

Д. А. БОРДАЧЕВ, А. А. ВОЛЫНЦЕВ, П. А. ИЛЮШИН, Б. А. КАЗАКОВ, И. Е. ШУСТОВ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ПЕРСПЕКТИВНОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В статье приводится описание прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости на поплавковых гироскопах, предназначенного для работы в системе управления ориентацией и стабилизации космических аппаратов различного назначения с малой динамикой углового движения (спутники связи, метеорологические, научные спутники). Также представлены некоторые результаты наземной отработки конструкции прибора и его автономных испытаний в части оценки основных точностных параметров его измерительных каналов.

Ключевые слова: поплавковый гироскоп, измеритель вектора угловой скорости, двухотсчетная измерительная система, угловая ориентация, космический аппарат

Введение

НИИ прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова (НИИ ПМ) более 30 лет занимается разработкой прецизионных бесплатформенных инерциальных приборов космического назначения.

С 1986 года, начиная со станции «Мир», успешно применялся разработанный в НИИ ПМ первый отечественный гироскопический измеритель вектора угловой скорости (ГИВУС) КИЗ4-2А. Опыт его применения и других разработок, позволил создать более совершенный по всем параметрам прибор КИНД34-020 и его модификации, которые с 1999 года и по настоящее время широко применяются в составе систем управления ориентацией и стабилизации многих российских космических аппаратов (КА) – «Ямал», «Экспресс-АМ», «Электро-Л», «Спектр-Р», ряде КА двойного назначения, а также в российском сегменте международной космической станции (МКС). В составе КА «Ямал-100», «*Sesat*», МКС приборы ГИВУС типа КИНД34-020 отработали 9-15 лет. Основные проблемы создания этого прибора, а также

Бордачев Дмитрий Анатольевич. Главный специалист филиала ФГУП «ЦЭНКИ» НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова (Москва).

Волынцев Андрей Андреевич. Главный конструктор НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова

Илюшин Павел Алексеевич. Ведущий инженер НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова.

Казаков Борис Андреевич. Кандидат технических наук, главный научный советник НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова.

Шустов Игорь Евгеньевич. Кандидат технических наук, начальник сектора НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова.

Статья по докладу на XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2015.

результаты его наземной отработки и летных испытаний были изложены в пленарном докладе на X международной конференции по интегрированным навигационным системам в Санкт-Петербурге в 2003 году [1].

К 2008 году в НИИ ПМ по результатам работы с основными головными организациями-разработчиками КА были сформулированы требования к новому ГИВУС с улучшенными, сравнительно с прибором КИНД34-020, эксплуатационными и точностными характеристиками. По результатам проработки требований были определены основные направления модернизации базового прибора КИНД34-020, о чем был пленарный доклад на XVI международной конференции по интегрированным навигационным системам в Санкт-Петербурге в 2009 году [2].

Рассматривались следующие основные направления модернизации прибора-прототипа в целях увеличения диапазона измеряемой угловой скорости, уменьшения цены бита выходной информации, случайных ошибок и шумов измерительных каналов (ИК):

- применение в ИК двухконтурной системы обратной связи, работающей по принципу двухотсчетной измерительной системы,
- реализация модульного принципа конструирования и построения тепловой системы гироблока,
- доработка конструкции гироблока.

Кроме того, должен был быть реализован комплекс мероприятий, направленных на увеличение ресурса прибора до 15 лет в условиях его эксплуатации в составе КА на орбите.

Требования к основным характеристикам нового прибора ГИВУС, сформулированные в 2009 году с учетом пожеланий заказчиков, приведены в [3].

Далее приведены основные итоги разработки нового прецизионного ГИВУС, получившего обозначение КИНД34-064, а также некоторые результаты его наземной отработки по состоянию на начало 2015 года.

Особенности функциональной схемы ИК прибора

Функционально ГИВУС КИНД34-064 (далее – прибор) состоит из четырех независимых ИК, каждый из которых включает в себя четыре системы:

- измерительную систему, состоящую из поплавкового гироблока и набора электронных устройств (ЭУ), которые обеспечивают замыкание обратной связи и преобразование выходного сигнала гироблока для получения полезной информации об измеряемой проекции угловой скорости на ось чувствительности,
- систему электропитания, состоящую из вторичного источника питания и обеспечивающую преобразование напряжения бортовой сети КА в набор высокостабильных напряжений постоянного и переменного тока, необходимых для работы всех электронных устройств ИК;
- систему термостатирования, состоящую из блока усилителей, термодатчиков, нагревателей и твердотельных термоэлектрических охладителей (элементов Пельтье) и предназначенную для обеспечения неизменного теплового режима гироблока и термостатируемых ЭУ при изменении температуры под основанием прибора в пределах 0–35 °С;
- систему обмена информацией, состоящую из модуля сопряжения и предназначенную для обеспечения обмена информацией ИК с бортовым комплексом управления в формате ГОСТ Р 52070.

Функциональная блок-схема ИК прибора представлена на рис. 1.

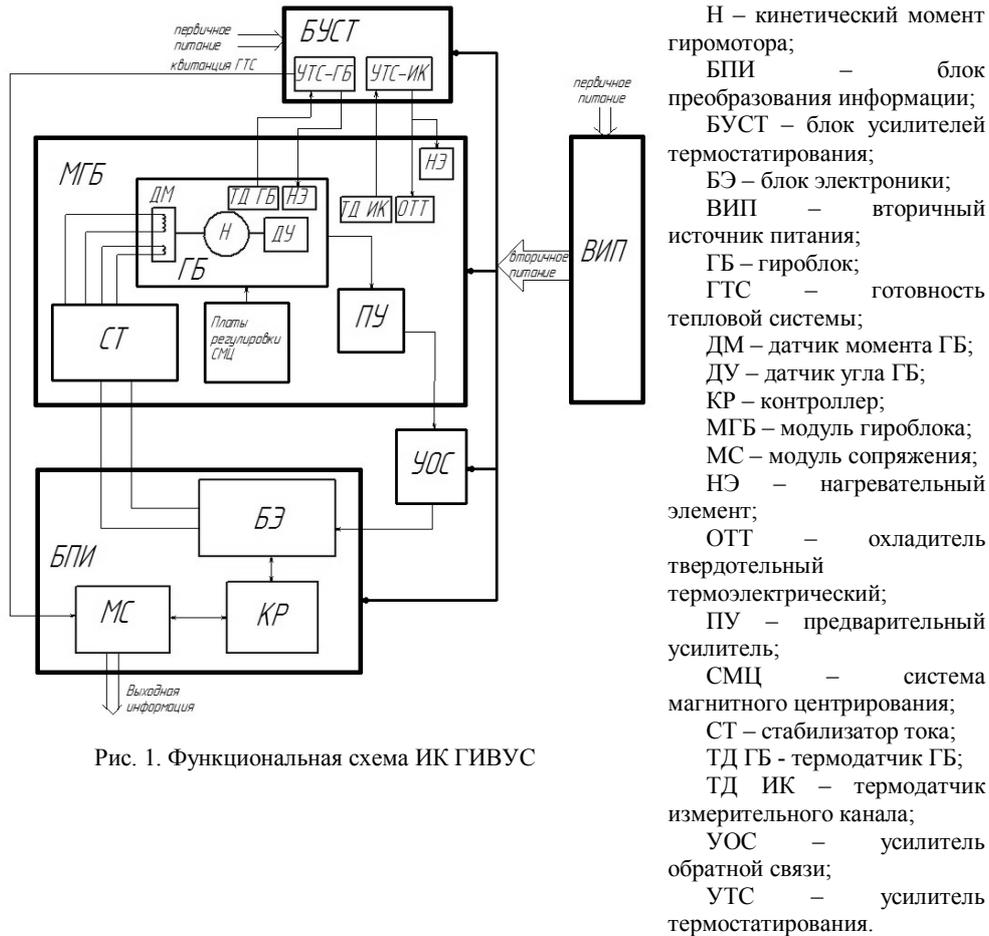


Рис. 1. Функциональная схема ИК ГИВУС

Измерительная система ИК прибора

Основным улучшением, направленным на увеличение диапазона измеряемой угловой скорости и уменьшение цены дискрета выходной информации, было введение дополнительного, разгрузочного контура в систему обратной связи ИК прибора. Измерение угловой скорости в ИК нового прибора осуществляется одновременно двумя контурами. При этом «старший» контур измеряет угловую скорость в полном диапазоне, а «младший» контур уточняет измерение «старшего». Более подробно принцип работы двухотсчетной измерительной системы представлен в [3].

Также, с целью увеличения диапазона измеряемой угловой скорости, была проведена модернизация поплавкового гироблока.

От гироблока, примененного в приборе КИНД34-020 и его аналогах, модернизированный гироблок КИНД99-003М отличается увеличенным более чем в 3 раза коэффициентом крутизны обмотки датчика момента, и теплоотражающими (полированными) внешними поверхностями. Прочие характеристики гироблока остались неизменными. Модернизированный поплавковый гироблок представлен на рис. 2.

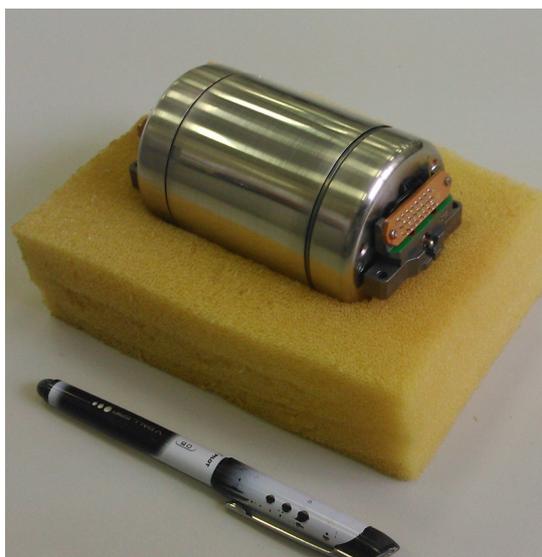


Рис. 2. Гироблок КИНД99-003М

Конструктивные особенности прибора

В основу компоновки нового ГИВУС положен принцип модульности. Конструктивно новый прибор представляет собой герметизированный корпус с базирующими поверхностями, в который устанавливаются четыре модуля гироблока (МГБ) и блоки нетермостатируемой электроники. МГБ размещены внутри корпуса таким образом, что оси чувствительности гироблоков располагаются по диагоналям куба, вдоль ребер которого проходят оси приборной системы координат X_n , Y_n , Z_n (согласно рис. 3).

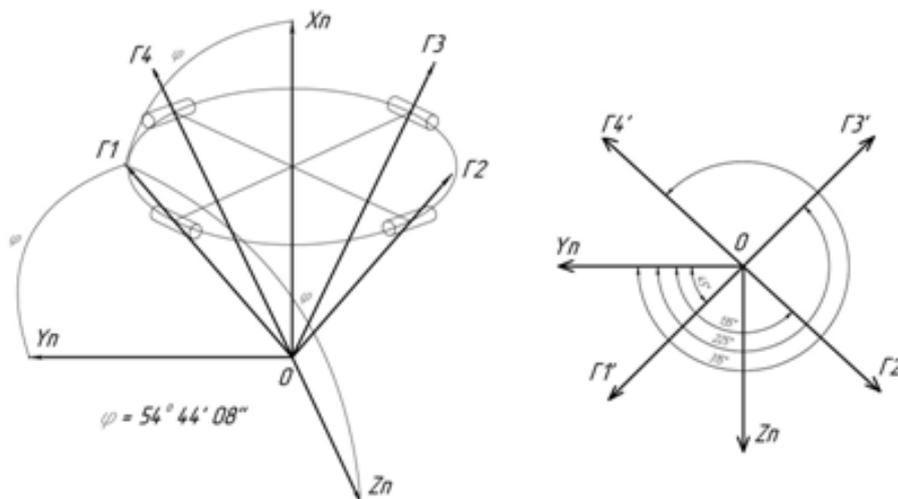


Рис. 3. Кинематическая схема прибора:

Г1..Г4 – оси чувствительности ИК;

Г1'..Г4' – проекции осей чувствительности ИК на установочную плоскость прибора;

X_n , Y_n , Z_n – оси приборной системы координат.

Подобная кинематическая схема позволяет измерять вектор угловой скорости КА с равной точностью по информации с любой тройки ИК, а также определять наличие отказа одного из четырех ИК.[4]

Все нетермостатируемые ЭУ и МГБ установлены в корпус в одной плоскости, что позволило обеспечить монтажный доступ ко всем основным электронным блокам и повысить технологичность прибора. Также для упрощения сборки прибора при разработке конструкции ЭУ были применены плоские соединители типа СНП. Конструкция нового прибора представлена на рис. 4.

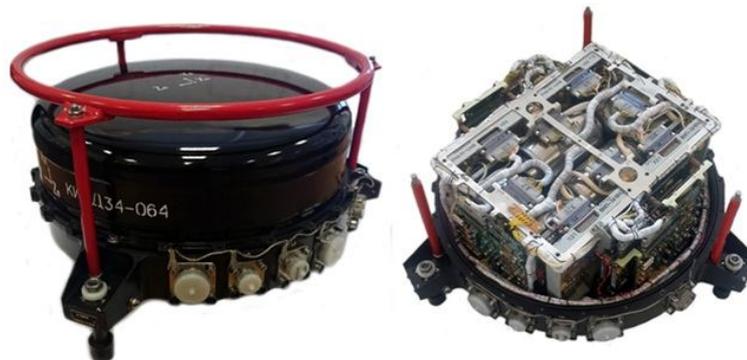


Рис. 4. Прибор КИНД34-064 в сборе и без кожуха

Результаты отработки конструкции МГБ

Основной конструктивной единицей нового прибора является МГБ (рис. 5),

представляющий собой завершённый модуль, состоящий из поплавкового гироблока, блоков термостатируемой электроники, термодатчиков и исполнительных элементов системы термостатирования. Конструкция МГБ спроектирована с учетом необходимости – обеспечения механической и тепловой развязки гироблоков относительно основания прибора и между собой.

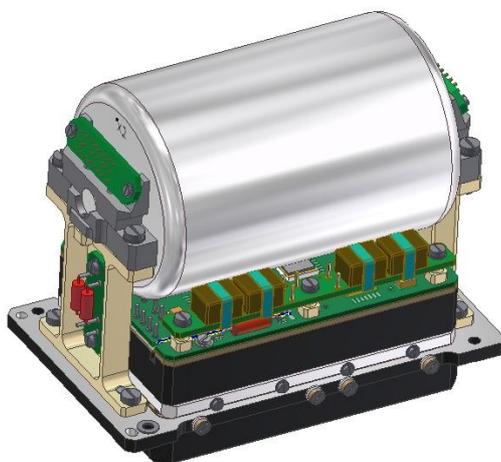


Рис. 5. МГБ без термоэкранов

Механическая развязка гироблока относительно основания прибора необходима для его защиты от различных механических факторов, действующих

на прибор в процессе транспортирования, выведения КА на орбиту и эксплуатации. К таким факторам кроме вибрационных и ударных воздействий (динамических) можно отнести статические напряжения, возникающие в местах крепления гироблока из-за температурного расширения/сжатия деталей конструкции (температурные напряжения).

Гироблок устанавливается на основание МГБ с помощью титановых жаберных кронштейнов с регламентированной площадью сечения. Для компенсации температурных напряжений в местах крепления гироблока жаберные кронштейны МГБ были спроектированы неравножесткими. При этом более податливый кронштейн должен компенсировать изменение линейных размеров гироблока при его температурной деформации, а более жесткий – обеспечивать стабильность привязки оси чувствительности гироблока к приборной системе координат.

Проведенные механические испытания вибрационного макета МГБ, состоящего из набора основных конструктивных элементов МГБ (в том числе гироблока) в составе штатного корпуса прибора, позволили выявить недостаток его конструкции на предельных режимах нагрузки, задаваемой в процессе выявления запасов механической прочности – зафиксировано нарушение целостности цапфы гироблока. Исследования причин выявленной поломки позволили сделать вывод, что нарушение целостности цапфы возникло как раз в результате неравножесткости жаберных кронштейнов. Из-за высокой податливости «мягкого» кронштейна на цапфе, закрепленной на «жестком» кронштейне, возникало предельное напряжение, следствием чего стала поломка цапфы.

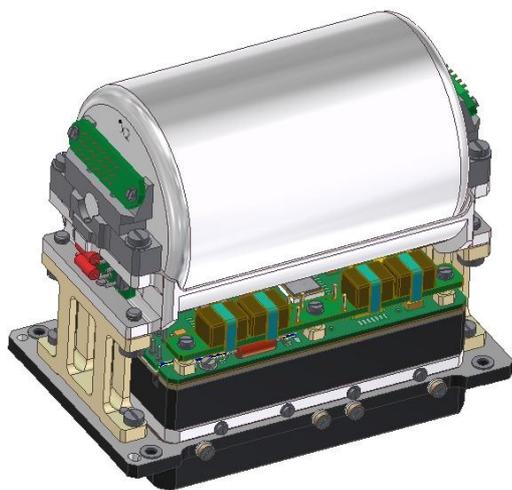


Рис. 6. МГБ с улучшенной конструкцией без внешнего термоэкрана

По результатам исследования было решено увеличить механическую стойкость конструкции МГБ. Для этого жаберные кронштейны, на которых устанавливался гироблок, сделали равножесткими, а сам гироблок заключили в дополнительный стальной защитный кронштейн. Результаты расчетов и испытаний показали, что эти доработки в 2 раза повышают механическую стойкость конструкции МГБ, но приводят к увеличению массы прибора примерно на 800 г. Доработанный МГБ представлен на рис. 6.

Особенности тепловой системы прибора

Термостатирование чувствительного элемента необходимо для достижения заявленной точности во всем диапазоне внешних температур. Для поплавковых чувствительных элементов это особенно актуально в связи с тем, что достижение их высоких точностей происходит за счет гидростатической разгрузки точностных опор (опор поплавкового элемента). Настройка же этих опор осуществляется путем подбора температуры жидкости, обеспечивающей поплавок нулевую плавучесть. Нестабильность температуры поплавкового чувствительного элемента вызовет дополнительные погрешности измерения.

Каждый ИК нового прибора оснащен индивидуальной системой термостатирования МГБ. Это было сделано для минимизации их теплового взаимовлияния.

Система состоит из двух контуров. Точный контур обеспечивает термостабилизацию самого гироблока на температуре около 60°C со стабильностью не хуже $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Термодатчики и нагреватели точного контура термостатирования относятся к его активным элементам и расположены непосредственно на гироблоке. К пассивным элементам относятся упомянутые ранее жаберные кронштейны, с помощью которых осуществляется тепловая развязка гироблока от основания прибора за счет ограничения стока тепловой мощности через них.

Грубый контур системы обеспечивает термостабилизацию плат, расположенных на термостабилизированном основании, на температуре около 50°C со стабильностью не хуже $\pm 1^{\circ}\text{C}$, а также более комфортные условия для работы точного контура. Основными элементами грубого контура являются термодатчики и элементы Пельтье, расположенные на термостабилизированном основании, и нагреватели, расположенные на защитном кронштейне гироблока и внутреннем тепловом экране МГБ.

Принципиальная тепловая схема МГБ с улучшенной механической стойкостью представлена на рис. 7. Требования по стабильностям температур заданы для обеспечения точностных характеристик прибора исходя из имеющихся температурных зависимостей для гироблока и ЭУ.

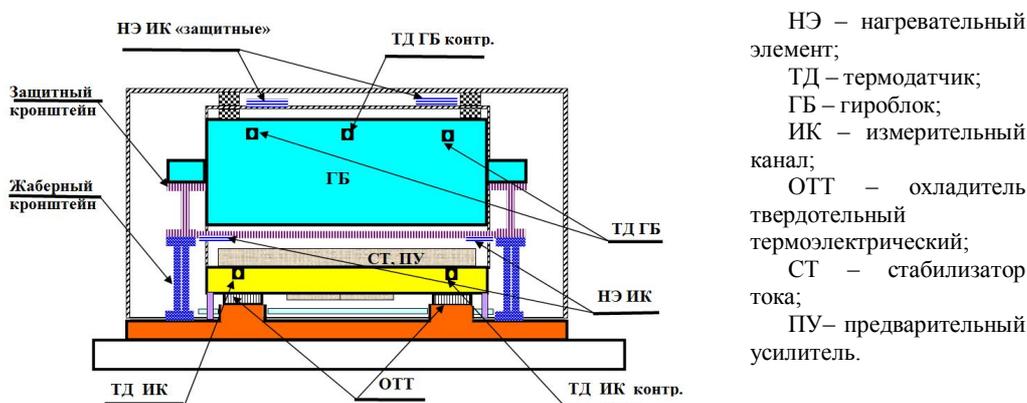


Рис. 7. Тепловая схема МГБ с улучшенной конструкцией

При разработке системы термостатирования и конструировании нового прибора заданные требования по стабильностям температуры были выполнены с более чем двойным запасом.

Однако, высокая плотность компоновки МГБ и прибора в целом, индивидуальное термостатирование каждого гироблока, а также введение в прибор дополнительных вычислительных средств, необходимых для работы двухотсчетной измерительной системы, привели к повышению энергопотребления прибора относительно прибора КИНД34-020 и проектных значений.

Результаты испытаний прибора

В настоящее время НИИ ПМ завершает предварительные испытания первого образца прибора КИНД34-064. Прибор прошел точностные, тепловые

механические и ресурсные испытания. Их результаты подтвердили эффективность заложенных в прибор технических решений и соответствие техническим требованиям.

В Таблице 1 представлены основные точностные характеристики ИК прибора, в сравнении с проектными (требованиями КД).

В большинстве вариантов потенциального применения нового прибора (в первую очередь, в составе спутников на геостационарной орбите и КА-телескопов для исследований дальнего космоса) угловая скорость КА будет находиться в пределах диапазона измерения «младшего» контура ИК. Исходя из этого, одним из основных точностных параметров нового прибора ГИВУС является стабильность нулевого сигнала, не зависящего от перегрузки, «младшего» контура ИК. В процессе отработки были определены основные составляющие этой погрешности за 24 часа, в условиях изменений температуры основания прибора и напряжения первичного питания. Графики характерных зависимостей представлены на рис. 8–10. На графиках видно, что суточная стабильность ω_t составляет около 0,0003 °/ч (среднеквадратическое отклонение, СКО), а максимальные отклонения ω_t от среднего значения в запуске в зависимости от изменений температуры и первичного питания составляют, соответственно, около $\pm 0,002$ °/ч и $\pm 0,001$ °/ч.

Т а б л и ц а 1

Параметр	Требования КД	Фактическое значение (по 4 ИК)
Диапазон измерения входной угловой скорости: - «старший контур», °/с - «младший контур», °/с	более 2,00 более 0,100	2,55 – 2,72 0,123 – 0,132
Масштабный коэффициент: - «старший» контур, " - «младший» контур, "	1,00 – 1,25 0,0030 – 0,0050	1,14 – 1,23 0,0035 – 0,0038
Стабильность нулевого сигнала за 24 часа, (σ), °/ч - «старший» + «младший» контуры - «младший» контур	не более 0,007 не более 0,0007;	0,0004 – 0,0015 0,0002 – 0,0007
Шум при интервале осреднения 0,1..10 с, (σ), "	0,030	0,029

В процессе испытаний была определена величина шумовой составляющей выходной информации ИК прибора. Она определялась по среднеквадратическому значению на временной базе 15 минут при тактах осреднения 10 с, 1 с и 0,1 с (90, 900 и 9000 точек соответственно). Результаты полученного измерения представлены на рис.11–13.

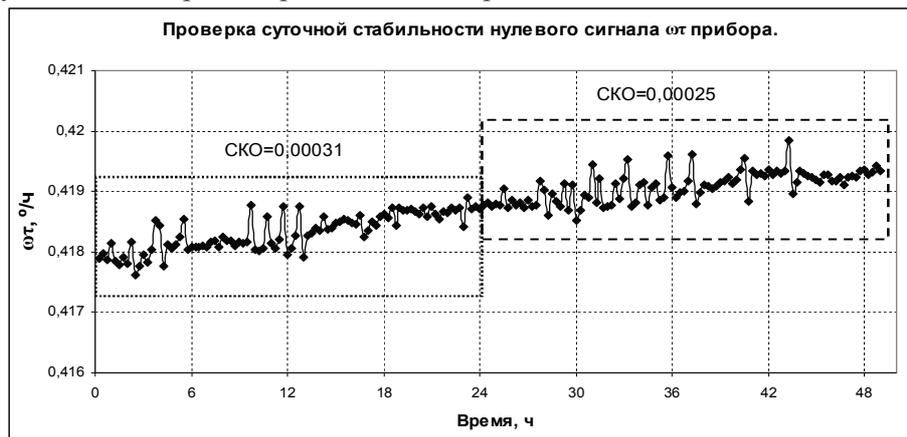


Рис. 8. График суточной стабильности нулевого сигнала «младшего» контура ω_t , не зависящего от перегрузки. Такт измерения – 15 минут



Рис. 9. График отклонения нулевого сигнала «младшего» контура ω_τ от среднего значения в запуске в зависимости от изменения температуры основания прибора в диапазоне температур (0..35) °C. Точки на графике - единичные замеры нулевого сигнала «младшего» контура ω_τ .

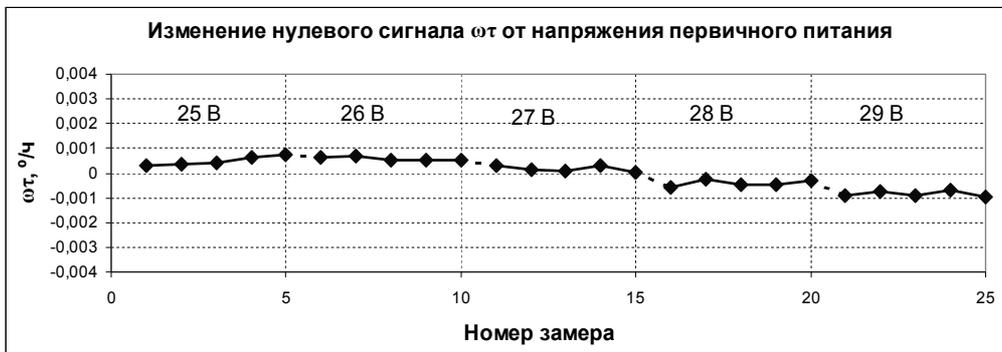


Рис. 10. График отклонения нулевого сигнала «младшего» контура ω_τ от среднего значения в запуске в зависимости от изменения напряжения первичного питания прибора в диапазоне (25,0..29,0) В. Точки на графике - единичные замеры нулевого сигнала «младшего» контура ω_τ .

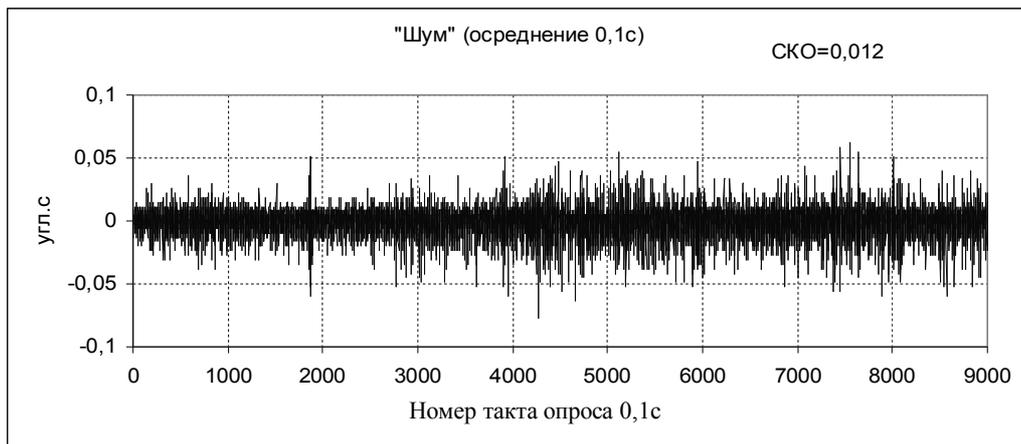


Рис. 11. Графики шумовой составляющей выходной информации с осреднением 0,1 с (9000 точек)

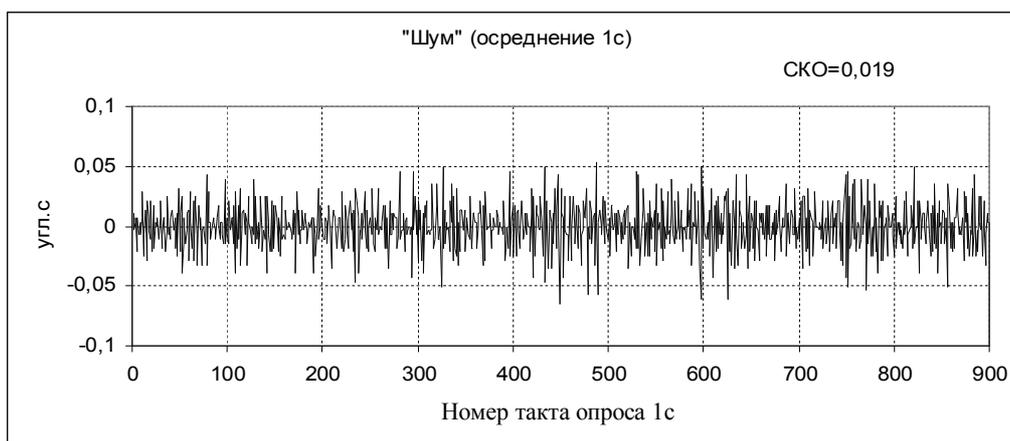


Рис. 12. Графики шумовой составляющей выходной информации с осреднением 1 с (900 точек)

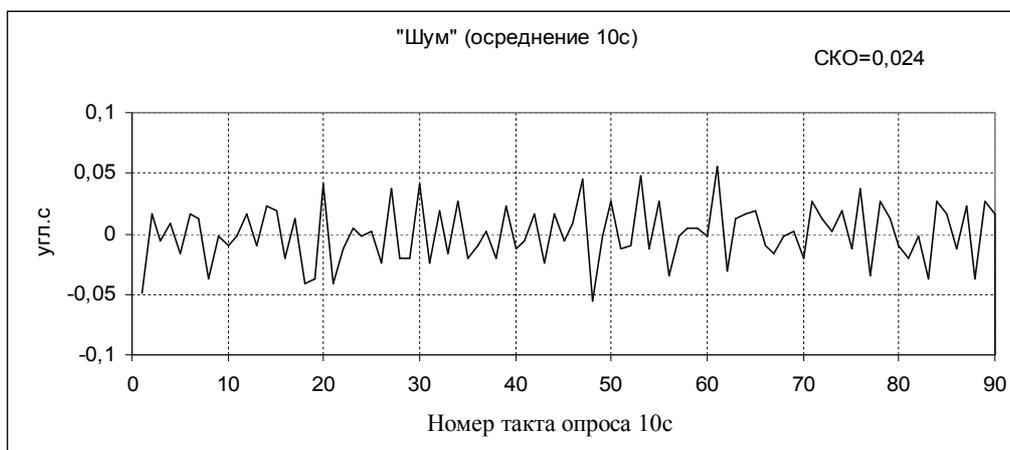


Рис. 13. Графики шумовой составляющей выходной информации с осреднением 10 с (90 точек)

Выводы

В НИИ ПМ разработана конструкторская документация и изготовлен опытный образец прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости КИНД34-064. В настоящее время завершаются предварительные испытания опытного образца прибора.

В приборе применена двухконтурная система обратной связи, работающая по принципу двухотсчетной измерительной системы. Конструкция прибора построена с использованием модульного принципа. Основными отличительными чертами этого прибора являются большой диапазон измерения при малом дискрете выходной информации, высокая стабильность нулевого сигнала и срок активного существования до 15 лет.

Прецизионный прибор с подобными характеристиками рассчитан, в первую очередь, на применение в составе систем управления КА научного назначения, в том числе КА-телескопов, а также других аппаратов, обладающих малой динамикой углового движения или эксплуатирующихся на геостационарной орбите.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волынцев А. А., Дудко Л. А., Казаков Б. А., Мезенцев А. П., Решетников В. И., Дибров Д. Н., Рыжков В. С.** Опыт создания высокоточных поплавковых гироскопических аппаратов, применяемых в системах угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов и станций // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник трудов. 2003. С. 226-234.
2. **Волынцев А. А., Воробушкин В. В., Казаков Б. А., Тидеман Н. А., Шустов И. Е.** Повышение точности и диапазона измерения прецизионных гироскопических измерителей вектора угловой скорости на базе поплавковых чувствительных элементов // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник трудов. 2009. С. 114-123.
3. **Бордачев Д. А., Шустов И. Е.** Гироскопический измеритель вектора угловой скорости с двухотсчетной измерительной системой // Гироскопия и навигация. № 2 (81). 2013. С. 112-118.
4. **Епифанов А. Д.** Избыточные системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1978. 144 с.
5. **Шустов И. Е., Волынцев А. А., Казаков Б. А.** Динамика двухконтурного гироскопического измерителя вектора угловой скорости // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2012. Спецвыпуск № 5. Информатика и системы управления. С. 186-192.

Bordachev D. A., Volyntsev A. A., Ilyushin P. A., Kazakov B. A., Shustov I. E. (NII PM named after Academician V. I. Kuznetsov)

Precision gyroscopic device for measuring spacecraft angular rate: ground verification results // *Giroskopiya i Navigatsiya*. 2015. № 4 (91). P. 106-116.

Abstract. In this article we provide the description of precise gyroscopic angular rate measurement device. The device is designed to operate within stabilization control systems of various low-dynamics satellites (communication satellites, Earth remote sensing satellites, scientific space vehicles). This gyroscopic device is developed in NII PM named after Academician V. I. Kuznetsov. The device consists of four independent measuring channels. The sensing element of each measuring channel is floating gyro with gas-dynamic rotor bearing and floating element magnetic suspension. We describe the main engineering solutions and features of measurer, which allow reaching its functional and accuracy characteristics. Finally described some ground tests results of the gyroscopic measurer (accuracy characteristics, 24 hours bias stability diagrams, bias diagrams as a function of temperature and supply voltage, noise diagram).

Key words: float gyro, gyroscopic angular rate measurement device, measuring system, angular orientation, spacecraft