

УДК 629.7.05

ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ. ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТКАЗОВ В ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.А. Волынцев, Б.А. Казаков, И.Е. Шустов

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ” – “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”,
Москва, Российская Федерация
e-mail: mastervoland@inbox.ru; 01@niipm.ru; shustov_igor@mail.ru

Рассмотрен гироскопический измеритель вектора угловой скорости, который разработан в НИИ ПМ на базе поплавкового гироскопа с магнитным центрированием поплавка и газодинамической опорой ротора. Измеритель применяется в системах управления космических аппаратов отечественного производства различного назначения (спутники связи, космические аппараты дистанционного зондирования Земли, научные космические аппараты). Описаны особенности функциональной и кинематической схем гироскопического измерителя. Изложены основные принципы и методы контроля работоспособности прибора в эксплуатации, а также основы методологии анализа и идентификации причин его отказов. Приведены конкретные практические примеры исследований отказов приборов при эксплуатации в составе космического аппарата с анализом особенностей их проявления, результатами поиска и подтверждения первопричин отказов и мерами по их предупреждению.

Ключевые слова: угловая ориентация, гироскопический измеритель, идентификация отказа в эксплуатации.

GYROSCOPIC ANGULAR RATE MEASUREMENT DEVICE. IN-SERVICE TROUBLESHOOTING EXPERIENCE

A.A. Volyntsev, B.A. Kazakov, I.E. Shustov

Federal State Unitary Enterprise “TsENKI”, Affiliated branch, Kuznetsov NII PM,
Moscow, Russian Federation
e-mail: mastervoland@inbox.ru; 01@niipm.ru; shustov_igor@mail.ru

The paper considers the gyroscopic device for measuring angular rates, which was designed and developed in the Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics. The device is based on the floated gyroscope with magnetic centering of a floater and a rotor gas-lubricated spin-axis bearing system. Today this gyroscopic device is used in flight controls of Russian-made spacecrafts of various applications (communications satellites, Earth remote sensing satellites, scientific space vehicles). Both functional and kinematic diagrams' features of the gyroscopic device are described. The main principles and monitoring techniques of the in-service device performance are presented. The basic troubleshooting methodology is discussed. Some real examples of in-service troubleshooting are given. They are analyzed considering their manifestation peculiarities, the study results, confirmation of the primary causes of failures, and follow-up measures to prevent the repeated failures.

Keywords: angular orientation, gyroscopic device, in-service troubleshooting.

Введение. В работе на конкретных примерах исследованы вопросы идентификации отказов измерительных каналов (ИК) гироскопического измерителя вектора угловой скорости (ГИВУС) при эксплуатации в составе космического аппарата (КА) и локализации дефектных элементов отказавших блоков.

Гироскопические измерители вектора угловой скорости — инерциальные бесплатформенные измерительные приборы, предназначенные для работы в составе системы управления ориентацией и стабилизации (СУОС) КА различного назначения, в том числе пилотируемых станций “Мир” и МКС, спутников связи, ДЗЗ, научного и прикладного назначения. Первые в России приборы типа ГИВУС были разработаны в начале 1980-х годов коллективом НИИ Прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (НИИ ПМ). Примерно за 30 лет было изготовлено более сотни образцов ГИВУС на базе чувствительных элементов разного типа: поплавковых гироскопов, динамически настраиваемых гироскопов, волоконно-оптических гироскопов. Такие приборы использовались и продолжают использоваться на орбите в составе многих КА разработки головных предприятий космической отрасли России (РКК “Энергия” им. С.П. Королёва, НПО им. С.А. Лавочкина, ИСС им. М.Ф. Решетнёва, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева и др.) [1].

В настоящее время широко применяются прецизионные ГИВУС на базе двухстепенных поплавковых гироскопов (ПГБ) с газодинамической опорой ротора гироскопа и магнитным центрированием поплавка. Основные технические характеристики последних модификаций ГИВУС на базе ПГБ представлены ниже.

Достигнутые характеристики ГИВУС позволяют обеспечивать ориентацию КА в инерциальном пространстве с ошибками не более $0,1^\circ$ и поддерживать стабильность скорости углового движения КА на уровне $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ }^\circ/\text{с}$.

Реальная эксплуатация ГИВУС подтвердила заложенные в них характеристики. Однако, вместе с положительными результатами, были выявлены проблемы, связанные с фактической надежностью приборов. Наряду с опытом безотказной непрерывной работы ГИВУС в составе различных КА более 10 лет, имели место и случаи отказов ИК приборов на более ранних этапах летной эксплуатации. Это обстоятельство вынуждает разработчика ГИВУС качественнее проводить анализ нештатных ситуаций и искать пути их предотвращения в будущем.

На примере разработанного в НИИ ПМ прибора КИНДЗ4-020 — ГИВУС на базе ПГБ — рассмотрим методологию выявления, анализа и идентификации характерных отказов в эксплуатации, исследования их первопричин и последствий на работу СУОС КА, а также реализованные технические мероприятия, направленные на предотвращение повторения отказов в разрабатываемых и изготавливаемых приборах.

Технические характеристики ГИВУС на базе ПГБ

Диапазон измерения угловой скорости, °/с	0,45...2,0
Цена бита выходной информации, угл. с	0,002...0,04
Стабильность масштабного коэффициента, %	0,001...0,005
Стабильность “нуля” выходной информации за 24 ч, °/ч	0,001...0,003
Стабильность ориентации измерительных осей, угл. с	30
Ресурс работы в космосе, лет	10...15
Вероятность безотказной работы	0,99

Прибор КИНД34-020 создан в середине 1990-х годов. Впервые применен в 1999 г. на КА связи “Ямал-102”, затем в 2000 г. на КА “Sesat” и российском модуле “Звезда” МКС. В составе этих трех КА прибор отработал 10–12 лет и подтвердил правильность принятых при его проектировании схмотехнических решений. В настоящее время прибор КИНД34-020 и его модификации, имеющие некоторые отличия в интерфейсе, эксплуатировались и продолжают эксплуатироваться в составе КА “Ямал-200”, “Экспресс-МД”, “Экспресс-АМ”, “Электро-Л”, “Спектр-Р”, спутников двойного назначения — всего около тридцати КА. В 2015 г. и последующие годы планируется запустить еще около двадцати КА с прибором КИНД34-020 на борту в качестве основного прибора системы управления ориентацией. С учетом этого приборы КИНД34-020 будут эксплуатироваться как минимум до 2030 г.

Анализ положительных результатов эксплуатации и имевших место отказов по различным причинам (низкое качество электронной компонентной базы, нерасчетное влияние факторов космического пространства и др.) позволил разработчикам НИИ ПМ внести в существующую схмотехнику и конструкцию прибора ряд доработок, направленных на повышение его качества и надежности.

Результаты исследований эксплуатации приборов КИНД34-020 были учтены и в новых разработках НИИ ПМ. В первую очередь, это относится к прецизионному ГИВУС на базе ПГБ типа КИНД34-064 класса точности на уровне лучших современных и перспективных мировых образцов [2]. Основная область применения прибора КИНД34-064 — уникальные научные аппараты для исследования дальнего космоса, первым из которых будет космический телескоп “Спектр-УФ”.

Настоящая работа представляет собой продолжение и развитие исследований работоспособности приборов ГИВУС, представленных в работе [3].

Измерительные схемы ГИВУС. Прибор конструктивно выполнен в виде моноблока и представляет собой блок чувствительных элементов — четырех поплавковых гиросблоков, окруженных платами сервис-



Рис. 1. Внешний вид ГИВУС с кожухом (а) и без кожуха (б)

ных электронных устройств (рис. 1). Кинематическая схема ГИВУС приведена на рис. 2, а, функциональная — на рис. 2, б.

Приборная система координат (ПСК) задается тремя опорами прибора. ГИВУС имеет четыре функционально независимых ИК. Выходной информацией каждого ИК является число импульсов за такт опроса, пропорциональное интегралу от проекции вектора угловой скорости основания прибора на ось чувствительности гироскопа данного ИК.

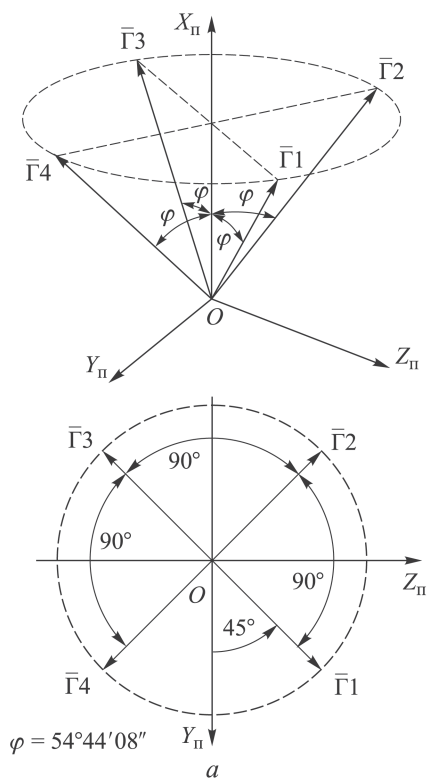


Рис. 2 (начало). Кинематическая (а) и функциональная (б) схемы ИК ГИВУС: $\bar{\Gamma}_1 - \bar{\Gamma}_4$ — оси чувствительности гироскопов

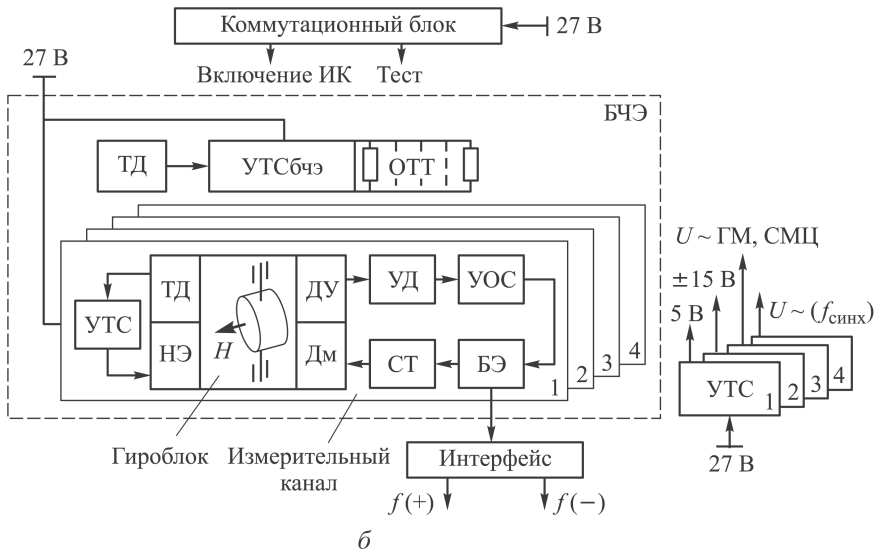


Рис. 2 (окончание). Кинематическая (а) и функциональная (б) схемы ИК ГИВУС:

ГБ — гироблок; H — кинетический момент гироскопа; ДУ — датчик угла ПГБ; УД — усилитель-дискриминатор (усиливает и преобразует сигнал с ДУ); УОС — усилитель обратной связи, обеспечивает частотную коррекцию системы обратной связи (СОС) ИК; БЭ — блок электроники, преобразующий аналоговый сигнал с УОС в ШИМ-сигнал для АЦП и управления током ДМ; СТ — стабилизатор тока, реализует принцип ШИМ-управления током ДМ ПГБ; ДМ — датчик момента ПГБ, исполнительный орган СОС ИК, компенсирует гироскопический момент по оси “поплавка” ПГБ, пропорциональный проекции измеряемой входной угловой скорости на ось чувствительности ПГБ; ВИП — источник вторичного питания; УТС — усилитель системы термостатирования; интерфейс — согласующее устройство, блок информационного интерфейса; Тест — цепи тестирования ИК; БЧЭ — блок чувствительных элементов; ТД, НЭ, ОТТ — контрольные и исполнительные элементы систем термостатирования БЧЭ и ПГБ — термодатчики, нагревательные элементы и охладители твердотельные термоэлектрические

Оси чувствительности гироскопов — измерительные оси ИК — направлены по диагоналям куба. Все четыре гироскопа работают независимо друг от друга. Представленная кинематическая схема ГИВУС имеет следующие преимущества:

- все четыре ИК равноправно участвуют в измерении полного вектора углового движения КА (как правило, три ИК образуют рабочую тройку измерителей, а один ИК постоянно находится в горячем резерве и в любой момент может заменить отказавший канал);
- кинематическая схема обеспечивает сохранение работоспособности ГИВУС при возможном отказе любого одного ИК.

Алгоритмическая диагностика четырех ИК дает возможность автономно установить факт отказа одного ИК, но не позволяет в общем случае идентифицировать отказавший ИК. Эта задача решается с привлечением информации других измерительных приборов из состава бортового комплекса управления, например астродатчиков (АД).

Во избежание нарушений в выполнении целевой задачи КА и, в крайнем случае, потери КА, задача идентификации отказавшего ИК ГИВУС должна быть решена в кратчайшие сроки для исключения его информации из обработки и замены резервным каналом.

Оценка работоспособности ИК прибора ГИВУС при эксплуатации в составе СУОС КА. Предварительно следует описать особенности взаимодействия ГИВУС с СУОС КА, обработки информации и его диагностического контроля.

Информация с выходов ИК поступает в виде сумм информационных импульсов за такт опроса, соответствующих накопленному углу поворота ГИВУС вокруг измерительных осей ИК. Она проходит контроль на несменяемость кодов, т.е. на наличие “грубого” отказа одного из четырех ИК, например, типа “обрыв” или “выход в насыщение”. Затем вводятся поправки от паспортизованных или калибровочных значений составляющих погрешностей ИК, после чего путем решения матричных уравнений рассчитываются параметры угловой ориентации КА.

Параллельно осуществляется диагностика исправности ИК. Здесь возможно использование различных алгоритмов, выбор которых остается за потребителем информации прибора — разработчиком СУОС КА. Например, один из возможных алгоритмов описан в работе [4] и заключается в следующем. Наличие четырех неортогональных ИК позволяет получить параметры угловой ориентации КА по четырем тройкам ИК, т.е. сформировать четыре ортогональных базиса. Отличие их информации друг от друга определяется нескомпенсированными ошибками ИК. С помощью алгебры кватернионов рассчитываются по модулю взаимные уходы пар базисов друг от друга. Таким образом, вычисляются шесть пар разностных базисов. На взаимный уход базисов установлен допуск, значение которого определяется необходимой точностью ориентации КА. Например, на одном из геостационарных телекоммуникационных КА допускалось взаимное расхождение базисов $4' \dots 6'$, что с запасом обеспечивало точность ориентации КА и поддержание устойчивой связи с наземными абонентами.

В составе СУОС на борту КА имеются, как минимум, два АД. Периодически расчетные базисы угловой ориентации КА корректируются по информации, поступающей от одного из них. Частота коррекции определяется, с одной стороны, исходя из того, как быстро взаимно расходятся базисы, что зависит от стабильности точностных параметров ИК ГИВУС между коррекциями, а, с другой, исходя из экономии ресурса АД, и штатно обычно составляет 2–3 раза в сутки. Если допуск на взаимное расхождение базисов превышен, то включается внеплановая коррекция по АД.

Управление ориентацией КА может осуществляться по выходной информации произвольно выбранной тройки ИК ГИВУС либо той

тройки, для которой поправки в расчетный базис были минимальными. Если поправка в выходную информацию ИК за период между коррекциями окажется больше расчетного собственного ухода, то данный ИК может быть признан отказавшим. В этом случае его информация не используется для управления ориентацией КА и проводится поиск причин аномалии.

Другой возможный алгоритм диагностики ГИВУС — проведение непрерывного анализа сходимости уравнения “невязки” в показаниях ИК. Конфигурация кинематической схемы ГИВУС дает возможность постоянно следить за соблюдением закона сходимости “невязки” каналов $\Delta\omega = (\omega_1 + \omega_3) - (\omega_2 + \omega_4) \leq D$, где $\Delta\omega, D$ — показатель “невязки” измерений четырех ИК и допуск на нее, подтверждающий нормальную работу всех четырех ИК.

Когда показатель “невязки” превышает установленный допуск, как уже было изложено выше, к анализу подключается информация от АД, с помощью которых идентифицируется отказавший ИК. Затем он исключается из управления ориентацией КА.

Основы методологии анализа и поиска возможной причины отказа ИК. Методология анализа и поиска возможной причины отказа ИК ГИВУС включает в себя основы, использование которых способствует выявлению и идентификации отказа.

Как уже было отмечено выше, взаимная несогласованность информации четырех ИК более установленного допуска свидетельствует с большой вероятностью о нарушении работоспособности как минимум одного из ИК.

Последующий анализ проводится путем исследования доступной телеметрической информации с борта КА, в первую очередь выходной информации непосредственно с ИК прибора, и ее “наложением” на динамику приборных систем ГИВУС. В зависимости от картины развития отказа реакция приборных систем на него существенно различается. Именно это качество ГИВУС положено в основу такого анализа. Последовательно анализируются следующие системы прибора:

- система обратной связи (СОС);
- система термостатирования;
- система питания;
- система обмена информацией.

Эти исследования позволяют проложить путь от выявленного факта возникшей аномалии в работе ИК ГИВУС к вероятному блоку одной из систем, в которой мог развиваться отказ.

Исследование возможных причин отказов ГИВУС в реальной практике показали, что наиболее часто встречаемым местом отказа в приборе является СОС ИК. Видимо, это объясняется тем, что в СОС сосредоточено наибольшее число используемых в приборе электронных компонентов. Поэтому этой системе уделим наибольшее внимание.

Контур СОС ИК образован блоками ДУ→УД→УОС→БЭ→СТ→→ДМ. Наибольшие трудности в вопросе идентификации отказов представляют параметрические отказы, при которых, как правило, происходят изменения в “нулевом” сигнале ИК в виде скачков или повышенной неустойчивости. Например, скачок “нуля” в системе принципиально может происходить в любом из указанных блоков. Однако подобные отказы в блоках ДУ, УД, УОС и БЭ в основном оказываются ненаблюдаемыми в выходной информации, так как смещение “нуля” в этих блоках обрабатывается замкнутой СОС и остается незаметным в выходной информации ИК.

Если отказ типа “скачка” происходит в блоке СТ или ДМ ПГБ, то он поступает на информационный выход прибора и фиксируется интерфейсом. Аналогично будет проявляться отказ при возникновении дополнительного момента вокруг оси прецессии ПГБ, вызванного, например, изменением тяжения токоподводов поплавка или нарушением симметрии сил его магнитного центрирования. Если информация с ИК в это время задействована в построении ориентации КА, то следствием такого отказа ИК ГИВУС могут быть нештатные изменения в угловом движении КА, которые могут привести к нарушению ориентации и временному невыполнению целевой задачи КА.

Идентификация отказов ИК ГИВУС на конкретных примерах.

Пример 1. В 2005–2006 гг. в ИК ГИВУС на нескольких КА, находящихся на геостационарной орбите, примерно через 2–2,5 года с момента запуска произошли однотипные отказы. Типичная картина проявления отказа показана на рис. 3: штатное функционирование с измерением угловой скорости, близкой к угловой скорости вращения Земли, затем в течение времени от нескольких десятков до нескольких сотен секунд наблюдается переходный процесс с наличием кратковременных периодов как нормальных измерений, так и аномальных

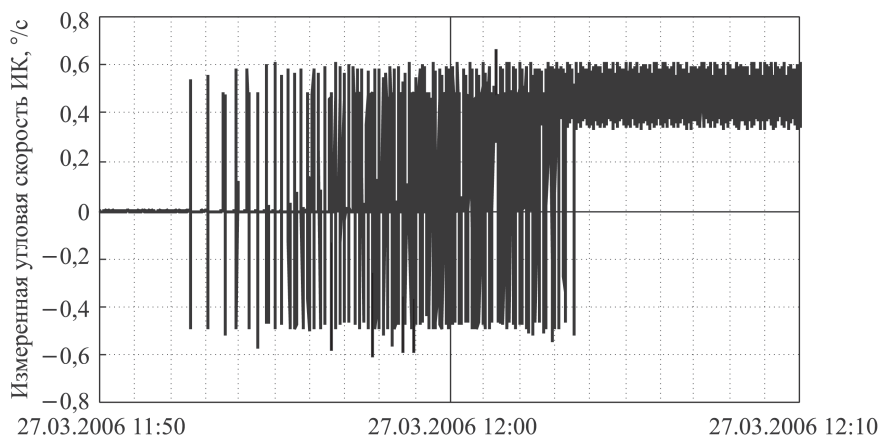


Рис. 3. Зависимость измеренной угловой скорости от периода развития отказа ИК

с выходом на границы диапазона измерений, и, наконец, переход в стабильное аномальное состояние с выходной информацией, соответствующей предельному значению диапазона измерений около $0,45\text{ }^\circ/\text{с}$.

Был проведен большой комплекс исследований по локализации устройства прибора, ответственного за отказ ИК, и поиску конкретного отказавшего элемента. По результатам исследований установлено, что наиболее вероятно отказ произошел в УОС системы обратной связи ИК. Как было отмечено выше, отказы до этой точки являются чаще всего ненаблюдаемыми в выходной информации ИК. Это только в том случае, если СОС остается работоспособной, и рабочий сигнал в ней не выходит из пределов линейной зоны. Здесь же отказ развивается так, что рабочая точка вначале редко, а потом все чаще и, наконец, совсем выходит на свое максимальное значение.

Такая картина выходной информации ИК возможна вследствие отказа УОС при выходе его рабочей точки на “полку” характеристики. В этом случае СОС не справляется с задачей “погашения” внешнего сигнала, который далеко ушел за пределы линейной зоны СОС. Тогда рабочий сигнал СОС тоже выходит на максимум, что было подтверждено испытаниями на технологическом приборе.

В качестве наиболее вероятной первопричины отказа ИК был определен отказ микросхемы 140УД17 в составе УОС, проявившийся в выходе за допуск параметра напряжения смещения. Во всех отказавших ИК были установлены указанные микросхемы изготовления завода “Квазар” (Украина). При наземной многолетней эксплуатации технологических приборов отказов этих микросхем не наблюдалось. Это и то, что отказы ИК произошли через примерно одинаковые временные интервалы от начала летной эксплуатации приборов в условиях космоса, позволили предположить следующее: произошла деградация микросхем под воздействием какого-то из эксплуатационных факторов, наиболее вероятно, радиации при условии, и это важно, что изначально качество микросхем было недостаточным. В пользу этого свидетельствует то, что первые образцы прибора отработали в составе других КА заданный ресурс 10 лет без замечаний.

Было сделано предположение, что предприятием “Квазар” была нарушена технология изготовления МС, что вполне могло быть в условиях развала экономики и производства в 1990-х годах на постсоветском пространстве.

Результаты проведенных радиационных испытаний микросхем 140УД17 завода “Квазар” того же периода изготовления, что и в составе отказавших ИК приборов, имитирующих радиационные воздействия на элементы в составе КА на орбите, показали: их фактическая радиационная стойкость намного меньше гарантированной в технических условиях — микросхемы отказали при уровне накопленной дозы, соответствующей 2–3 годам летной эксплуатации на

борту КА. Это подтвердило правильность выводов о первопричине отказов. Таким образом, сначала на основе анализов телеметрической информации о развитии отказа в ИК и функциональной схемы прибора был локализован отказавший электронный блок. Затем на основе анализа электрической схемы был определен ответственный за отказ радиоэлемент, предположительно была определена причина его отказа, которую удалось подтвердить экспериментально радиационными испытаниями.

Путь исследования отказа ИК ГИВУС был пройден полностью с выходом на достоверную первопричину отказа. В качестве мероприятия по предотвращению отказов стал полный отказ от продукции завода “Квазар”. В ГИВУС, в которых не использовалась продукция завода “Квазар”, рассмотренных выше отказов ИК не наблюдалось.

Пример 2. От разработчика СУОС КА поступила информация о нарушении работоспособности прибора ГИВУС. Было зафиксировано изменение скорости “разбежки” базисов ориентации КА, построенных на разных тройках измерительных каналов ИК1–ИК4 ГИВУС. Управление ориентацией КА осуществлялось по базису, построенному по информации с ИК1, ИК2 и ИК4. Канал ИК3 в это время находился в “горячем” резерве.

По сигналу о начале “разбежки” базисов в соответствии с алгоритмом работы СУОС было проведено внеплановое включение АД и задействование их информации в анализе возникшей нештатной ситуации. Только в этом случае можно установить, какой ИК ГИВУС стал причиной начала “разбежки” базисов.

Зависимости измеренной угловой скорости ИК ГИВУС и “невязки” выходной информации каналов представлены на рис. 4.

Изменение “невязки” выходной информации ИК на $\Delta\omega = 0,4^\circ/\text{ч}$ свидетельствует о нештатном изменении информации, как минимум, одного из каналов. Начало изменения “невязки”, как это и должно быть, приходится на начало “разбежки” базисов. Следует обратить внимание на то, что на начало “разбежки” базисов отреагировал только канал ИК3, не входящий в рабочую тройку каналов. Три других ИК рабочей тройки в своей информации не показывают, что в информации с ГИВУС присутствует аномалия. Возможны две версии объяснения этой картины:

1) в каналах ИК1, ИК2 и ИК4 ничего не произошло, они продолжают работать без замечаний; угловое движение КА не претерпевает никаких изменений, а ИК3 показывает внезапно возникшую на его выходе ошибку $\Delta\omega_3$;

2) в одном из каналов ИК1, ИК2 или ИК4 произошел “скачок” нулевого сигнала; СУОС в течение 1,5...2,0 мин отработала этот “скачок” так, чтобы выходная информация трех каналов вернулась к уровням,

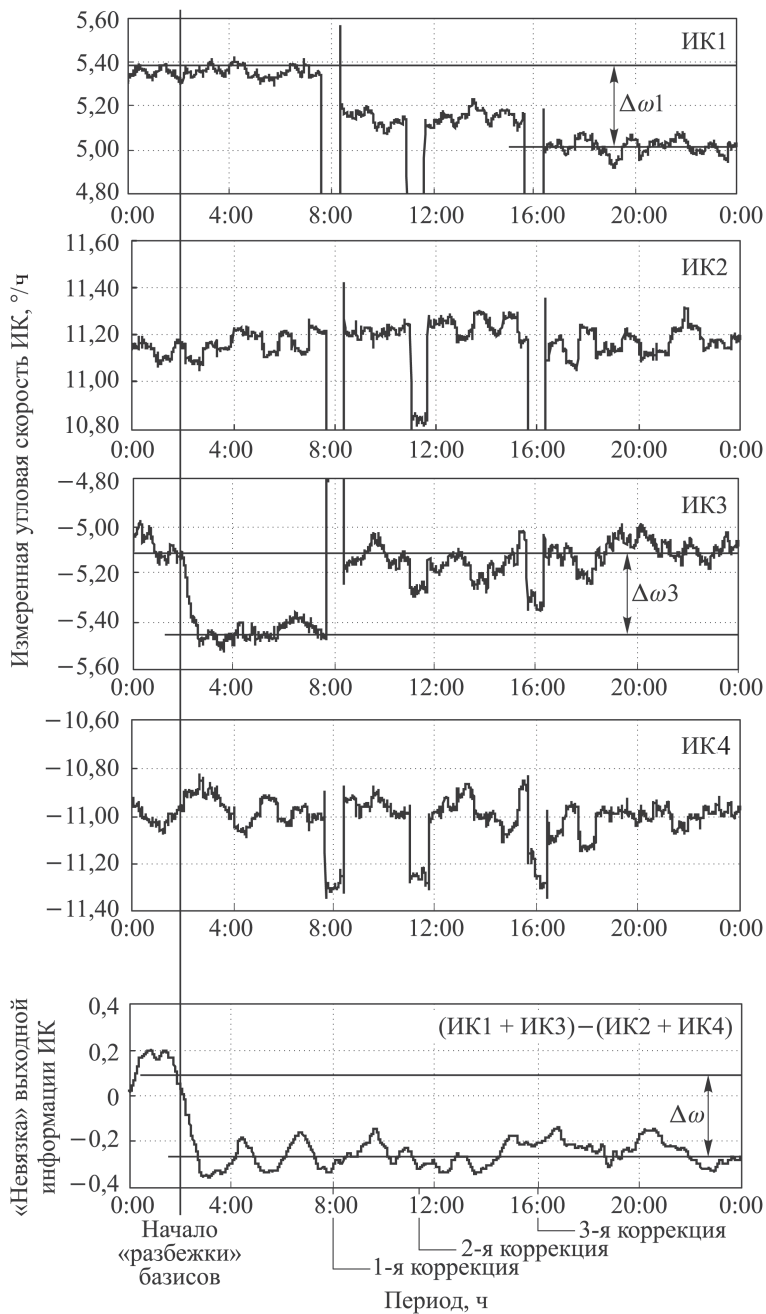


Рис. 4. Зависимости измеренной угловой скорости и “невязки” выходной информации ИК ГИВУС от периода развития отказа ИК1

задаваемым программой управлением движением. “Скачок” оказывается ненаблюдаемым, если он был в пределах линейной зоны выходной характеристики ИК. Что касается углового движения КА, то он с этого момента времени начинает “закручиваться” относительно ориентации, задаваемой программой движения, со скоростью, равной “скачку” ну-

левого сигнала ИК, но с противоположным ему знаком, вследствие чего КА теряет точную ориентацию. Канал ИК3 выступает индикатором этой нештатной “закрутки” КА.

Установить, какая из версий соответствует реальности бортовыми средствами КА возможно с привлечением в анализе информации от АД. На это уходит некоторое время, определяемое временем готовности АД, после чего СУОС восстанавливает ориентацию КА (итерациями за три сеанса коррекции).

Последующий анализ ситуации, проведенный с привлечением информации от АД, показал: причиной указанной “разбежки” базисов стало изменение показаний канала ИК1 на $\Delta\omega_1 = 0,4^\circ/\text{ч}$. Поскольку другие ИК сохранили работоспособность, то $\Delta\omega_1 = \Delta\omega$.

Как уже было отмечено выше, причиной скачкообразного изменения нулевого сигнала ИК могут быть либо уводящие моменты, связанные с СМЦ ПГБ или его конструктивными элементами (например, токопроводами), либо отказы в СТ или ДМ ПГБ. Другие устройства СОС ИК могут быть исключены из рассмотрения.

Анализ и экспериментальные проверки показали, что причиной отказа канала ИК1 стал отказ в цепи питания СМЦ ПГБ. По результатам анализа элементной базы, работы с предприятиями-изготовителями ЭРИ и центрами сертификации ЭРИ была установлена первопричина отказа — отказ диода 2Д510А. Конструктивная особенность этого диода — наличие металлургически несвязанной схемы, что в условиях температурных циклов на борту КА может приводить к потере контакта внутри диода и, как следствие, обрыву в цепи питания СМЦ ПГБ. Была проведена замена диода 2Д510А диодом 2Д510А/ББ, который не имеет указанного недостатка.

Как и в примере 1, исследование отказа ИК ГИВУС завершилось определением отказавшего блока, установлением первопричины отказа и выработкой мероприятий по предотвращению отказа во вновь изготавливаемых ГИВУС.

Пример 3. В 2013 г. на одном из КА было зафиксировано практически мгновенное изменение “невязки” выходной информации ИК ГИВУС на значение 1700 угл. с/с. Зависимости измеренной угловой скорости ИК до отказа в приборе и “невязки” от периода развития отказа ИК4 показаны на рис. 5. Причина скачка “невязки” — резкое изменение уровня выходного сигнала ИК4. Отметим, что ориентация КА до отказа строилась по информации от ИК1, ИК3, ИК4.

Развитие отказа можно описать следующим образом: участок *A* — штатная работа прибора, выходная информация всех ИК соответствует проекциям угловой скорости Земли на измерительные оси; участок *B* — после возникновения скачка примерно 1700 °/ч в выходной информации ИК4, соответствующего половине диапазона измерения, СУОС

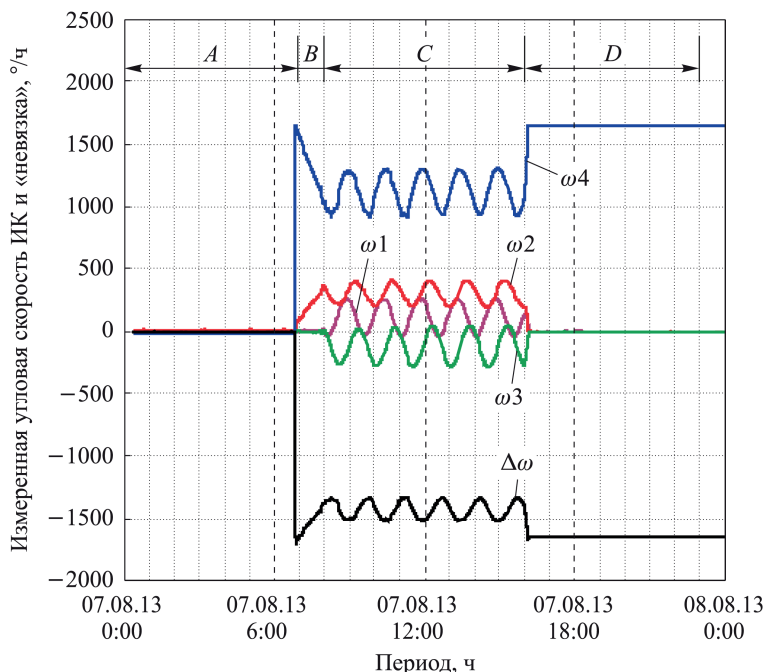


Рис. 5. Зависимость измеренной угловой скорости ИК прибора и «невязки» от периода развития отказа ИК4 (A–D – участки)

КА начинает обрабатывать его как внешнее воздействие, так как ИК4 входит в управляющую тройку ИК. При этом угловое движение КА, возникающее при обработке ложной информации о его «закрутке», проецируется с противоположными знаками только на оси чувствительности ИК2 и ИК4, что соответствует кинематической схеме прибора (см. рис. 2, а); участок C – управление угловым движением КА было выключено и он совершает неуправляемое конусообразное движение; участок D – ИК4 прибора исключен из управляющей тройки и КА стабилизируется на основании информации ИК1–ИК3.

Измерительный канал ИК4 вновь показывает ложную информацию на уровне 1700 °/ч. Проведенный анализ поведения «невязки» после произошедшего отказа позволил установить количественные изменения характеристик измерительного канала ИК4:

- смещение «нулевого» сигнала на значение + 1700 °/ч;
- уменьшение цены импульса выходной информации (масштабного коэффициента) в 2 раза.

Как уже было отмечено, отказ типа «скачка» фиксируется на информационном выходе прибора, если он происходит в СТ или ДМ ПГБ. Дальнейший анализ выходной информации прибора и экспериментальная проработка позволили заключить, что причиной подобного поведения ИК стал отказ одного из ключей в микросхеме 590KH15 в СТ ИК4.

Стабилизатор тока в ИК коммутирует высокостабильный ток в датчике момента гироблока в соответствии с ШИМ-командами блока электроники, тем самым осуществляя управление и замыкая контур обратной связи. Микросхема 590КН15 является коммутирующим элементом СТ. Схема, иллюстрирующая принцип нормальной работы СТ, представлена на рис. 6.

Согласно представленной схеме, четыре ключа образуют мостовую схему, в которой одновременное замыкание противоположных ключей (К1–К3 и К2–К4) позволяет коммутировать ток определенного знака в ДМ гироблока. При отказе одного из ключей мостовой схемы, выразившемся в его “закрутке”, ШИМ-сигнал из биполярного превратится в однополярный. В результате при уменьшении в 2 раза диапазона разгрузочного тока возникнет смещение “нуля” ИК на 0,5 диапазона измерения и масштабный коэффициент измерения ИК уменьшится в 2 раза.

По результатам исследования этого отказа были осуществлены мероприятия, повышающие качество изготовления микросхем 590КН15, и их дополнительный контроль в целях исключения подобных отказов в будущем.

Выводы. На конкретных примерах исследований отказов ИК ГИВУС КИНД34-020 показано, как на основе анализа телеметрической информации по прибору с борта КА, а также анализа функциональных и электрических схем прибора возможно проводить оценку работоспособности прибора и входящих устройств с выходом на первопричину отказа и принятием мер по их недопущению во вновь изготовленных приборах. Основы методологии анализа и поиска воз-

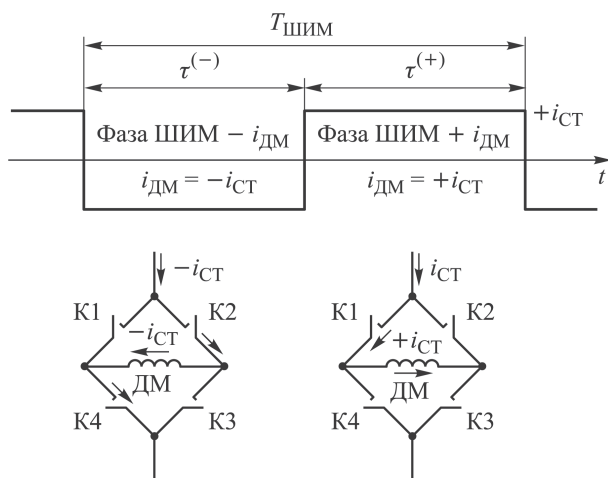


Рис. 6. Схема, иллюстрирующая принцип нормальной работы СТ:

К1–К4 — электронные ключи микросхемы 590КН15; $T_{\text{ШИМ}}$ — период ШИМ; $\tau^{(-)}$, $\tau^{(+)}$ — отрицательный и положительный полупериоды ШИМ; $i_{\text{СТ}}$ — ток стабилизатора тока; $i_{\text{ДМ}}$ — ток ДМ гироблока

можной причины отказа могут быть полезны и использоваться при исследованиях нештатных ситуаций гироскопических приборов на базе чувствительных элементов различного типа, имеющих схожие принципы построения системы и устройств обратной связи гироскопических каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Опыт создания высокоточных поплавковых гироскопических приборов, применяемых в системах угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов и станций / А.А. Волынцев, Л.А. Дудко, Б.А. Казаков, В.В. Козлов, А.П. Мезенцев, В.И. Решетников, Д.Н. Дибров, В.С. Рыжков // Гироскопия и навигация. 2004. № 1 (44). С. 45–57.*
2. *Бордачев Д.А., Шустов И.Е. Гироскопический измеритель вектора угловой скорости с двухотсчетной измерительной системой // Гироскопия и навигация. 2013. № 2 (81). С. 112–118.*
3. *Волынцев А.А., Казаков Б.А. Вопросы идентификации отказов измерительных каналов гироскопического измерителя угловой скорости в составе системы управления угловой ориентацией космического аппарата // 7-я Российская мультиконференция по проблемам управления. Конференция “Управление в морских и аэрокосмических системах” (УМАС–2014). Сб. докл. ГНЦ РФ ОАО “ЦНИИ “Электроприбор”. Санкт-Петербург, 2014. С. 335–344.*
4. *Бранец В.Н., Дибров Д.Н., Рыжков В.С. Диагностика и вычисление параметров ориентации избыточных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) // Механика и навигация. Материалы научной сессии, посвященной 85-летию академика РАН А.Ю. Ишлинского. Сб. докл. ГНПЦ РФ “ЦНИИ “Электроприбор”. Санкт-Петербург, 1999. С. 22–35.*

REFERENCES

- [1] Volyntsev A.A., Dudko L.A., Kazakov B.A., Kozlov V.V., Mezentsev A.P., Reshetnikov V.I., Dibrov D.N., Ryzhkov V.S. Experience in Developing Precision Float Gyroscopic Devices Used in the Spacecraft and Station Angular Orientation and Stabilization Systems. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2004, no. 1 (44), pp. 45–57 (in Russ.).
- [2] Bordachev D.A., Shustov I.E. The Gyroscopic Meter of Angular Velocity Vector with Dual Measurement System. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2013, no. 2 (81), pp. 112–118 (in Russ.).
- [3] Volyntsev A.A., Kazakov B.A. Identifying the Failure of Measuring Channels of Gyroscopic Angular Velocity Meter within the Spacecraft Angular Orientation Control System. *7-ya Ross. mul'tikonf. po problemam upravleniya. Konf. “Upravlenie v morskikh i aerokosmicheskikh sistemakh”* (UMAS–2014). *Sb. dokl. GNTs RF OAO TsNII “Elektropryor”* [7th Russian Multiconference on Control Problems. Conf. “Control of Marine and Aerospace Systems” (UMAS–2014). Proc. of Concern CSRI “Elektropryor”, OJSC, State Scientific Center of the Russian Federation]. St. Petersburg, 2014, pp. 335–344 (in Russ.).
- [4] Branets V.N., Dibrov D.N., Ryzhkov V.S. Diagnosis and Computation of the Orientation Parameters of Redundant Strapdown Inertial Navigation System (SINS) *Mekhanika i navigatsiya. Mat. Nauch. sessii, posvyashchennoy 85-let. akademika RAN A.Yu. Ishlinskogo Sb. dokl. GNPTs RF “TsNII “Elektropryor”* [Mechanics and Navigation. Proc. Sci. Session Devoted to the 85th Anniversary of Academician A.Yu. Ishlinskii. Proc. of Concern CSRI “Elektropryor”, OJSC, State Scientific Center of the Russian Federation.]. St. Petersburg, 1999, pp. 22–35 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 18.02.2015

Волынцев Андрей Андреевич — главный конструктор Филиала ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”.

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А.

Volyntsev A.A. — Chief Designer, Affiliated branch of the Federal State Unitary Enterprise “Center for operation of space ground-based infrastructure (TsENKI)”, Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics.

Affiliated branch of FSUE “Center for operation of space ground-based infrastructure (TsENKI)”, Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics, Prud Kluchiki ul. 12A, Moscow, 111024 Russian Federation.

Казаков Борис Андреевич — канд. техн. наук, главный научный советник Филиала ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”.

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А.

Kazakov B.A. — Ph.D. (Eng.), Chief Scientific Adviser, Affiliated branch of the Federal State Unitary Enterprise “Center for operation of space ground-based infrastructure (TsENKI)”, Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics.

Affiliated branch of FSUE “Center for operation of space ground-based infrastructure (TsENKI)”, Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics, Prud Kluchiki ul. 12A, Moscow, 111024 Russian Federation.

Шустов Игорь Евгеньевич — канд. техн. наук, начальник сектора Филиала ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”.

Филиал ФГУП “ЦЭНКИ” — “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111024, Москва, ул. Пруд Ключики, д. 12А.

Shustov I.E. — Ph.D. (Eng.), Head of the Division, Affiliated branch of the Federal State Unitary Enterprise “Center for operation of space ground-based infrastructure (TsENKI)”, Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics.

Affiliated branch of FSUE “Center for operation of space ground-based infrastructure (TsENKI)”, Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics, Prud Kluchiki ul. 12A, Moscow, 111024 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Волынцев А.А., Казаков Б.А., Шустов И.Е. Гироскопический измеритель вектора угловой скорости. Опыт исследования отказов в эксплуатации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 5. С. 136–151.

Please cite this article in English as:

Volyntsev A.A., Kazakov B.A., Shustov I.E. Gyroscopic angular rate measurement device. In-service troubleshooting experience. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Bauman, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 5, pp. 136–151.