

ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С ДВУХОТСЧЕТНОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Описан принцип построения и работы двухотсчетной измерительной системы гироскопического измерителя вектора угловой скорости КИНД34-064, разрабатываемого в НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова для систем управления космических аппаратов, приведены основные конструктивные особенности и результаты точностных испытаний одного измерительного канала прибора.

Введение

В настоящее время в России ведется разработка космических аппаратов (КА) для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и космических телескопов, для которых большое значение имеет высокая точность угловой ориентации в инерциальном пространстве и возможность ее поддерживать с высокой стабильностью при вращении КА с некоторой конечной угловой скоростью, равной орбитальной угловой скорости КА. Высокая точность угловой стабилизации КА необходима для того, чтобы избежать угловых смазов в момент экспозиции объектов наблюдения.

В связи с этим актуальной задачей является разработка бесплатформенных измерителей вектора угловой скорости, применяемых в системах управления угловым движением КА и обладающих способностью измерять угловую скорость КА с точностью более 10^{-5} град/с в диапазоне до 2 град/с.

Научно-исследовательский институт прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова (НИИ ПМ) с середины 80-х годов ведет разработки гироскопических измерителей вектора угловой скорости (ГИВУС). В настоящее время прецизионные ГИВУС КИНД34-020 и КИНД34-027-01 работают в составе КА «Спектр-Р», «Экспресс-АМ», «Экспресс-МД», Sesat, KazSat, на российском модуле МКС и других КА прикладного назначения.

Однако применение этих приборов в КА ДЗЗ ограничено недостаточностью их диапазона измерения угловой скорости, который равен 0,5 град/с и тем, что дискретность выходной информации не позволяет вести измерение приращения угловой скорости точнее 10^{-5} град/с.

Чтобы удовлетворить потребности современной космонавтики, НИИ ПМ разрабатывает новый прибор КИНД34-064 типа ГИВУС с улучшенными точностными характеристиками.

Прибор имеет ряд существенных улучшений по сравнению с предыдущими моделями ГИВУС:

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

Шустов Игорь Евгеньевич. Кандидат технических наук, начальник сектора ФГУП «ЦЭНКИ» филиал «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова».

Казаков Борис Андреевич. Кандидат технических наук, главный научный советник ФГУП «ЦЭНКИ» филиал «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова». Действительный член Академии навигации и управления движением.

- 1) Существенно расширен диапазон измеряемой угловой скорости и уменьшена цена единицы выходной информации благодаря введению двухотсчетной системы измерения.
- 2) Снижен уровень собственных шумов прибора по выходной информации путем понижения полосы пропускания системы обратной связи измерительных каналов прибора в 5 раз – до 2 Гц и перевода системы термостатирования в линейный режим работы.
- 3) Уменьшена масса и улучшены тепловые режимы работы ГИВУС за счет применения принципа модульности конструкции.
- 4) Ресурс ГИВУС – 15 лет за счет применения гироскопа с газодинамической опорой ротора и высоконадежных отечественных и импортных электроаппаратов, работающих в облегченных режимах.

Назначение и характеристики ГИВУС

Разрабатываемый в НИИ ПМ р прецизионный гироскопический измеритель вектора угловой скорости КИНД34-064 предназначен для использования в крупногабаритных КА связи, дистанционного зондирования Земли и космических исследовательских модулях в целях измерения приращения интегралов от проекций вектора абсолютной угловой скорости космического аппарата (КА) на измерительные оси (оси чувствительности) чувствительных элементов прибора за время между его опросами со стороны системы управления КА. Такой метод измерения позволяет определять мгновенное значение угловой скорости, выбирать любой такт опроса прибора и накапливать измеренную информацию, благодаря чему исключается ее потеря между тактами опроса прибора.

В табл. 1 представлены основные характеристики прибора КИНД34-064 по сравнению со своим предшественником, прибором КИНД34-020.

Т а б л и ц а 1

Характеристики	КИНД34-020	КИНД34-064
1. Диапазон измерения входной угловой скорости, град/с	0,5	Более 2,0
2. Масштабный коэффициент (цена дискрета младшего разряда информации), угл.с	0,036	0,004
3. Стабильность масштабного коэффициента в течение 3 месяцев, %	0,01	0,01
4. Стабильность нулевого сигнала за 24 часа, град/ч (1σ)	0,001	0,0007 на малых $\omega_{вх}$ 0,007 – на всем диапазоне
5. Шум, угл.с (1σ)	$\pm 0,15$	$\pm 0,03$
6. Масса, кг	13	10
7. Срок активного существования на орбите, лет	10	15

Кинематическая схема ГИВУС

ГИВУС построен на базе двухстепенного поплавкового интегрирующего гироскопа КИНД99-003М разработки НИИ ПМ с газодинамической опорой ротора и магнитным центрированием поплавка. Данный чувствительный элемент обладает прецизионной точностью, малым значением собственного дрейфа, который составляет не более 3×10^{-3} град/ч и ресурсом в 150 тыс. часов.

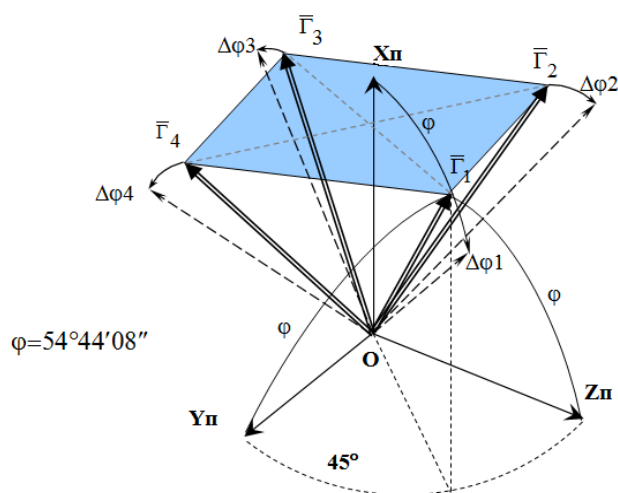


Рис. 1. Кинематическая схема прибора

Прибор имеет 4 измерительных канала и соответственно 4 гироскопа, оси чувствительности которых направлены по образующим конуса с углом полураствора, равным $54^{\circ}44'08''$, обеспечивающим одно и то же угловое отклонение всех четырех осей чувствительности относительно трех приборных осей на угол, равный данному. Для определения проекций угловой скорости КА на приборные оси достаточно информации

трех измерительных каналов, а их избыточное количество необходимо для обеспечения резервирования. В качестве приборной системы координат используется правая прямоугольная система координат $OX_пY_пZ_п$, материализованная элементами посадочного места на корпусе прибора, при этом ось $OX_п$ ортогональна посадочной плоскости прибора $OY_пZ_п$.

Ориентация осей приборной системы координат приведена на рис. 1. Здесь же показана номинальная ориентация измерительных осей Г1–Г4 чувствительных элементов прибора.

Особенности конструкции ГИВУС

Одной из приоритетных задач при разработке прибора являлась задача уменьшения габаритно-массовой характеристики прибора. Для этих целей при конструировании прибора был применен принцип модульности, в связи с чем:

- произведено конструктивное совмещение близких друг к другу по функциональным связям и по назначению электронных устройств;
- блоки электромонтажных колодок объемного исполнения почти полностью заменены электрическими разъемами СНП399-42;
- двухэтажная конструкция блока чувствительных элементов прибора КИНД34-020 заменена конструкцией, расположенной в одной плоскости.

Благодаря вышеуказанным мероприятиям масса прибора уменьшена примерно на 3 кг.

Измерительная система ГИВУС

В приборе реализован принцип двухотсчетной измерительной системы, благодаря чему удалось достичь существенного увеличения диапазона измеряемой угловой скорости и вместе с этим уменьшения цены единицы младшего разряда ГИВУС.

Схема измерительного канала прибора с такой измерительной системой представлена на рис. 2. При наличии входной угловой скорости $\omega_{вх}$ по оси чувствительности гироскопа $OX_{гз}$ возникает гироскопический момент (M_g) по оси прецессии $OY_{гз}$, который поворачивает поплавковую камеру гироскопа (ГБ).

Угол поворота фиксирует датчик угла (ДУ), переменный сигнал с которого поступает на предварительный усилитель (ПУ).

Сигнал усиливается и передается на усилитель обратной связи (УОС), осуществляющий фазочувствительное выпрямление и передающий его на блок преобразования информации (БПИ). Этот блок, анализируя свой входной сигнал, вырабатывает команды управления стабилизатором тока (СТ), который, в свою очередь, вырабатывает ток для датчиков момента (ДМ_{СТ}, ДМ_{МЛ}) старшей и младшей измерительных линеек. ДМ создают компенсирующий момент (M_K), который уравнивает M_T , тем самым останавливая поворот поплавковой камеры ГБ. БПИ на выход прибора выдает информацию старшей и младшей измерительных линеек в виде информационных импульсов ($N_{СТ}$, $N_{МЛ}$), количество которых пропорционально величине тока в ДМ_{МЛ} и ДМ_{СТ} и соответствует приращению угла поворота вокруг оси $OX_{ЧЗ}$ за такт опроса БПИ.

Уравнения движения для представленной системы измерения в установившемся режиме при $\omega_{ВХ} = \text{const}$ имеют следующий вид:

$$M_T = M_K \rightarrow \omega_{ВХ} H = K_{СТ} I_{СТ} + K_{МЛ} I_{МЛ} \rightarrow \omega_{ВХ} = \frac{K_{СТ} I_{СТ}}{H} + \frac{K_{МЛ} I_{МЛ}}{H}$$

или с учетом коэффициентов передачи электронных устройств измерительного канала:

$$\omega_{ВХ} = \frac{B \cdot N_{СТ}}{t_{ИЗМ}} + \frac{\beta \cdot N_{МЛ}}{t_{ИЗМ}},$$

где H – кинетический момент ротора гироскопа; $K_{СТ}$, $K_{МЛ}$ – коэффициенты передачи датчиков момента старшей и младшей измерительных линеек соответственно; $I_{СТ}$, $I_{МЛ}$ – ток протекающий в обмотках датчиков момента старшей и младшей измерительных линеек; B , β – масштабные коэффициенты старшей и младшей измерительных линеек; $N_{СТ}$, $N_{МЛ}$ – количество импульсов выходной информации старшей и младшей измерительных линеек; $t_{ИЗМ}$ – время измерения (такт опроса прибора).

Принцип работы двухотсчетной измерительной системы основан на том, что в измерении угловой скорости принимают участие одновременно две измерительные линейки. При этом старшая линейка обеспечивает измерение угловой скорости в полном диапазоне до 2 град/с, но делает это ступенчато, т.е. эта

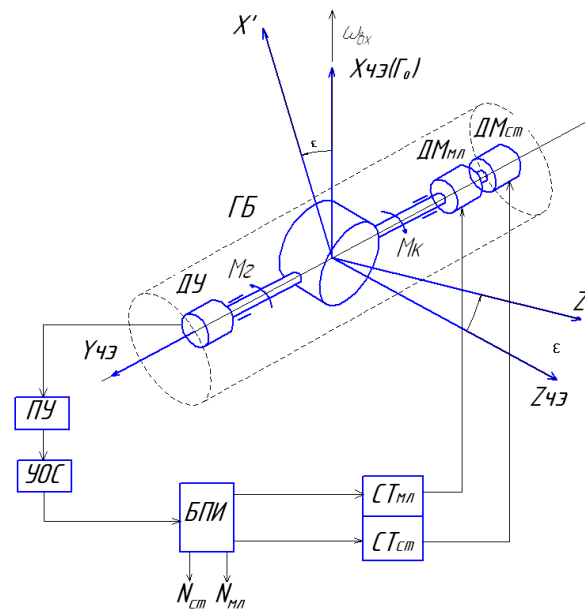


Рис. 2. Схема измерительного канала прибора:
 $X_{ЧЗ}Y_{ЧЗ}Z_{ЧЗ}$ – система координат, связанная с гироскопом в исходном положении; $X'Y'Z'$ – система координат, связанная с гироскопом после компенсации M_T ; ϵ – статическое отклонение поплавка гироскопа после компенсации M_T , которое составляет не более 5 угл. с

линейка имеет явно выраженную ступенчатую характеристику, всего 32 информационных импульса за такт работы 0,002 с.

Младшая линейка работает в диапазоне до 0,07 град/с (496 информационных импульсов за такт работы 0,004 с) и дополняет результат измерения старшей линейки внутри одной ступеньки ее характеристики, независимо от того, в какой точке характеристики старшей линейки остановился ее отсчет, включая и точку максимальной измеряемой угловой скорости 2 град/с.

При значении входной угловой скорости большем, чем диапазон измерения прибора, обе измерительные линейки будут выдавать свой максимум информационных импульсов, т.е. 32 и 496 импульсов за такт своей работы.

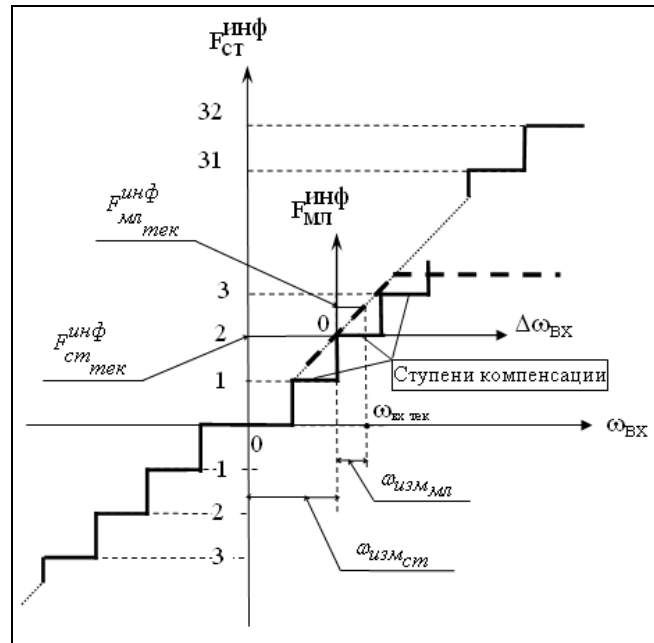


Рис. 3. Принцип работы двухотсчетной измерительной системы

Полный результат измерения прибором текущей угловой скорости складывается из показаний обеих линеек $\omega_{\text{вх тек}} = \omega_{\text{изм мл}} + \omega_{\text{изм ст}}$. Вышеизложенный принцип схематично представлен на рис. 3, где показана зависимость количества импульсов выходной информации старшей линейки $F_{\text{ст инф}}$ измерительного канала ГИВУС от входной угловой скорости $\omega_{\text{вх}}$ и зависимость количества импульсов младшей линейки $F_{\text{мл инф}}$ от угловой скорости, не измеренной старшей линейкой $\Delta\omega_{\text{вх}} = \omega_{\text{вх}} - \omega_{\text{изм ст}}$.

В итоге характеристика измерительного канала в целом будет приближена к идеальной линейной характеристике. При этом чувствительность канала будет одинаково высокой за счет работы точной младшей линейки при любой величине входной угловой скорости вплоть до 2 град/с.

Результаты испытаний измерительного канала

На сегодняшнее время проведены точностные испытания одного измерительного канала прибора КИНД34-064, собранного по штатной документации. Полученные результаты основных параметров прибора представлены в табл. 2.

Параметр	Полученное значение	Допуск по ТУ
Нулевой сигнал, угл.с/с	0,5	Не более 1,8 по модулю
Цена дискрета младшего разряда информации, угл.с	0,0036	0,003-0,005
Стабильность нулевого сигнала за 24 часа, град/ч (1σ)	0,0004	0,0007
Шумовая составляющая выходного сигнала, угл.с	0,02	Не более 0,03
Диапазон старшей линейки	2,561	Не менее 2,00
Диапазон младшей линейки	0,126	Не менее 0,1
Полоса пропускания прибора, Гц	2	1,5-2,5

Все параметры прибора удовлетворяют требованиям ТУ и даже имеют некоторый запас.

Одним из важнейших параметров прибора является стабильность нулевого сигнала ИК прибора в запуске длительностью 24 ч. Длительность запуска для оценки нулевого сигнала выбрана исходя из того, что на борту КА один раз в сутки производится калибровка всех ИК прибора, поэтому стабильность нулевого сигнала необходимо обеспечить именно в течение суток. На рис. 4 представлен график стабильности нулевого сигнала ИК прибора через 3 ч после его включения.

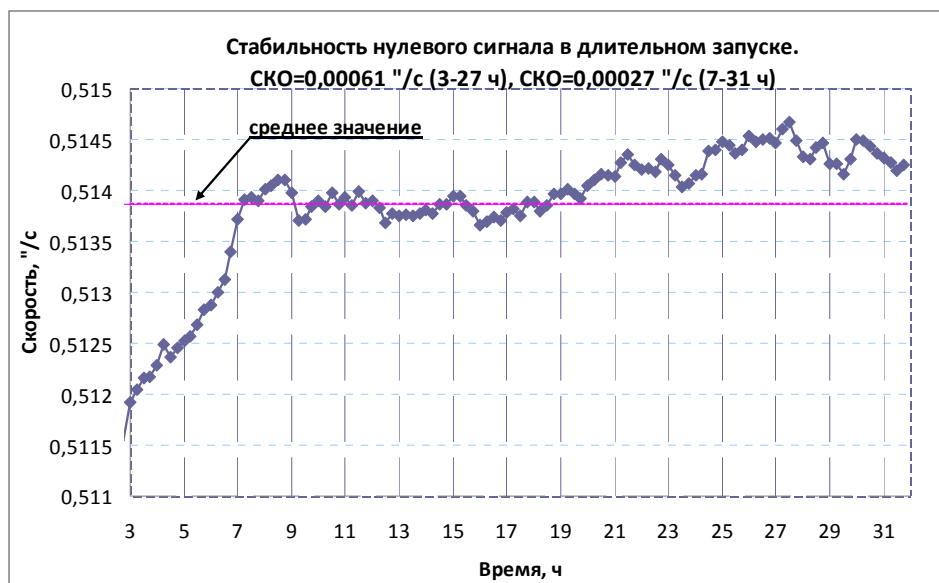


Рис. 4. Стабильность нулевого сигнала ИК

Среднее квадратическое отклонение нулевого сигнала за 24 ч и через 7 ч после включения прибора при оценке по 1σ составляет всего 0,00027 угл.с/с, что в два раза меньше допуска, установленного на данный параметр, равного 0,0007 угл.с/с.

Выводы

1. В НИИ прикладной механики им. академика В.И. Кузнецова создается прибор КИНД34-064 с точностными и эксплуатационными характеристиками,

удовлетворяющими потребности систем управления современных космических аппаратов.

2. В приборе КИНД34-064 успешно применен принцип двухотсчетной измерительной системы, позволивший значительно расширить диапазон измерения прибора и уменьшить величину дискрета младшего разряда выходной информации.

3. Прибор КИНД34-064 имеет ряд существенных преимуществ над прибором-предшественником в части точностных характеристик, в том числе:

- уменьшенную шумовую составляющую выходного сигнала;
- повышенную стабильность нулевого сигнала;
- уменьшенную цену дискрета младшего разряда выходной информации;
- увеличенный диапазон измерения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Эскизный проект** на прибор КИНД34-064, КИНД.Э001.2577 / Б.А. Казаков [и др.]. –М.: ФГУП «ЦЭНКИ» НИИ ПМ, 2009 (на правах рукописи).
2. **Опыт** создания высокоточных поплавковых гиросприборов, применяемых в системах угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов и станций / А.А. Волинцев [и др.] // X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. - С. 226-234.
3. **Повышение** точности и диапазона измерения прецизионных гироскопических измерителей вектора угловой скорости на базе поплавковых чувствительных элементов / А.А. Волинцев [и др.] // XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. - С. 114-123.
4. **Волинцев, А.А.** Повышение точности и диапазона измерения гироскопических измерителей вектора угловой скорости / А.А. Волинцев, Б.А. Казаков, И.Е. Шустов // Лесной вестник. - 2009. - №6 (69). - С.102-106.
5. **Протокол** определения точностных параметров ИК прибора КИНД34-064, КИНД.Э001.3620 / В.Ю.Успенский [и др.]. - М.: ФГУП «ЦЭНКИ» НИИ ПМ (на правах рукописи), 2012.

Abstract. The article describes the design and operation of two-speed measurement system of KIND34-064 rate gyro for spacecraft control systems developed at Kuznetsov Research Institute for Applied Mechanics. Key design features are covered, and results from accuracy tests of one measurement channel are provided.

Key words: Floated gyro, two-speed measurement system, precision, measurement range

Материал поступил 17.12.12