

УДК 531.383

Разработка микромеханического ДУС тактического класса точности

Тимошенко А.С., Анчутин С.А., Кочурина Е.С., Мусаткин А.С.,
Виноградов А.И., Каменский А.М., Михеев А.В., Петрова Н.А.

Аннотация.

В статье представлены результаты разработки микромеханического ДУС тактического класса точности. Приведено описание состава, разработанного микромеханического ДУС, описаны элементы технологии производства резонатора. Изложено описание схемы обработки сигналов и основных узлов, входящих в ее состав. Показана схема разработанного автоматизированного стенда, проанализированы полученные результаты исследований.

Ключевые слова: Микромеханический датчик, кольцевой резонатор, схема обработки сигналов, автоматизированный стенд, результаты исследований.

Design of tactical grade MEMS rate sensor

Timoshenkov A.S., Anchutin S.A, Kochurina E.S., Musatkin A.S., Vinogradov A.I.,
Kamenskiy A.M., Miheev A.V., Petrova N.A.

There are results of design the tactical accuracy class micromechanical angular rate sensor (ARS), description of the structure of designed ARS and the technology of making oscillator in this article. An electronic control loop and its parts are discussed. Automated test bench is shown; experimental results are analyzed.

Keywords: Micromechanical sensor, vibrating ring, electronic control loop, automated test bench, experimental results

ООО «Лаборатория Микроприборов» (ООО «ЛМП») занимается разработкой, производством, внедрением и реализацией научно-технической

продукции в области инерциальной микромеханики. Основная сфера деятельности предприятия – создание инерциальных датчиков и систем, однако развиваются и сопутствующие компетенции в области программного обеспечения и методологии проведения калибровки и испытаний инерциальных измерительных систем. Продукция компании ориентирована на рынок гражданских и специальных применений инерциальных технологий. Особенностью продукции является то, что она занимает нишу на стыке дешёвых систем широкого потребления и высокоточных дорогих систем на основе волоконно-оптических, лазерных и других гироскопов, формируя конкурентно привлекательный продукт с хорошим соотношением цена–качество.

Среди продукции компании выделяются микромеханические датчики угловой скорости с чувствительным элементом собственного производства. Это позволяет гибко модернизировать ДУС для максимально полного удовлетворения потребностей заказчиков. Кроме того, такой подход позволяет в значительной мере снизить негативный эффект зависимости от импортных инерциальных датчиков.

Волновые твердотельные гироскопы в микромеханическом исполнении обладают уникальным сочетанием свойств: высокая надежность, высокая стабильность параметров в условиях воздействия внешних механических (одиночные удары до 7000g) и климатических факторов (диапазон рабочих температур $-50...+125^{\circ}\text{C}$). При этом микромеханические ДУС (МДУС), производства ООО «ЛМП», являются датчиками тактического класса точности.

МДУС состоит из чувствительного элемента (резонатора) и схемы обработки сигнала (рисунок 1).

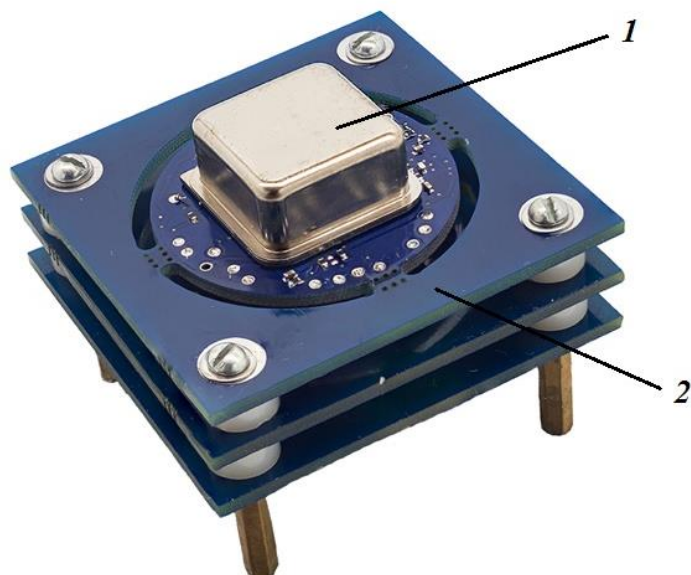


Рисунок 1 – Состав микромеханического ДУС: 1 - чувствительный элемент (резонатор), 2 - схема обработки сигнала

ООО «Лаборатория Микроприборов» обладает опытом разработки и изготовления резонаторов микромеханических датчиков угловой скорости.

Резонатор МДУС представляет собой кольцевидную форму из монокристаллического кремния с упругим подвесом, размещенный в постоянном магнитной поле: кольцо подвешено к основанию при помощи восьми торсионов. Методом анодного сращивания кристалл соединен со стеклянной подложкой таким образом, чтобы кольцо кремниевого резонатора было расположено в однородном постоянном магнитном поле. Магнитное поле образует магнитная система, состоящая из кобальто-самариевого магнита, верхнего и нижнего магнитопроводов, изготовленных из магнитомягкого материала. Магнитная цепь разработана таким образом, чтобы образовать максимальное однородное магнитное поле в зоне расположения кольца резонатора (следовательно, и проводников, расположенных на поверхности резонатора), и таким образом повысить его чувствительность. Для повышения добротности кольцевого резонатора внутренний объем корпуса вакуумируется.

Ключевой операцией при изготовлении резонатора МДУС является операция глубокого травления кремния, которая отличается качественным

воспроизведением геометрического профиля, высокой скоростью травления. При этом достигается высокое качество поверхности (шероховатость) как боковых сторон профиля, так и его дна. В процессе глубокого плазмохимического травления поверхность пластины бомбардируется ионами и нейтральными частицами, в том числе химически активными, за исключением случаев применения инертного газа. Для проведения процессов травления канавок в кремнии на глубину до 100мкм и более с вертикальными стенками в ООО «ЛМП» используется «Bosch» процесс. Его суть состоит в многократном повторении двухстадийного цикла травления. В первой стадии цикла производится травление кремния через маску на сравнительно небольшую глубину. Во второй стадии цикла производится пассивация стенок протравленного профиля. Травление элементов микроструктур проводится на установке глубокого травления AMS200 Alcatel. Достигнуты следующие параметры травления:

- скорость травления до 10мкм/мин;
- однородность травления $\pm 2,5\%$;
- угол наклона профиля $90^\circ \pm 1^\circ$.

На рисунке 2 показаны фрагменты изготовленного резонатора МДУС.

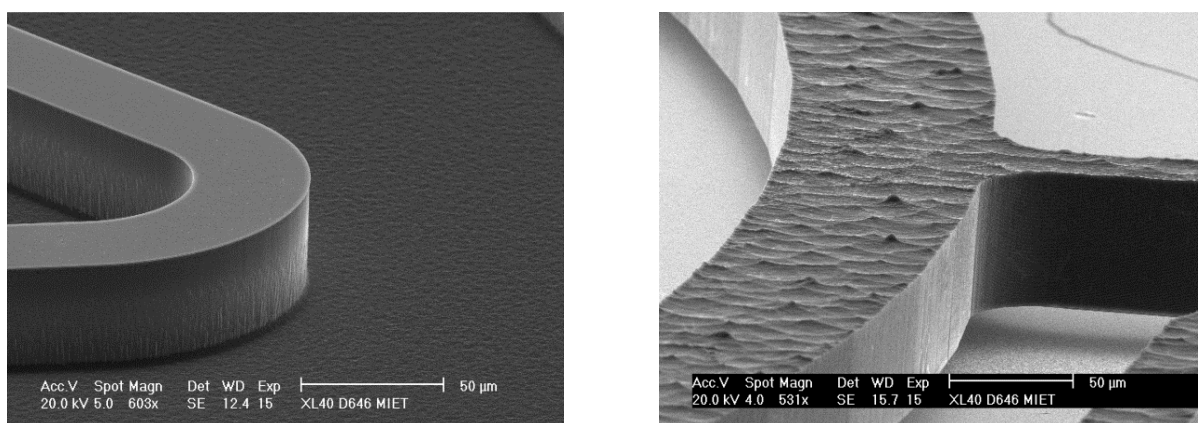


Рисунок 2 – Фрагменты резонатора МДУС

Принцип работы МДУС основан на инертных свойствах стоячих упругих волн, возбуждаемых в осесимметричных оболочках. Для работы МДУС используется вторая форма собственных колебаний. При помощи датчиков

управления возбуждается первичная волна (рисунок 3а). При вращении резонатора вследствие инертных свойств волн, возникает вторичная волна (рисунок 3б). Результирующая волна представляет собой суперпозицию двух описанных волн, которые повернуты друг относительно друга на угол $\pi/4$.

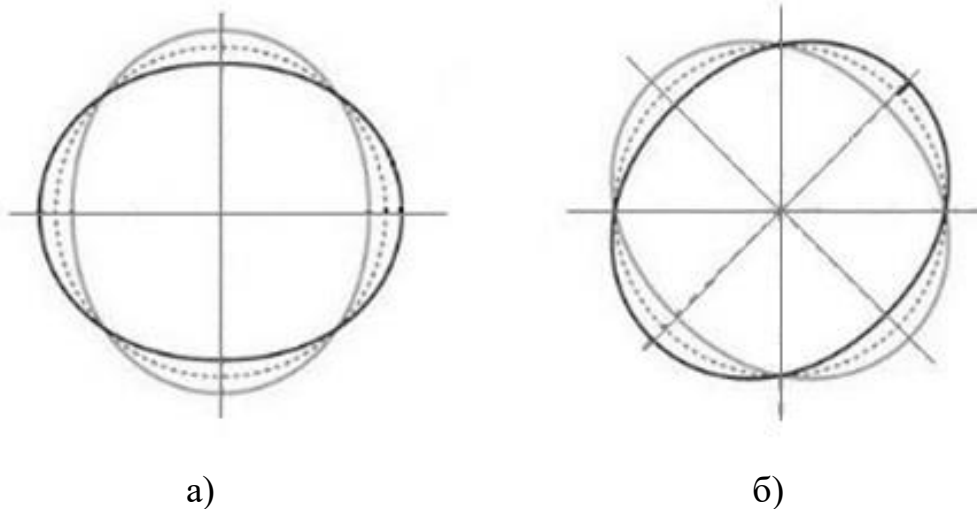


Рисунок 3 – Формы колебаний резонатора: а) первая; б) вторая

Инерциальная информация определяется по измерениям колебаний резонатора. В режиме вынужденных колебаний вычисляется угловая скорость гироскопа относительно инерциального пространства, то есть гироскоп функционирует в режиме датчика угловой скорости. Радиальное смещение элемента резонатора определяется формулой: $\omega(\varphi, t) = p(t)\cos(2\varphi) + q(t)\sin(2\varphi)$.

Математическая модель резонатора МДУС имеет вид [1]:

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \frac{36}{5}k^2\xi\dot{p}(t) + \frac{36}{5}k^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) = \frac{1}{5}Hi_1(t) \\ \ddot{q}(t) + \frac{36}{5}k^2\xi\dot{q}(t) + \frac{36}{5}k^2q(t) + \frac{8}{5}\Omega p(t) = \frac{1}{5}Hi_2(t) \\ E_1 = 2B\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}R + \frac{\pi+2}{8}p(t)\right)\dot{p}(t) + 2B\frac{\pi+2}{8}\dot{q}(t)q(t) \\ E_2 = 2B\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}R + \frac{\pi+2}{8}q(t)\right)\dot{q}(t) + 2B\frac{\pi+2}{8}p(t)\dot{p}(t) \end{cases} \quad (1)$$

$k = \sqrt{EJ / \rho SR^4}$, $\xi = 1 / \omega_0 Q$, $H = 4B\sqrt{2} / \pi \rho S$, Ω – проекция угловой скорости вращения основания кольцевого резонатора на нормаль к плоскости резонатора, B – напряженность магнитного поля в области расположения кольцевого резонатора, E_1, E_2 – ЭДС в контуре первичных и вторичных колебаний, i_1, i_2 – ток в контуре первичных и вторичных колебаний, R – радиус кольцевого

резонатора, S – площадь поперечного сечения кольцевого резонатора, ρ – плотность материала кольцевого резонатора, E – модуль Юнга материала кольцевого резонатора, Q – добротность кольцевого резонатора.

Для управления колебаниями резонатора и обработки его выходного сигнала нами разработана схема (рисунок 4).

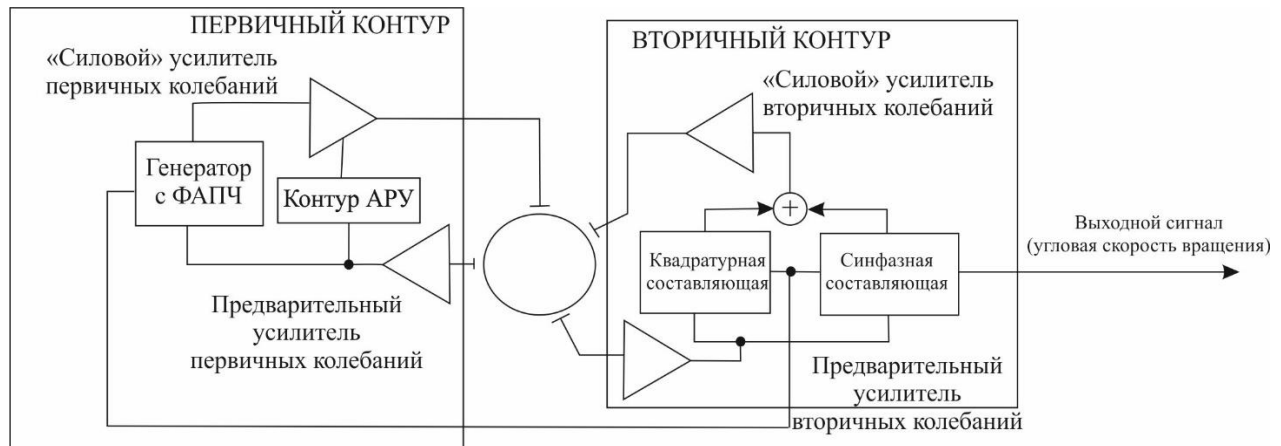


Рисунок 4 – Схема управлениями колебаниями резонатора и обработки его выходного сигнала

Первичный контур служит для возбуждения колебаний в резонаторе МДУС (рисунок 3а). Этот контур включает в себя предварительный усилитель, генератор с фазовой автоподстройкой частоты, цепь стабилизации амплитуды первичных колебаний (АРУ) и «силовой» усилитель. Генератор с фазовой автоподстройкой частоты (рисунок 5) состоит из синхронного демодулятора (фазового детектора) и генератора, управляемого напряжением (ГУН).



Рисунок 5 - Генератор с фазовой автоподстройкой частоты

Эта цепь образует контур отрицательной обратной связи и позволяет автоматически настраивать частоту ГУН на резонансную частоту ЧЭ. Это достигается за счет поддержания разности фаз между выходом предварительного усилителя первичных колебаний и выходом «силового усилителя, равной 90° , что является условием резонанса ЧЭ.

Цепь АРУ (рисунок 6) образует контур отрицательной обратной связи и позволяет автоматически стабилизировать амплитуду первичных колебаний на заданном уровне (U_A). Синхронизация осуществляется от генератора с ФАПЧ.

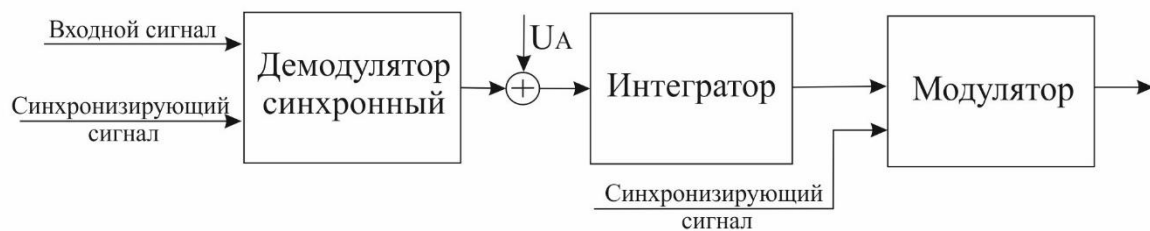


Рисунок 6 – Контур стабилизации первичных колебаний.

Контур компенсации служит для подавления вторичных колебаний в резонаторе, вызванных действием ускорения Кориолиса. При этом амплитуда напряжения, необходимая для подавления вторичных колебаний пропорциональна угловой скорости вращения МДУС. Контур компенсации состоит из двух цепей: подавления синфазной и квадратурной составляющих вторичных колебаний. Цепь подавления синфазной составляющей вторичных колебаний (рисунок 7) необходима для компенсации сигнала, вызванного наличием погрешностей изготовления резонатора.

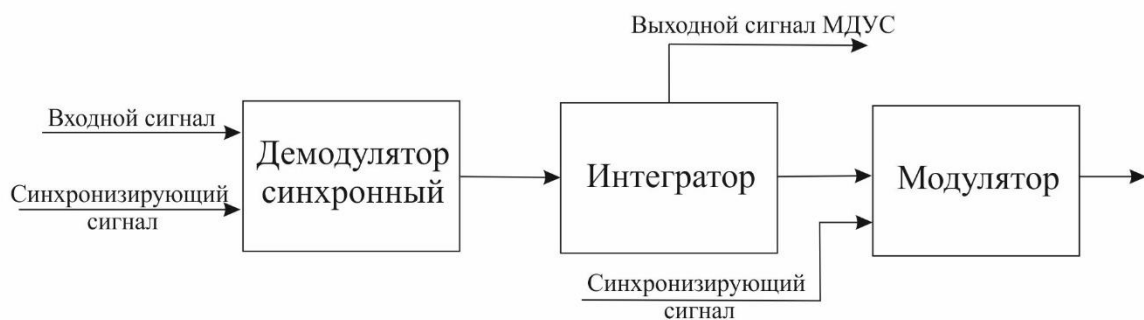


Рисунок 7 – Цепь подавления синфазной составляющей вторичных колебаний

Цепь подавления квадратурной составляющей вторичных колебаний (рисунок 8) необходима для компенсации сигнала, вызванного вращением МДУС. Напряжение U_B позволяет подстраивать смещение нуля датчика.

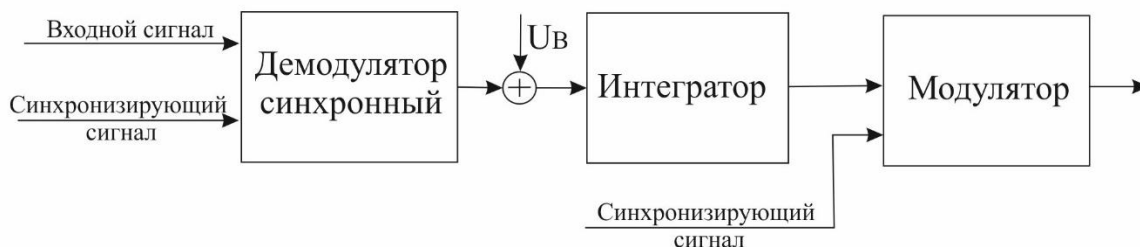


Рисунок 8 – Цепь подавления квадратурной составляющей вторичных колебаний

Выход интегратора (рисунок 7) используется в качестве выходного сигнала МДУС.

Функциональная модель МДУС имеет вид:

$$U = K \cdot \Omega + U_0 + W \quad (2)$$

Здесь U - выходное напряжение МДУС, K - масштабный коэффициент, Ω - проекция угловой скорости вращения МДУС на измерительную ось, U_0 - смещение нуля, W - случайная составляющая выходного сигнала (шум).

Случайная составляющая выходного сигнала рассматривается как комбинация (3) низкочастотного дрейфа смещения нуля σ_{bias} (шум вида “1/f”), «белого шума» σ_{ARW} . Масштабный коэффициент и смещение нуля зависят от температуры окружающей среды. Для компенсации температурных погрешностей МДУС в схеме предусмотрен датчик температуры.

$$\sigma_W^2 = \sigma_{bias}^2 + \sigma_{ARW}^2 \quad (3)$$

Для определения параметров МДУС (математических моделей (2,3)) собран стенд на базе одноосного поворотного стола Acutronic AC1120S и камеры тепла-холода (рисунок 9).

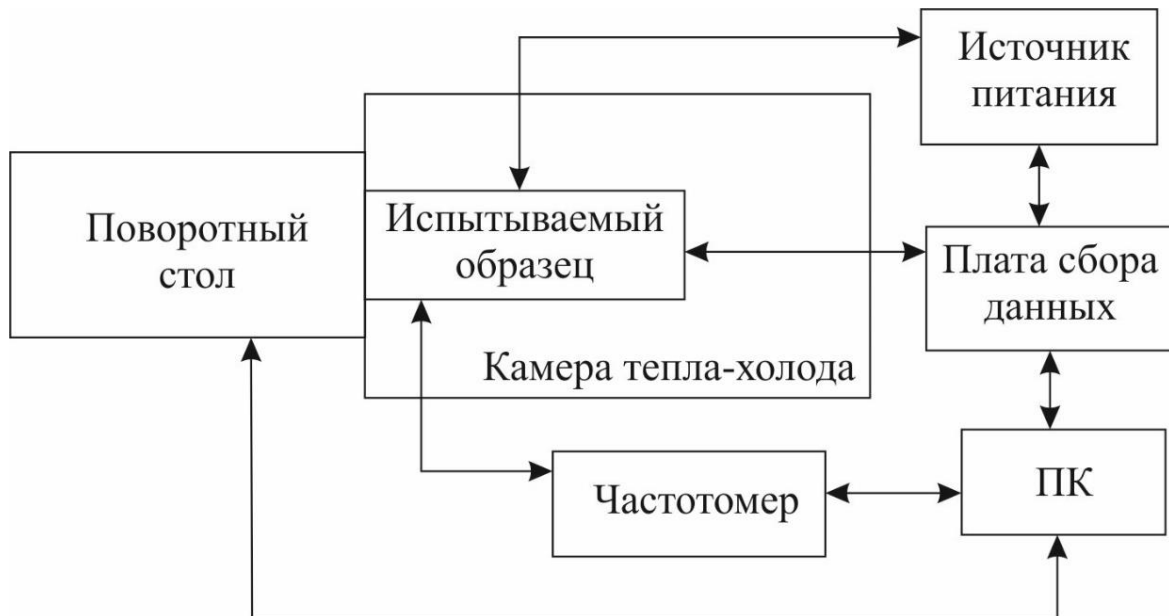


Рисунок 9 – Стенд для определения параметров МДУС

Были проведены лабораторные исследования МДУС, входящего в состав геодезического инерциального модуля МГ-25 (производства ООО «ЛМП»).

Диаграмма Аллана показана на рисунке 10. Нестабильность смещения нуля в запуске составила $\sigma_{bias} = 0,15^\circ/\text{ч}$, случайный шум $\sigma_{ARW} = 0,035^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

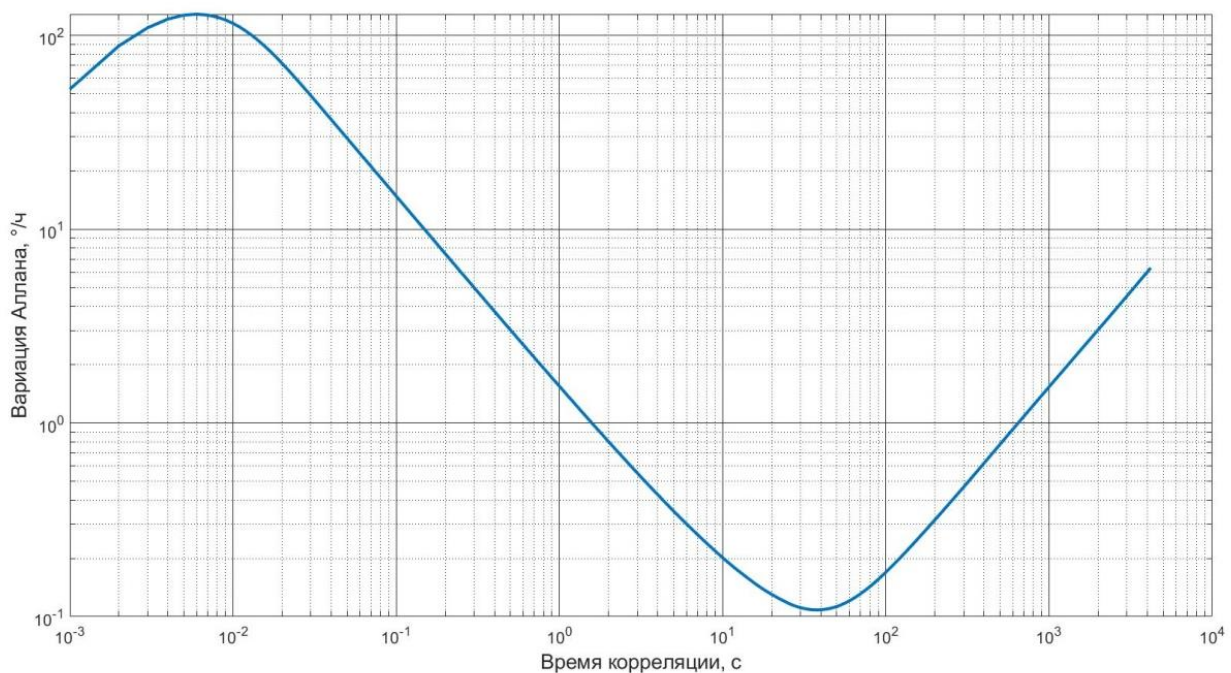


Рисунок 10 - Диаграмма Аллана МДУС

Дрейф выходного сигнала МДУС за 4 часа показан на рисунке 11. Сигнал был обработан с помощью ФНЧ с частотой среза 1Гц. Видно, что дрейф вызван в основном изменением температуры окружающей среды за время эксперимента.

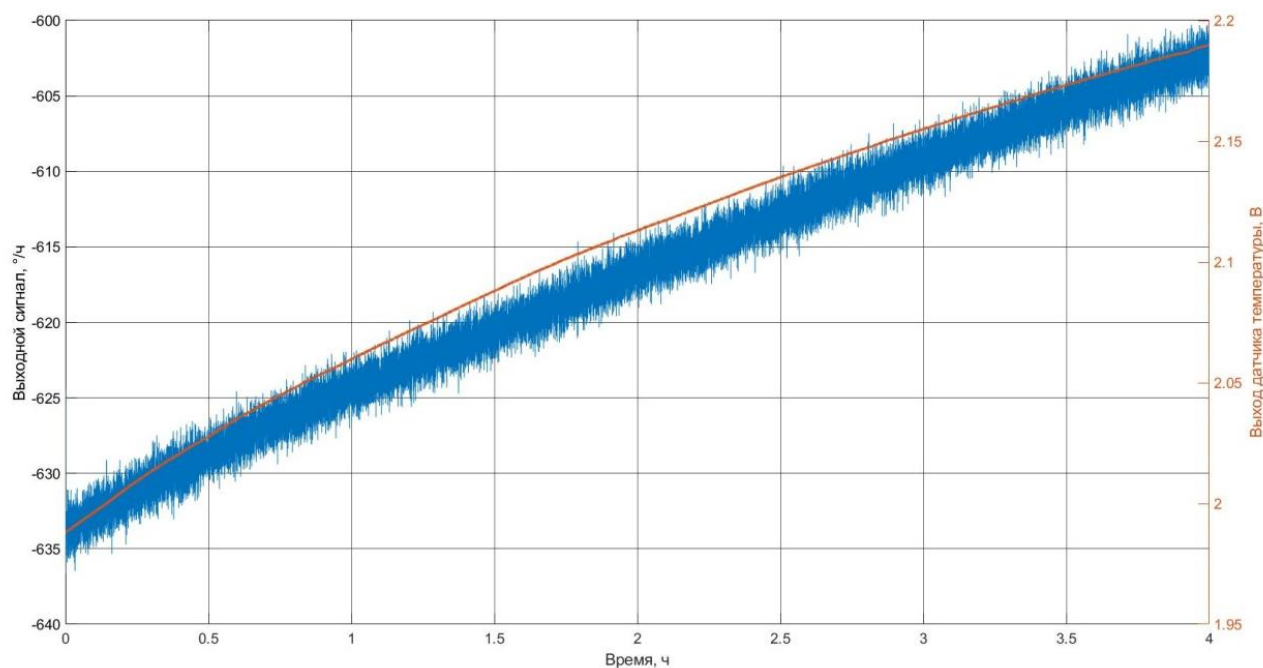


Рисунок 11 - Дрейф выходного сигнала МДУС

Результаты испытания МДУС при изменении температуры окружающей среды показаны на рисунке 12.

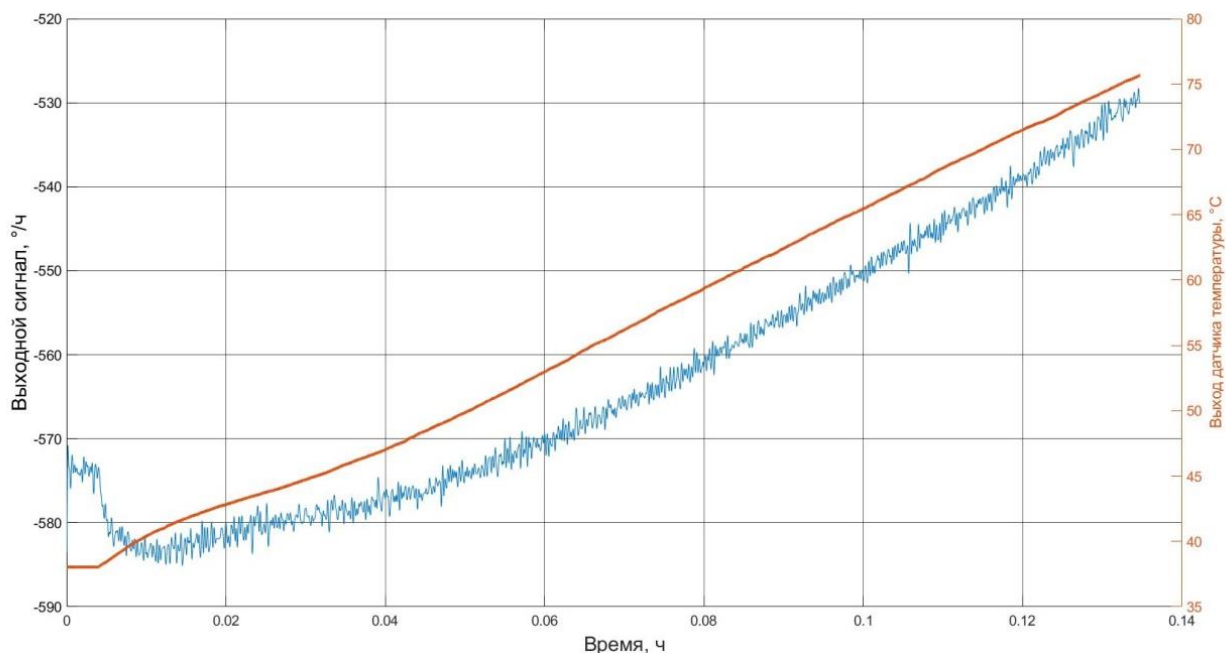


Рисунок 12 – Дрейф выходного сигнала МДУС при изменении температуры окружающей среды

После компенсации температурной погрешности МДУС с использованием встроенного датчика температуры, дрейф выходного сигнала не превышает $\pm 5^\circ/\text{ч}$ (рисунок 13).

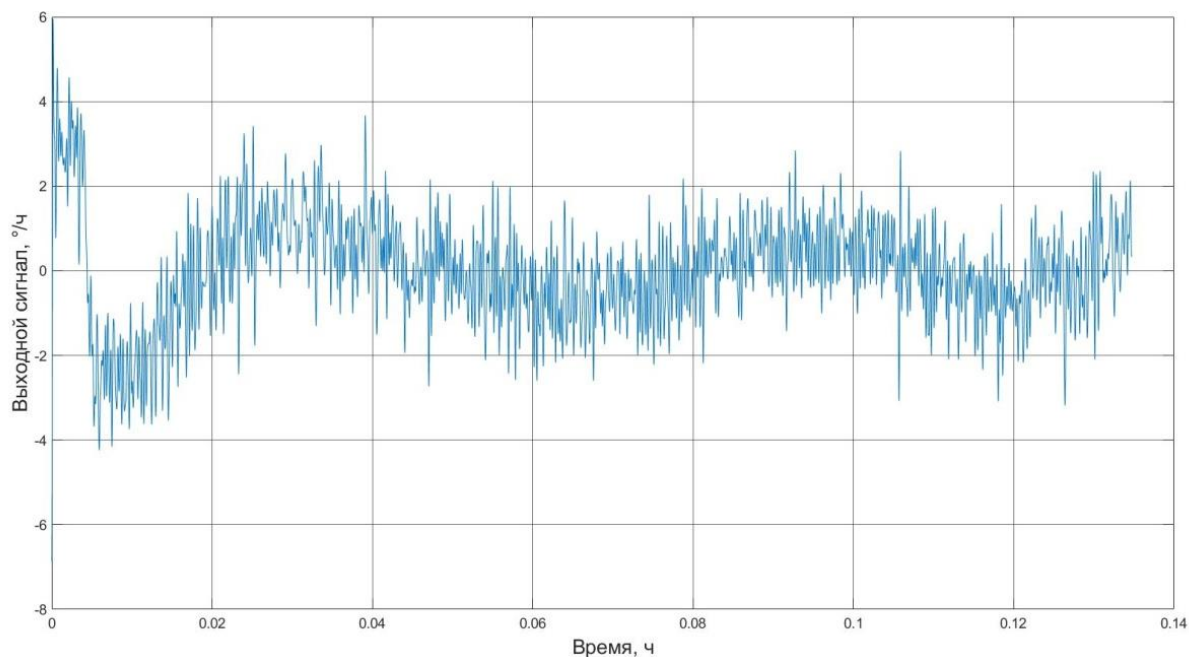


Рисунок 13 – Дрейф выходного сигнала после компенсации

Результаты испытаний сведены в сравнительную таблицу (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты испытаний разработанного МДУС и сравнение с аналогами.

Параметр	МДУС ООО «ЛМП» (г.Зелено град)	CRH02 Selicon Sensin g (United Kingdo m)	CRS09 -01 Selico n Sensin g (Unite d Kingd om)	STIM3 00 Senson or (Norwa y)	ADXRS 646 Analog Devices (USA)	ММГ-ЭП1 ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электро- прибор» (г.Санкт- Петербург»	ДУСУ- М ПАО АНПП «ТЕМП- АВИА» (г.Арзам ас)
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	±200	±200	±200	±400	±300	450	±180
Масштабный коэффициент, мВ/(°/с)	10	10	10	-	9		28
Смещение нуля, °/с	0.58	±1	±1	±0.07	±33	-	2.6
Нелинейность, %	0.013	±0.05	<0.1%	0.005	0.01%	0.4%	±2%
Случайный шум (ARW), °/√ч	<0.04	0.017	<0.1	0.15	0.9	0.6	-
Нестабильность нуля, °/ч	0.15	0.12	<3	0.5	12	<10	-
Полоса частот, Гц	>50	100	>30	262	1000	100	-
Дрейф смещения нуля в диапазоне рабочих температур, °/ч	<±5 (после компенса ции) ±720 (без компенса ции)	±720 (без компе нсации)	<3600 (без компе нсаци и)	5	±10800(без компенс ации)	-	-
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+85	- 40...+8 5	- 40...+ 85	- 40...+8 5	- 40...+10 5	-55...+85	- 60...+70
Напряжение питания, В	5	5	5	5	6	5	±15
Потребление, Вт	<0.35	<0.35	<0.5	<2	0.024	<0.3	3.75

ВЫВОД:

Опытные образцы МДУС по характеристикам сопоставимы с аналогами и могут успешно использоваться в геодезии, в составе инерциальных модулей, например, таких как МГ-25, состоящий из блока акселерометров, блока гироскопов и позволяет определить направление на север и углов отклонения от вектора силы тяжести Земли g .

Список использованных источников:

1. Тимошенко С.П., Анчутин С.А., Плеханов В.Е., Кочурина Е.С., Тимошенко А.С., Зуев Е.В. Разработка математического описания кольцевого микрогироскопа // Нано- и микросистемная техника. 2014. Т.5. С.18-25.
2. Сыроева С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения //Компоненты и технологии. №6. 2014. С.40-46.
3. <https://www.siliconsensing.com/media/1181/crh02-00-0100-132-rev-2.pdf>.
4. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXRS646.pdf>.
5. <http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/mikromekhanicheskie-chuvstvitelnye-elementy-i-moduli/mmg-ep1-mikromekhanicheskiy-giroskop>.
6. <http://www.temp-avia.ru/index.php/katalog-produktsii>.

Сведения об авторах:

1. Алексей Сергеевич Тимошенко, д.т.н., генеральный директор
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: porcuapa@gmail.com;
2. Степан Александрович Анчутин, вед. инженер
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: step305@mail.ru;
3. Елена Сергеевна Кочурина, к.т.н., метролог
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: kochurinaes@gmail.com;
4. Александр Сергеевич Мусаткин, аспирант, инженер
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: Musatkin.A@hotmail.com;
5. Анатолий Иванович Виноградов, технолог
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: plavec@list.ru;
6. Александр Михайлович Каменский, вед. инженер
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: ak@mp-lab.ru;
7. Андрей Владимирович Михеев, технический директор
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: am@mp-lab.ru;
8. Надежда Алексеевна Петрова, инженер-конструктор
ООО «Лаборатория Микроприборов», e-mail: npetrova@mp-lab.ru;