 ИК, при этом необходимо знать их направляющие косинусы относительно оси X (либо Y , Z). В результате можно восстановить величину ускорения силы тяжести в месте контроля, а также рассчитать погрешность ее измерения. Отличие восстановленного значения от известного и будем называть комплексным параметром. Аналогичная методика используется для проверки ИУС-М, где за эталонное значение принимается вертикальная составляющая угловой скорости вращения Земли. Таким образом, комплексный параметр – это относительная погрешность измерения либо вектора ускорения свободного падения, либо вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли в точке контроля.

Рассмотрим методику контроля комплексного параметра избыточного БЧЭ на примере в ИУС-М и БИЛУ. Блок-схема его расчета показана на рис. 11.

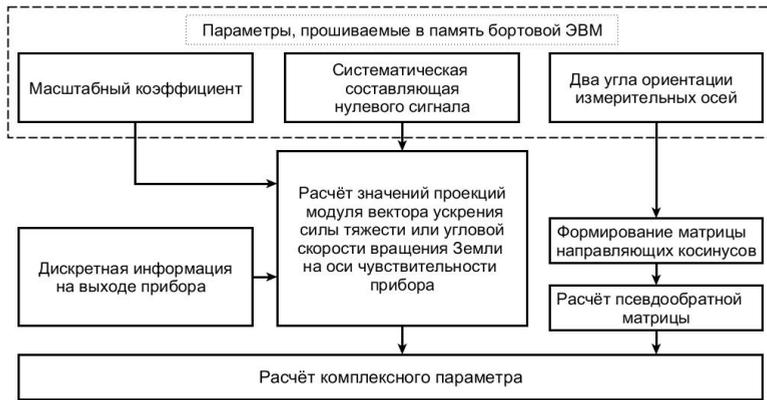


Рис. 11. Блок-схема расчета комплексного параметра

При помощи эйлеровых разворотов рассчитывается МНК A , определяющая связь между осями чувствительности ИЧЭ и ортогональной системой координат, связанной с корпусом прибора:

$$A = \begin{bmatrix} \sin\beta_1 & -\cos\beta_1 \cdot \sin\alpha_1 & \cos\beta_1 \cdot \cos\alpha_1 \\ \sin\beta_2 & -\cos\beta_2 \cdot \sin\alpha_2 & \cos\beta_2 \cdot \cos\alpha_2 \\ \sin\beta_3 & -\cos\beta_3 \cdot \sin\alpha_3 & \cos\beta_3 \cdot \cos\alpha_3 \\ \sin\beta_4 & -\cos\beta_4 \cdot \sin\alpha_4 & \cos\beta_4 \cdot \cos\alpha_4 \\ \sin\beta_5 & -\cos\beta_5 \cdot \sin\alpha_5 & \cos\beta_5 \cdot \cos\alpha_5 \\ \sin\beta_6 & -\cos\beta_6 \cdot \sin\alpha_6 & \cos\beta_6 \cdot \cos\alpha_6 \end{bmatrix}$$

МНК БИЛУ

МНК ИУС отличается от приведенной выше матрицы тем, что в первом столбце в четных строках перед функцией \sin стоит знак « \rightarrow » из-за встречной ориентации осей двух троек ИЧЭ.

Углы ориентации измерительных осей относительно базовых координат составляют:

$$\beta_i = 35^\circ 15'52'', \alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 60^\circ, \alpha_3 = 120^\circ, \alpha_4 = 180^\circ, \alpha_5 = 240^\circ, \alpha_6 = 300^\circ.$$

Далее рассчитывается псевдообратная матрица M :

$$M = (A^T A)^{-1} A^T. \quad (23)$$

Комплексный параметр, измеряемый в процентах (%), для трех положений прибора ИУС-М – X , Y и Z – относительно базовой системы координат имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_X &= \frac{[m_{11} \cdot \omega_{X1} + m_{12} \cdot \omega_{X2} + m_{13} \cdot \omega_{X3} + m_{14} \cdot \omega_{X4} + m_{15} \cdot \omega_{X5} + m_{16} \cdot \omega_{X6}] - \omega_{Земли} \cdot \sin(\varphi)}{\omega_{Земли} \cdot \sin(\varphi)} \cdot 100, \\ \Delta\omega_Y &= \frac{[m_{21} \cdot \omega_{Y1} + m_{22} \cdot \omega_{Y2} + m_{23} \cdot \omega_{Y3} + m_{24} \cdot \omega_{Y4} + m_{25} \cdot \omega_{Y5} + m_{26} \cdot \omega_{Y6}] - \omega_{Земли} \cdot \sin(\varphi)}{\omega_{Земли} \cdot \sin(\varphi)} \cdot 100, \quad (24) \\ \Delta\omega_Z &= \frac{[m_{31} \cdot \omega_{Z1} + m_{32} \cdot \omega_{Z2} + m_{33} \cdot \omega_{Z3} + m_{34} \cdot \omega_{Z4} + m_{35} \cdot \omega_{Z5} + m_{36} \cdot \omega_{Z6}] - \omega_{Земли} \cdot \sin(\varphi)}{\omega_{Земли} \cdot \sin(\varphi)} \cdot 100. \end{aligned}$$

где $\omega_{Земли}$ – угловая скорость вращения Земли в месте контроля параметров прибора; φ – широта места контроля параметров прибора; m – элементы псевдообратной матрицы M ; ω_{Xi} , ω_{Yi} , ω_{Zi} – проекция вектора угловой скорости вращения Земли на i -ю измерительную ось прибора при установке в положение X , Y и Z соответственно, где для положения X

$$\omega_{xi} = (f_{ик\ xi}^{Земли} - f_{др\ ики}) \cdot (\bar{K}_M)_{ик\ i}, \quad (25)$$

Здесь $f_{ик\ xi}^{Земли}$ – измеренное значение проекции вектора угловой скорости Земли на i -ю измерительную ось прибора при установке в положение X , Гц; $f_{др\ ики}$ – систематическая составляющая нулевого сигнала, Гц; $(\bar{K}_M)_{ик\ i}$ – масштабный коэффициент, "/бит.

Аналогично производится расчет для положений Y и Z .

Комплексный параметр для положений БИЛУ X , Y и Z относительно базовой системы координат (%) имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta g_x &= \frac{(m_{11}g_{x1} + m_{12}g_{x2} + m_{13}g_{x3} + m_{14}g_{x4} + m_{15}g_{x5} + m_{16}g_{x6}) - g}{g} \cdot 100, \\ \delta g_y &= \frac{(m_{21}g_{y1} + m_{22}g_{y2} + m_{23}g_{y3} + m_{24}g_{y4} + m_{25}g_{y5} + m_{26}g_{y6}) - g}{g} \cdot 100, \\ \delta g_z &= \frac{(m_{31}g_{z1} + m_{32}g_{z2} + m_{33}g_{z3} + m_{34}g_{z4} + m_{35}g_{z5} + m_{36}g_{z6}) - g}{g} \cdot 100, \end{aligned} \quad (26)$$

где g – ускорение силы тяжести в месте контроля параметров прибора; m – элементы псевдообратной матрицы M ; g_{xi} , g_{yi} , g_{zi} – проекция вектора ускорения силы тяжести на i -ю измерительную ось при установке в положение X , Y и Z соответственно, при этом для положения X

$$g_{xi} = (f_{xi} - f_{Ti}^{10\ мин}) \cdot \frac{\bar{K}_{mn}}{g}, \quad (27)$$

Здесь f_{xi} – проекция вектора ускорения силы тяжести на i -ю измерительную ось прибора при установке в положение X , Гц; $f_{Ti}^{10\ мин}$ – систематическая составляющая нулевого сигнала, Гц; \bar{K}_{mn} – среднее значение МК i -го ИК во всем диапазоне измерения линейных ускорений, мм/с·бит; g – ускорение силы тяжести в месте, где проводятся испытания прибора, мм/с².

Аналогично производим расчет для положений Y и Z .

Следует заметить, что контроль вертикальной составляющей измеряемого вектора в трех положениях блока является достаточным для оценки качества всех шести датчиков, если выполняются следующие условия:

- по окончании стендовой калибровки блоков может измениться только один из параметров датчиков (в данном случае смещение нуля), а вероятность изменения других параметров близка к нулю;
- параметр может измениться не более чем у трех датчиков из шести (по числу положений для комплексного параметра).

Формирование допуска на комплексный параметр

Формирование допуска на комплексный параметр осуществляется на этапе проектирования. Исходными данными являются параметры, заданные формуляром на прибор, которые впоследствии вносятся в память бортовой ЭВМ. Комплексный параметр не используется в системе управления, он нужен для эффективного входного контроля. Необходимо гарантировать, что если комплексный параметр БЧЭ соответствует норме, то все формулярные значения не превышают допуск на их времен-

ную стабильность, заданную в ТЗ. Требования к временной стабильности обычно на один или два порядка превышают допуск на сам параметр. Например, если допуск на величину систематической составляющей нулевого сигнала БИЛУ составляет 0,002 г, то допуск на временную стабильность – 0,0001 г. Допуск на комплексный параметр на этапе проектирования необходимо выбирать таким образом, чтобы все заданные в формуляре параметры не только не выходили за установленные пределы, но и соответствовали требованиям, предъявляемым к временной стабильности. Иными словами, фактическое значение параметра не должно отклоняться от формулярного более чем на величину допуска на его временную стабильность. При этом значения допуска на комплексный параметр должны быть достижимыми на практике. Ввиду этого в случае БИЛУ практическое применение получил метод выбора из всех параметров, входящих в комплексный, параметра, тяготеющего к наибольшей временной нестабильности. Анализ статистических данных по результатам изготовления как ИУС, так и ИКУ показывает, что наибольшей временной нестабильностью характеризуется систематическая составляющая нулевого сигнала первичных измерителей. Например, стабильность нулевого сигнала КМА обусловлена нестабильностью моментов тяжения, которые имеют механическую и электрическую природу. Масштабный коэффициент КМА обладает высокой временной стабильностью, так как зависит только от стабильности магнитоэлектрической системы. Углы ориентации измерительных осей определяются точностью изготовления деталей конструкции, их временная стабильность очень высокая.

На примере КМА оценим погрешность его МК на основании аттестации прибора, проведенной во ВНИИМ имени Д.И. Менделеева [11, 12], и покажем, что это достаточно стабильная во времени малая величина.

Как известно, МК ИК БИЛУ – это коэффициент пропорциональности между количеством импульсов выходной информации и приращением линейной скорости либо между частотой следования импульсов выходной информации и кажущимся ускорением, измеряемым акселерометром. Стабильность во времени и линейность МК ИК БИЛУ определяется стабильностью и линейностью МК КМА и преобразователя «напряжение–частота».

Математическая модель выходного сигнала КМА, произведенного ПО «Корпус», исследовалась во ВНИИМ им. Д.И. Менделеева в процессе аттестации акселерометра в качестве рабочего эталона. Исследования проводились на установках ЭУП-3 и ДЦ-3, входящих в состав государственного эталона первого рода ГЭТ 94-01.

Методика аттестации заключалась в следующем [11, 12]. Выходной сигнал $U_{вых}$ акселерометра в функции от измеряемого кажущегося ускорения описывается математической моделью вида

$$U_{вых} = K_m \cdot (K_0 + a_{ex} + K^2 \cdot a_{ex}^2 + K^3 \cdot a_{ex}^3 + K_{exom} \cdot a_{ex} \cdot a_{om} + K_{exon} \cdot a_{ex} \cdot a_{on} + \delta_0 \cdot a_{on} + \delta_1 \cdot a_{om}), \quad (28)$$

где K_m – МК акселерометра; K_0 – смещение нуля выходного сигнала; a_{ex} – измеряемое кажущееся ускорение, действующее вдоль измерительной оси акселерометра; K^2 – нелинейный коэффициент второго порядка; K^3 – нелинейный коэффициент третьего порядка; K_{exom} – коэффициент перекрестной связи между ускорениями, действующими в направлениях измерительной оси и оси маятника; K_{exon} – коэффициент перекрестной связи между ускорениями, действующими в направлениях измерительной оси и оси

подвеса маятника; $a_{ом}$ – ускорение, действующее в направлении оси маятника; $a_{он}$ – ускорение, действующее в направлении оси подвеса маятника; δ_0 – коэффициент поперечной чувствительности акселерометра в направлении оси маятника; δ_1 – коэффициент поперечной чувствительности акселерометра в направлении оси подвеса маятника.

В результате аттестации были получены следующие значения коэффициентов математической модели (28):

$$K_{.м} = 0,10709 \frac{В \cdot c^2}{м}, K_0 = -0,013 \frac{м}{c^2}, \delta_0 = 2 \cdot 10^{-5}, \delta_1 = 1 \cdot 10^{-4},$$

$$K^2 = 4 \cdot 10^{-6} \frac{c^2}{м}, K^3 = 0, K_{вхон} = 1 \cdot 10^{-5} \frac{c^2}{м}, K_{вхон} = 6,5 \cdot 10^{-6} \frac{c^2}{м}.$$

Отсюда следует, что данный акселерометр обладает высокой степенью линейности коэффициента пропорциональности между выходным напряжением и измеряемым кажущимся ускорением, комплексная оценка нелинейности этой характеристики – 0,005%. Высокую линейность и стабильность во времени МК акселерометра обеспечивают методы технологического процесса изготовления акселерометра, позволяющие устранить остаточные напряжения в кварцевой пластине акселерометра и обеспечивающие равномерность рабочего зазора в датчике момента и стабильность величины магнитной индукции в рабочем зазоре.

Для лучшего понимания проблемы контроля параметров БЧЭ с неортогональной ориентацией измерительных осей и необходимости введения комплексного параметра следует отметить следующий характерный момент.

При построении БИНС статические погрешности любого первичного измерителя в БЧЭ как с ортогональной, так и с неортогональной ориентацией ОЧ определяются разработчиком СУ и выдаются в ТЗ на ИЧЭ. Если статические характеристики ИЧЭ по каким-либо причинам не удовлетворяют разработчика СУ, то необходимо выбирать иной ИЧЭ для использования в системе. К примеру, статические характеристики поплавковых ДУС для ИУС-М остались точно такими же, как и в приборах с ортогональной ориентацией ОЧ, до сих пор применяемых в СУ КК «Союз» и «Прогресс», но при входном контроле в случае ортогональной ориентации ОЧ ДУС комплексный параметр не требуется.

Следовательно, чтобы задать допуск на комплексный параметр на этапе проектирования прибора, рекомендуется следующая методика:

- 1) установить значения систематической составляющей нулевого сигнала каждого ИК БЧЭ в пределах его допустимой временной нестабильности;
- 2) с помощью специального ПМО рассчитать массив значений комплексного параметра;
- 3) выбрать в качестве допуска наибольшее из полученных значений.

В результате применения предложенной методики к ИУС-М и БИЛУ полученный допуск на комплексный параметр составил 0,05%.

Таким образом, введение комплексного параметра приводит к следующим практическим результатам:

- 1) существенно повышается оперативность и качество контроля БЧЭ,
- 2) появляется возможность получить больше информации при меньших затратах времени на контроль прибора перед установкой в СУ КК: вместо одной недели 3 часа;

3) упрощается и удешевляется входной контроль прибора за счет отказа от сложного оборудования.

Результаты экспериментальной проверки разработанной методики

Приведены результаты экспериментальной проверки методики контроля параметров БЧЭ при помощи ПМО, реализованного на производстве. ИУС-М изготовлен в ПО «Корпус» в единственном экземпляре по ТЗ РКК «Энергия» в 2006 году. Прибор прошел все виды испытаний и должен был прийти на смену трехкомпонентному измерителю угловых скоростей, которым оснащена СУ КК «Союз». Тем не менее ввиду сложившейся на тот момент экономической ситуации предприятие-потребитель не сделало заказ на серийное производство этого прибора [4]. Выпуск БИЛУ освоен на предприятии в рамках модернизации транспортной системы по программе МКС. Приведенные ниже экспериментальные данные получены в ходе проверки отдельных образцов приборов, выполненной по описанной выше методике, и апробированы как при изготовлении приборов, так и на входном контроле с использованием комплексного параметра.

Ниже представлены результаты экспериментальной проверки БИЛУ-М до и после летных испытаний. Исследования проводились по трем направлениям. Первое – статистическая обработка основных параметров КМА в составе ИК БИЛУ (табл. 1–3).

Таблица 1

Систематическая составляющая нулевого сигнала, g

| | |
|--|-------------------------------|
| Допуск | $\pm 0,002$ |
| Математическое ожидание M | 0,00000845 |
| Среднеквадратическое отклонение σ | 0,00009787 |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,00028517 \div 0,00030206$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,00018730 \div 0,00020419$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,0000894 \div 0,00010632$ |

Таблица 2

Масштабный коэффициент, мм/с·бит

| | |
|--|--------------------------------|
| Допуск | $4,00000000 \pm 0,014$ |
| Математическое ожидание M | 4,000283194 |
| Среднеквадратическое отклонение σ | 0,000369115 |
| $M \pm 3\sigma$ | $3,999175849 \div 4,001390539$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $3,999544964 \div 4,001021424$ |
| $M \pm \sigma$ | $3,999914079 \div 4,000652309$ |

Таблица 3

Комплексный параметр, %

| | |
|--|------------------------|
| Допуск | $\pm 0,050$ |
| Математическое ожидание M | $-0,012$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | 0,0036 |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,0228 \div -0,0013$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,0192 \div -0,0049$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,0156 \div -0,0085$ |

Второе – анализ сохраняемости параметров измерительного канала БИЛУ после летных испытаний по отношению к формулярным значениям (табл. 4–6).

Таблица 4

Изменение систематической составляющей нулевого сигнала
после летных испытаний по отношению к формулярному значению, g

| | |
|--|---------------------------------|
| Допуск | $\pm 0,002$ |
| Математическое ожидание M | $-0,000101493$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | $0,000264737$ |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,000895702 \div 0,000692717$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,000630966 \div 0,000427981$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,000366229 \div 0,000163244$ |

Таблица 5

Изменение масштабного коэффициента после летных испытаний
по отношению к формулярному значению, %

| | |
|--|---------------------------------|
| Допуск | $\pm 0,02$ |
| Математическое ожидание M | $-0,000729188$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | $0,002894551$ |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,009412842 \div 0,007954467$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,00651829 \div 0,005059915$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,003623739 \div 0,002165364$ |

Таблица 6

Изменение комплексного параметра после летных испытаний
по отношению к формулярному значению, %

| | |
|--|---------------------------|
| Допуск | $\pm 0,05$ |
| Математическое ожидание M | $-0,0003$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | $0,001$ |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,003854 \div 0,003254$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,002669 \div 0,002069$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,001484 \div 0,000885$ |

Исследования проводились на одном БИЛУ, возвращенном на предприятие после летных испытаний в составе СУ космического корабля «Союз МС-14» №743.

Третье направление – статистическая обработка значений параметров партии БИЛУ в количестве 28 шт., изготовленных в ПО «Корпус» в 2018–2022 гг. (табл. 7–9).

Таблица 7

Систематическая составляющая нулевого сигнала, g

| | |
|--|-------------------------------|
| Допуск | $\pm 0,00200000$ |
| Математическое ожидание M | $0,00002962$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | $0,00017091$ |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,00054236 \div 0,00048312$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,00037145 \div 0,00031221$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,00020054 \div 0,00014129$ |

Таблица 8

Масштабный коэффициент, мм/с·бит

| | |
|--|------------------------------|
| Допуск | $4,00000000 \pm 0,014$ |
| Математическое ожидание M | $3,99924445$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | $0,00093878$ |
| $M \pm 3\sigma$ | $3,99642811 \div 4,00206078$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $3,99736689 \div 4,00112201$ |
| $M \pm \sigma$ | $3,99830567 \div 4,00018322$ |

Таблица 9

Комплексный параметр, %

| | |
|--|------------------------|
| Допуск | $\pm 0,050$ |
| Математическое ожидание M | $-0,014$ |
| Среднеквадратическое отклонение σ | $0,0086$ |
| $M \pm 3\sigma$ | $-0,0271 \div -0,0243$ |
| $M \pm 2\sigma$ | $-0,0185 \div -0,0158$ |
| $M \pm \sigma$ | $-0,0100 \div -0,0072$ |

Итоги практического внедрения БИЛУ и БИЛУ-М таковы: всего поставлено в РКК «Энергия» 86 приборов (516 измерительных каналов) для космических кораблей «Союз-ТМА», «Союз-МС» и «Прогресс-МС». В табл. 10 приводятся последние значения комплексного параметра, полученные для КК типа «Союз-МС», в которых был применен БИЛУ-М с цифровой системой управления КМА в каждом измерительном канале.

Таблица 10

Значения комплексного параметра приборов БИЛУ, полученные на входном контроле в РКК «Энергия» перед установкой на борт КК №743–749

| КК № | 743 | 744 | 745 | 746 | 747 | 748 | 749 |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Комплексный параметр (X), % | 0,008 | 0,015 | 0,001 | 0,011 | 0,008 | 0,029 | 0,003 |
| Комплексный параметр (Y), % | 0,023 | 0,028 | 0,011 | 0,015 | 0,003 | 0,026 | 0,002 |
| Комплексный параметр (Z), % | 0,021 | 0,031 | 0,007 | 0,009 | 0,01 | 0,017 | 0,01 |

Таким образом, использование разработанной методики позволило значительно повысить качество и надежность избыточных БЧЭ, что подтверждают результаты практического внедрения БИЛУ.

Заключение

Описанные в статье экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Разработана методика контроля блоков ИУС и ИКУ с неортогональной ориентацией ОЧ датчиков, основанная на формировании комплексного параметра, представляющего собой относительную погрешность вертикальной составляющей измеряемого вектора. Контроль комплексного параметра в трех ориентациях блоков позволяет гарантировать соответствие установленным допускам всех параметров БЧЭ, заданных в формуляре на прибор и в дальнейшем загружаемых в память бортовой ЭВМ.
2. Для реализации данной методики создано специальное ПМО для осуществления входного контроля блоков на предприятии РКК «Энергия».
3. Построена методика формирования допуска на комплексный параметр.
4. Проверка параметров прибора до и после летных испытаний при помощи созданного для этой цели ПМО подтвердила адекватность предложенных математических моделей и верность описанной методики.
5. Безотказная работа БИЛУ на 86 КК типа «Союз» и «Прогресс» за более чем 20-летний период доказывает правильность принятых технических решений и позволяет рекомендовать эту методику для внедрения в БИНС с неортогональ-

ной ориентацией измерительных осей БЧЭ на объектах любого применения, а не только ракетно-космического. За более чем 20 лет полетов не было ни одного сбоя в работе приборов, не говоря уже об отказе. Необходимо отметить, что без проверки по указанной методике на входном контроле ни один БИЛУ не был бы поставлен на борт КК «Союз» и «Прогресс», а соответственно, не смог бы выполнить поставленных перед ним задач.

Работа поддержана РФФ, грант № 22-29-00101.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алехова Е.Ю., Жбанов Ю.К., Климов Д.М.** Использование избытка осей чувствительности для повышения точности измерений // *Механика твердого тела*. № 5. 2013. С. 24–27.
2. **Бранец В.Н., Дибров Д.Н., Рыжков В.С.** Диагностика и вычисление параметров ориентации избыточных бесплатформенных навигационных систем (БИНС) // *Механика и навигация*. Материалы научной сессии, посвященной 85-летию ак. РАН А.Ю. Ишлинского. СПб, 1999. С. 22–33.
3. **Бранец В.Н., Севастьянов Н.Н., Федулов Р.В.** Лекции по теории систем ориентации, управления движением и навигации. Томск: Изд-во Томского университета, 2013. 309 с.
4. **Бранец В.Н.** Записки инженера. М.: Изд-во «РТСофт» – «Космоскоп», 2018. 592 с.
5. **Водичева Л.В.** Отказоустойчивый бесплатформенный инерциальный измерительный блок: пути оптимизации // *Сборник материалов VIII Санкт-Петербургской МКИНС*. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2001. С. 85–87.
6. **Водичева Л.В.** Повышение надежности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерений // *Гирскопия и навигация*. 1997. №1. С. 55–67.
7. **Водичева Л.В., Бельский Л.Н., Парышева Ю.В., Лысцов А.А.** Инерциальные измерительные блоки перспективных изделий ракетно-космической техники: обеспечение отказоустойчивости // *Вестник Самарского университета*. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17. № 1. С. 28–44.
8. **Епифанов А.Д.** Избыточные системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
9. **Епифанов А.Д.** Основы проектирования систем управления летательными аппаратами. Надежность систем управления. М.: Машиностроение, 1975.
10. **Измайлов Е.А.** Современные тенденции развития технологий инерциальных чувствительных элементов и систем летательных аппаратов // *Труды ФГУП «НПЦАП»*. Системы и приборы управления. 2010. №1. С. 30–43.
11. **Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Нахов С.Ф.** Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления. Саратов: Изд-во СГТУ им. Гагарина Ю.А., 2021. 240 с.
12. **Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Полушкин А.В., Нахов С.Ф., Бранец В.М., Рыжков В.Н., Дибров Д.Н.** Методика аттестации блока измерения линейного ускорения с неортогональной ориентацией осей чувствительности шести кварцевых маятниковых акселерометров и методика аттестации рабочих мест для контроля блока и акселерометров // *Сборник материалов XIII Санкт-Петербургской МКИНС*. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006.
13. **Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В., Ермаков Р.В., Нахов С.Ф.** Возможность построения миниатюрных блоков измерителей угловых скоростей повышенной надежности для космических объектов на базе поплавковых ДУС с использованием современной элементной базы // *Материалы XIV Санкт-Петербургской МКИНС*. ЦНИИ «Электроприбор», 2007. С. 29–37.
14. **Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Депутатова Е.А., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Лутченко А.В., Нахов С.Ф., Кожевников В.Е., Самитов Р.М.** Результаты летных испытаний шестисносного блока измерителей кажущегося ускорения на основе прецизионного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью в составе космического корабля «Союз МС-14» // *XXVII Санкт-Петербургской МКИНС*. : ЦНИИ «Электроприбор», 2020. С. 184–187.

15. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Николаенко А.Ю., Гнусарёв Д.С. Шестиосный блок акселерометров для КК «Союз» и «Прогресс». История развития: от аналоговой системы управления измерительным каналом к цифровой // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. Вып. 8. С. 83–106.
16. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 315 с.
17. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
18. Окоёмов Б.Н. Принципы проектирования гироскопических систем по критерию надежности. М.: Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1985. 50 с.
19. Пельпор Д.С. Гироскопические системы / в 3 т. М.: Высшая школа, 1986.
20. Пельпор Д.С., Михалёв И.А., Бауман В.А. Гироскопические приборы и системы. М.: Высшая школа, 1988. 424 с.
21. Пешехонов В.Г. Современная автономная навигация. Проблемы и перспективы // Механика и навигация. СПб., 1999. 13 с.
22. Ривкин Б.С. Аналитический обзор состояния исследований и разработок в области навигации за рубежом. Выпуски 1–4. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2017–2019.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017614200 Российская Федерация. Программа для проверки параметров измерителя угловых скоростей / В.А. Туркин, С.Ф. Нахов, А.А. Акмаев; заявитель и правообладатель ФГУП «НПЦАП». – № 2016663547; заявл. 12.12.2016; опубл. 07.04.2017. – 1 с.
24. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ 2017662856 Российская Федерация. Программа для проверки параметров блока измерителей угловых скоростей / В.А. Туркин, С.Ф. Нахов, А.А. Акмаев; заявитель и правообладатель ФГУП «НПЦАП». – № 2017619489; заявл. 12.09.2017; опубл. 17.11.2017. – 1 с.
25. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018661928 Российская Федерация. Программа тестирования электронных блоков контрольно-испытательной аппаратуры / В.А. Туркин, А.А. Акмаев, С.Ф. Нахов; заявитель и правообладатель ФГУП «НПЦАП». – №2018618887; заявл. 20.08.2018; опубл. 21.09.2018. Бюл. №10. – 1 с.
26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018663845 Российская Федерация. Программа для проверки параметров блока измерителей линейных ускорений / В.А. Туркин, А.А. Акмаев, С.Ф. Нахов; заявитель и правообладатель ФГУП «НПЦАП». – №2018661045; заявл. 12.10.2018; опубл. 06.11.2018. – 1 с.
27. Туркин В.А. Результаты разработки методики контроля блоков чувствительных элементов для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 2. С. 257–264.
28. Туркин В.А. Применение математического моделирования при разработке методики проектирования блоков чувствительных элементов для БИНС с неортогональной ориентацией измерительных осей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 4. С. 326–334.
29. Цуцаева Т.В. Разработка конфигурации бесплатформенного инерциального блока с избыточным количеством чувствительных элементов. 2001: [сайт]. URL: <http://www.msfu.ru/journal/comm/referat.php?ru+2> (дата обращения: 07.08.2023).

Kalikhman D.M., and Turkin V.A. (Branch of Academician Pilyugin Center - Production Association Korpus (PA Korpus), Saratov).

Techniques for Inspecting IMUs with Nonorthogonal Orientation of Their Sensitive Axes, *Гироскопия и Навигация*, 2023, vol. 31, no. 4 (123), pp. 44–63.

Abstract. The paper discusses the techniques developed for inspecting inertial measurement units (IMU) with nonorthogonal orientation of their sensitive axes and the results of their application. A methodology

was proposed as part of the development of IMUs for a strapdown inertial navigation system (SINS) during the modernization of the Soyuz-family spacecraft transport system under the International Space Station (ISS) program for six-axis units of angular rate sensors (ARS) and accelerometers with nonorthogonal orientation of their sensitive axes. The positive results of the ground and flight tests carried out aboard 86 Soyuz and Progress spacecraft from 2002 to 2023 confirmed the effectiveness of the proposed methodology.

Key words: test results, ARS unit, accelerometer unit, methodology, complex parameter, nonorthogonal orientation of sensitive axes, relative error.

Материал поступил 13.09.2023