

Научно-технический центр «Информтехника» –
филиал ФГУП «ВНИИ «Центр»

ОБОРОННАЯ ТЕХНИКА

7
8

2021



Ю. М. САЗЫКИН



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ВНИИ СИГНАЛ



ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

ЗАКАМЕННЫХ Георгий Иванович – генеральный директор АО «ЦНИИ «Буревестник», главный конструктор наземной артиллерии и миномётов, д-р техн. наук, профессор, академик РАН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

ДУБОВОЙ Николай Дмитриевич – главный научный сотрудник АО «ЭЛВИС», д-р техн. наук, профессор

ЗЕЛЕНЦОВ Валентин Викторович – советник при ректорате МГТУ им. Н. Э. Баумана, канд. техн. наук, доцент. Заместитель главного редактора

ИВАНОВ Владимир Петрович – первый заместитель генерального директора – заместитель по науке АО «НПО ГИПО», д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент АН РТ

КАЛУГИН Владимир Тимофеевич – руководитель НУК СМ МГТУ им. Н. Э. Баумана, декан факультета «СМ», д-р техн. наук, профессор

КАРАЧЁВ Александр Анатольевич – заместитель директора по научной работе НТЦ «Информтехника» – филиала ФГУП «ВНИИ «Центр», канд. техн. наук, профессор

КАШИН Валерий Михайлович – заместитель генерального директора АО «НПО «Высокоточные комплексы» – генеральный конструктор АО «НПК «КБМ», д-р техн. наук, член-корреспондент РАН, академик РАН

ЛЕПИН Владимир Николаевич – генеральный директор управляющей организации АО «НПК «Техмаш», д-р техн. наук, доцент, член-корреспондент РАН

МАКАРЦЕВА Наталия Васильевна – начальник редакционно-издательского отдела НТЦ «Информтехника» – филиала ФГУП «ВНИИ «Центр». Заместитель главного редактора, ответственный секретарь

РАЗИН Александр Фёдорович – генеральный директор – главный конструктор АО «ЦНИИСМ», д-р техн. наук

СЕМАШКИН Евгений Николаевич – учёный секретарь НТС, начальник отдела АО «КБП им. академика А. Г. Шипунова», д-р техн. наук, профессор

СЛОБОДЧИКОВ Владимир Николаевич – заместитель управляющего директора – технический директор АО «КБТочмаш им. А. Э. Нудельмана», д-р техн. наук

СОЛУНИН Виктор Леонидович – заместитель генерального директора – научный руководитель АО «ЦНИИАГ», д-р техн. наук, действительный член РАН

ФИЛИППОВ Сергей Иванович – советник генерального директора АО «ВНИИ «Сигнал», канд. техн. наук

ШАПОВАЛОВ Анатолий Борисович – генеральный директор и главный конструктор АО «ЦНИИАГ», д-р техн. наук

ОБОРОННАЯ № 7-8 ТЕХНИКА 2021

Научно-технический сборник
Издаётся с 1937 года
Выходит ежемесячно

Выпуск подготовлен АО «ВНИИ «Сигнал» по докладам V Всероссийской научно-технической конференции по перспективам развития систем ориентирования, навигации и управления движением наземных подвижных объектов «НАВИГАЦИЯ - 2021», посвящённой памяти первого директора ВНИИ «Сигнал», доктора технических наук, профессора, лауреата Ленинской премии, лауреата Государственной премии СССР, заслуженного изобретателя РСФСР, заслуженного конструктора РФ **Сазыкина Юрия Михайловича**, которая состоится 24 - 26 ноября 2021 года в г. Суздале Владимирской области

Редакторы:

Л. В. Вавилова, Т. Е. Горячева,
О. В. Никитина

Художественный редактор

А. А. Савиных

Корректор

Т. Е. Горячева

Компьютерный набор

И. В. Чуркина

Компьютерная верстка

А. А. Косоротикова

Набор и верстка автоматизированные.

Отпечатано в типографии

НТЦ «Информтехника» -
филиала ФГУП «ВНИИ «Центр»

Телефон: +7-495-662-54-44
доб. 301 - зам. главного редактора
доб. 326 - редакционно-издательский отдел
Факс: 8-495-651-06-14
E-mail: otntc@inform-teh.ru
aas@inform-teh.ru



© НТЦ «Информтехника» –
филиал ФГУП «ВНИИ «Центр»



Пи
АО
Ш
пер
Фи
сов
Ма
НП
Ни
нач

Нов
АО
Ива
кон

Баг
уче

3

10

21

29

40

53

59

- 65 Никитина К. А., Есипенко И. А.** Применение искусственной нейронной сети для дифференциации теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа
- 69 Чернодаров А. В., Патрикеев А. П., Иванов С. А.** Контроль и защита инерциально-спутниковых навигационных систем от преднамеренных помех
- 75 Холопов Е. Ю., Никифоров М. Б., Новиков А. И.** Бесконтактное управление техническими системами специального назначения
- 81 Гаврилов А. В., Пантелеев А. В.** Результаты применения обзорно-прицельного комплекса в боевой машине ближнего радиуса действия
- 87 Валиков П. И., Гаврилова В. С., Куделькин А. Е., Степанов Б. В.** Расширение эксплуатационных возможностей гидрообъемных передач систем управления движением
- 89 Зобачев Д. Ю., Колеватов А. П., Хотько О. А.** Об изменении методики контроля погрешности определения угла курса при выполнении начальных выставок на различных румбах методом гирокомпасирования
- 95 Кобзев А. А.** Структурное представление систем автоматического управления с комплементарным управлением
- 102 Мартынов О. В., Карпенков А. С.** Определение скорости наземного транспортного средства по изменению данных видеопотока
- 110 Яковенко Н. Г., Смирнов И. А., Конзалаева Д. Д.** Автоматизированная прокладка маршрута для группы роботов методом потенциалов
- 117 Норсеев С. А.** Подходы к навигации робототехнической системы, движущейся в составе группы
- 124 Анчутин С. А., Мусаткин А. С., Кочурина Е. С., Михеев А. В., Тимошенко А. С.** Исследование неустойчивости датчика угловой скорости ТГ-100
- 131 Косторной А. Н., Крючкова Е. А., Бабаев Е. В.** Разработка микромеханических датчиков для бесплатформенных инерциальных систем. Технологические особенности изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков в АО «ИТТ»
- 138 Куликов О. Е., Елисеев А. Д., Мусатов Р. Л.** Разработка системы управления электродвигателем топливного насоса
- 141 Родионов Р. В., Кобзев А. А., Баталов А. В.** Алгоритм автоматической идентификации параметров электродвигателя
- 147 Сысоев С. Н., Федин А. В., Федина М. А.** Пусковая установка для БПЛА с торообразным приводом
- 151 Кузьмина Н. В., Тарасов С. М., Цодокова В. В.** Калибровка датчика угла мобильного астрономического универсала в полевых условиях

Сдано в набор 20.09.21.
Подписано в печать 25.10.21.
Формат 60x84/8. Печ. л. 15,00. Тираж 130 экз.
23 статьи на 79 л. - н/с
Заказ 309/21. Индекс 3462.

УДК 531.383

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ТГ-100

С. А. Анчутин, А. С. Мусаткин, канд. техн. наук Е. С. Кочурина, А. В. Михеев,
д-р техн. наук А. С. Тимошенко (ООО «Лаборатория Микроприборов», г. Москва, г. Зеленоград)

Приведены результаты исследований неустойчивости выходного сигнала датчика угловой скорости (ДУС) ТГ-100 при механических, температурных воздействиях и при длительных статических измерениях. Результаты проведенных исследований показали, что датчик имеет высокую стойкость к внешним воздействующим факторам и хорошую повторяемость смещения нуля.

Ключевые слова: микромеханический датчик, кольцевой резонатор, датчик угловой скорости, неустойчивость, результаты исследований.

Введение

Развитие микроэлектроники, особенно цифровых технологий, позволяет реализовывать всё более сложные системы управления различными объектами. Применительно к МЭМС-датчикам данная тенденция выражается в возможности повышения точности и стабильности параметров за счет совершенствования электронной схемы с применением цифровых технологий [1].

Стабильность используемой электроники, в совокупности с цифровыми методами обработки сигнала, позволяет существенно улучшить основные параметры датчиков. Во многих сенсорах и датчиках уже присутствует встроенная цифровая обработка сигнала. Разработчики анализируют полученные статистические данные и вводят поправочные коэффициенты.

Актуальность представляемых исследований связана с развитием и применением интегрированных МЭМС-датчиков в системах ориентации, навигации и управления движением транспортных средств. В настоящее время намечен переход к специализированным большим интегральным схемам, объединяющим в единый узел большое число чувствительных элементов датчиков, электронных контуров обработки измерений и управления колебаниями, обеспечивающих измерение и комплексную обработку инерциальной и внешней информации.

В данной статье рассматриваются результаты проведенных исследований неустойчивости выходного сигнала МЭМС-ДУС при следующих условиях:

- воздействие температурного градиента (от -50 до 85 °С);
- воздействие внешних факторов (линейного ускорения, широкополосной случайной вибрации, циклического перепада температур);
- длительная статическая запись выходного сигнала датчика.

Выполнена оценка неустойчивости смещения нуля от включения к включению.

Объект исследования – ДУС ТГ-100 производства ООО «Лаборатория Микроприборов» (рис. 1). МЭМС-датчик предназначен для измерения проекции угловой скорости на измерительную ось. Построен на базе кольцевого кремниевого резонатора.



Рис. 1. Датчик угловой скорости ТГ-100 производства ООО «Лаборатория Микроприборов»

* МЭМС – микроэлектромеханические системы.

Использование в качестве чувствительного элемента кольцевого резонатора обеспечивает высокую стойкость к воздействию внешних механических возмущающих факторов. Высокая стабильность нуля (менее 5 °/ч по диаграмме Аллана) позволяет применять разработанный МЭМС-ДУС ТГ-100 для решения широкого круга задач. Диапазон измерения может быть настроен при производстве для решения конкретных задач потребителя. Потенциально датчик может быть использован для построения систем стабилизации, ориентации и навигации, систем управления в робототехнике и в беспилотных летательных аппаратах.

Оценка нестабильности выходного сигнала ДУС ТГ-100 при воздействии температурного градиента

Выявление температурного дрейфа датчика является неотъемлемой частью анализа его стабильности. Испытания проведены в диапазоне температур окружающей среды от -50 до 85 °С. Выходные сигналы с датчика ТГ-100 выводятся в аналоговом виде, поэтому для съема сигнала применялся аналого-цифровой преобразователь National Instruments NI USB-6252. Частота дискретизации – 1000 Гц, разрешение – 16 бит. Для задания температуры окружающей среды использована камера тепла-холода ESPEC MC-811Т. На рис. 2 представлена временная зависимость выходного сигнала ДУС ТГ-100 при изменении температуры окружающей среды.

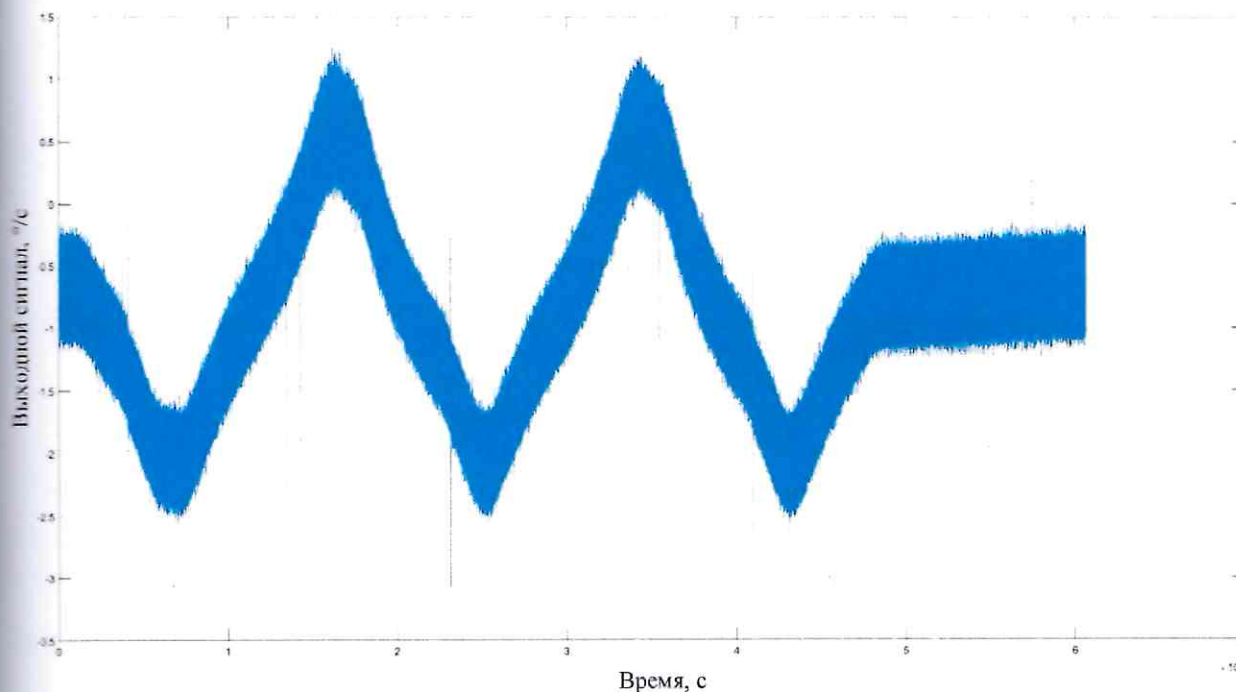


Рис. 2. Запись выходного сигнала ДУС ТГ-100 при изменении температуры окружающей среды

Из графика следует, что нестабильность смещения нуля ДУС при изменении температуры от -50 до 85 °С составляет менее 3,5 °/с.

Далее обработаем полученные выходные данные ДУС с помощью фильтра низких частот Баттерворта второго порядка, частота среза фильтра составляет 1 Гц.

В составе ДУС ТГ-100 присутствует температурный датчик, который также выдает данные в аналоговом виде. Преобразование его выходного сигнала в градусы Цельсия проводится по формуле из технического описания температурного датчика [2]:

$$T = (data - 1,8663) / (11,69 \times 10^{-3}),$$

где *data* – данные с датчика, В. Построим зависимость выходного сигнала ДУС от данных температурного датчика (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что зависимость смещения нуля от температуры носит преимущественно линейный характер. Поэтому для компенсации температурного дрейфа выходного сигнала ДУС δU воспользуемся аппроксимацией полиномом первого порядка по формуле

$$\delta U = aT + b,$$

где a, b – коэффициенты зависимости; T – температура окружающей среды.

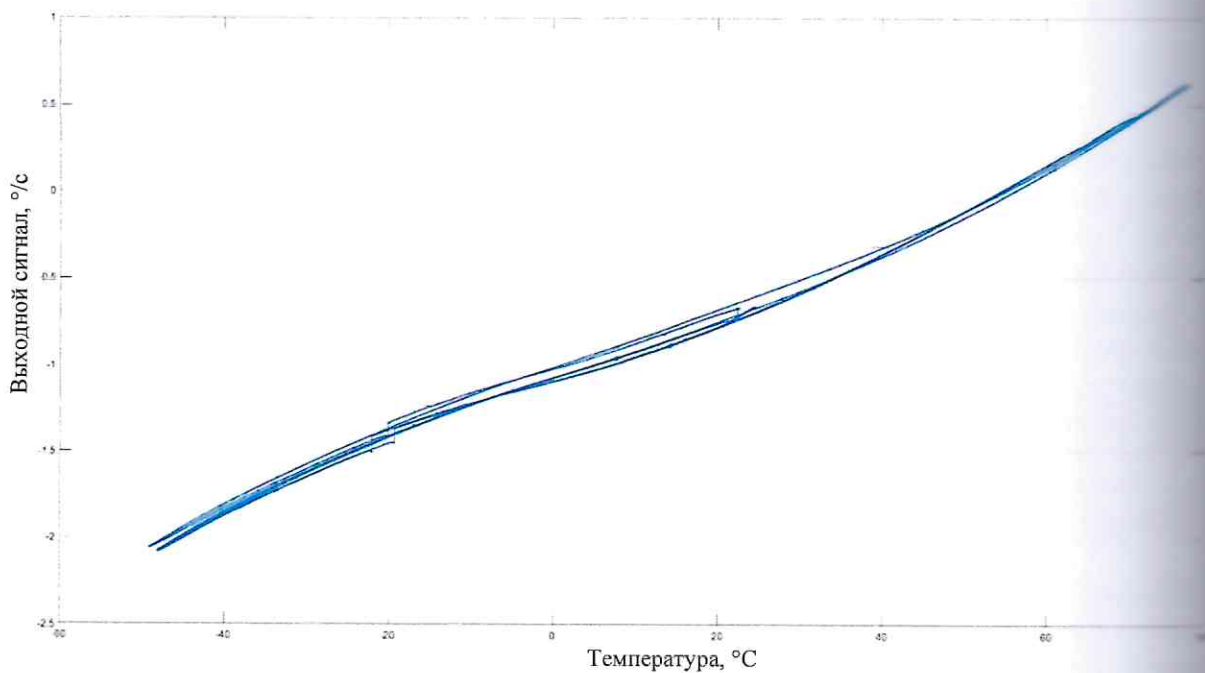


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ДУС ТГ-100 от данных температурного датчика

На рис. 4 приведена зависимость выходного сигнала ДУС ТГ-100 от изменения температуры окружающей среды после аппроксимации.

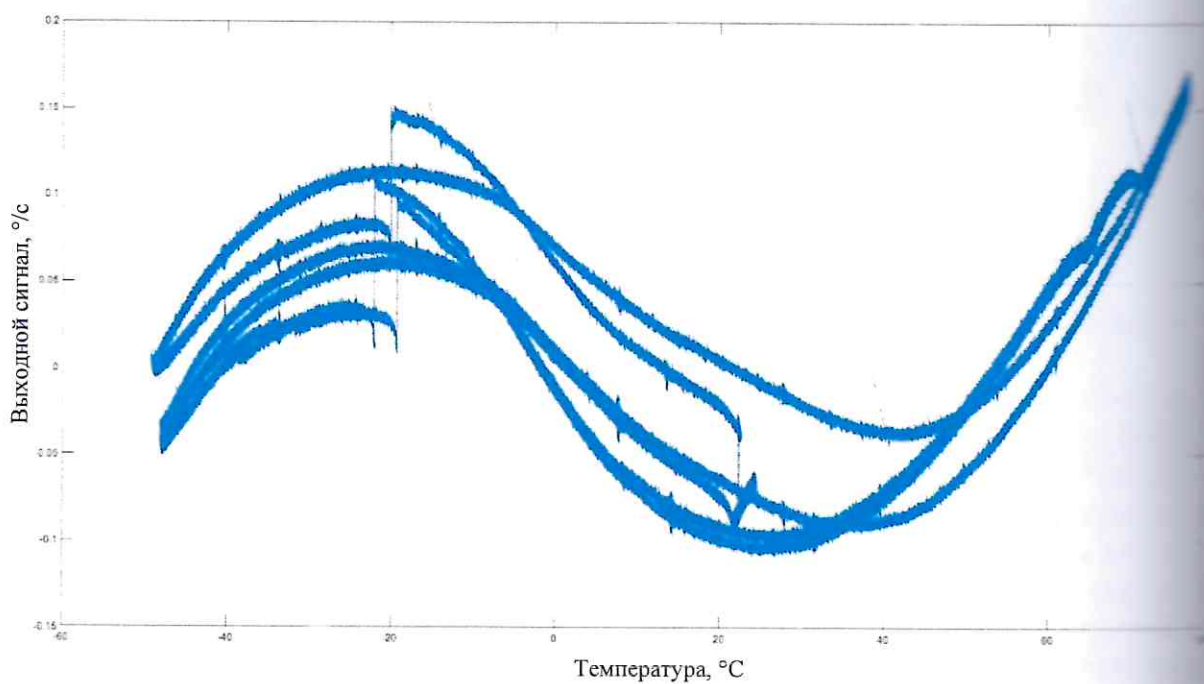


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала ДУС ТГ-100 от изменения температуры окружающей среды после аппроксимации полиномом первого порядка

Из рис. 4 следует, что зависимость всё еще сохраняется и носит нелинейный характер. Для улучшения компенсации температурного дрейфа выходного сигнала ДУС используем полином третьего порядка:

$$\delta U_2 = a_2 T^3 + b_2 T^2 + c_2 T + d_2,$$

где a_2, b_2, c_2, d_2 – постоянные коэффициенты зависимости.

На основе данных после аппроксимации построим зависимость выходного сигнала ДУС от изменения температуры окружающей среды (рис. 5).

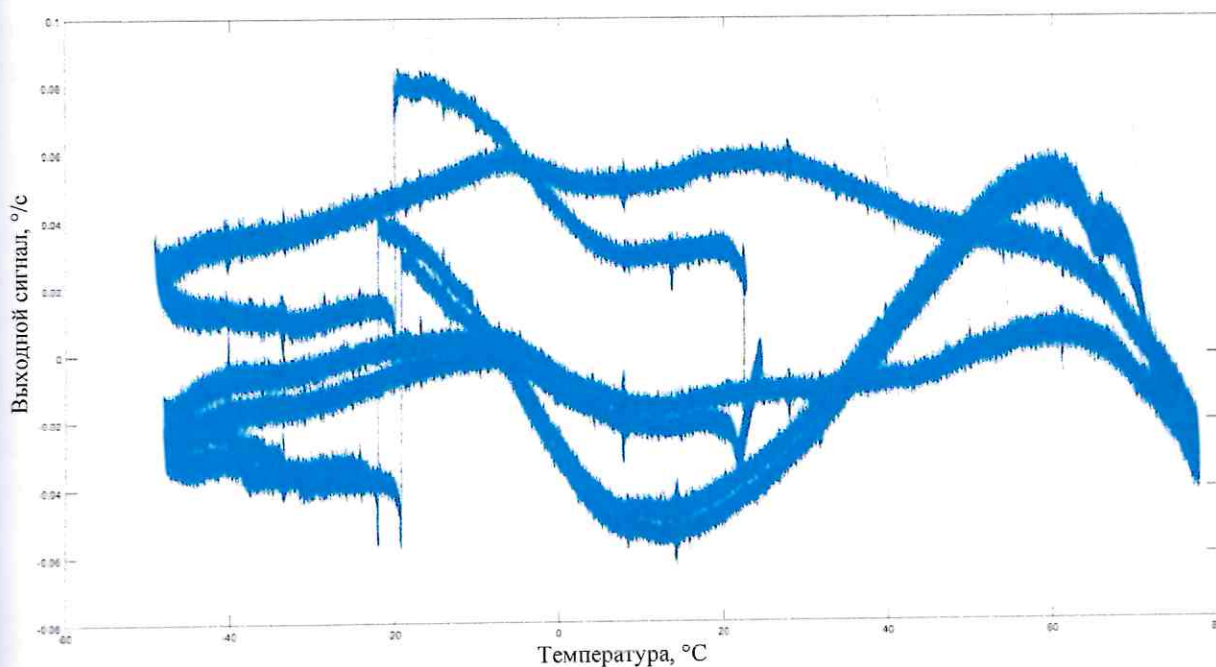


Рис. 5. Зависимость выходного сигнала ДУС ТГ-100 от изменения температуры окружающей среды после аппроксимации полиномом третьего порядка

Из рис. 5 следует, что компенсация температурной погрешности ДУС (смещения нуля) позволяет уменьшить дрейф смещения нуля в диапазоне рабочих температур до $\pm 0,08$ %/с. Результаты данного эксперимента использованы при модификации ТГ-100.

Оценка нестабильности выходного сигнала ДУС при воздействии внешних факторов

Во время эксплуатации датчик испытывает воздействие внешних факторов (перепадов температуры, вибраций, линейных ускорений). Стойкость ДУС к этим внешним воздействиям является одной из важнейших характеристик датчика.

Оценка нестабильности выходного сигнала ДУС при действии внешних факторов проведена в нескольких режимах. На рис. 6 приведены графики зависимости выходного сигнала ДУС ТГ-100 от температуры ($0 \dots 50$ °С), скорость изменения температуры – 2 °С/мин. Выходной сигнал ДУС обозначен синим цветом, граница ± 30 °/ч (максимальное смещение нуля, за пределы которого не должен выходить выходной сигнал после воздействия внешних факторов) – красным и желтым цветом соответственно на каждом из графиков.

Во время воздействия линейного ускорения, температурных циклов, широкополосной случайной вибрации питание на датчик не подавалось. Проведенные исследования показали, что смещение нуля ДУС ТГ-100 после комплекса внешних воздействий не превысило ± 30 °/ч.

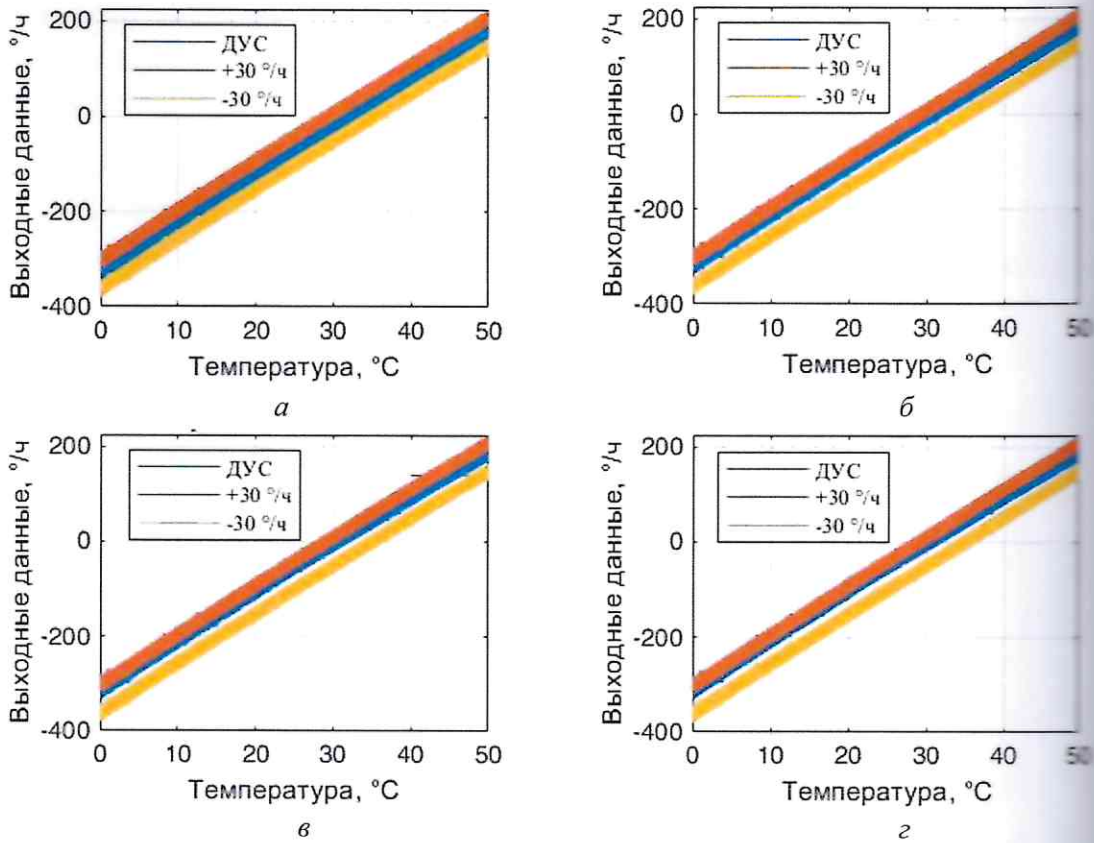


Рис. 6. Выходной сигнал ДУС ТГ-100 в зависимости от изменения (со скоростью 2 °С/мин) температуры:
а – до воздействий; *б* – после воздействия линейного ускорения (200g, длительность 3 мин, по трём осям); *в* – после температурного воздействия (диапазон от 0 до 50 °С, 5 циклов); *г* – после воздействия широкополосной случайной вибрации (амплитуда 12g, диапазон частот от 100 до 2000 Гц, по трем осям)

Оценка нестабильности выходного сигнала ДУС при длительной статической записи

В процессе эксперимента датчик закреплён на оптической скамье (металлической станине, установленной на развязанном фундаменте) для минимизации внешних воздействий. Температура окружающей среды составила 23 °С. Запись выходного сигнала ДУС ТГ-100 проводилась в течение 8 ч. Для оценки случайных погрешностей датчика воспользуемся вариацией Аллана, которая позволяет оценить источник ошибки и величину её вклада [3, 4]. На рис. 7 показана диаграмма Аллана, построенная на основе записанных данных.

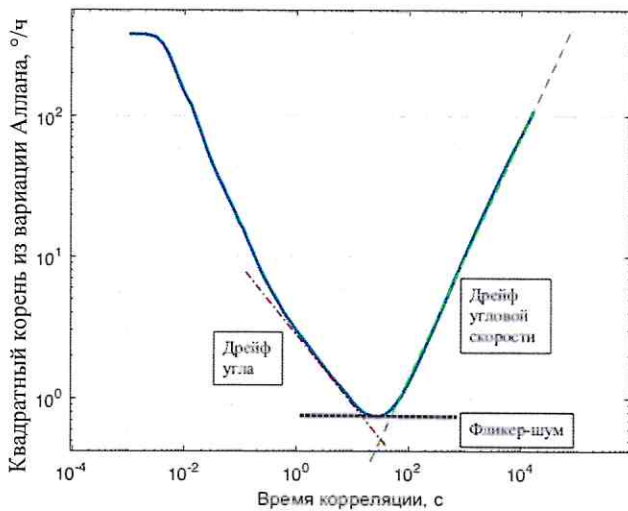


Рис. 7. Диаграмма Аллана ДУС ТГ-100

Шум, возникающий в электронных компонентах датчика, подверженных случайному так называемому «мерцанию» («flickering»), имеет спектральную мощность, пропорциональную $1/f$ (розовый шум) [5]. Фликер-шум (нестабильность смещения нуля) в эксперименте является оценочной характеристикой стабильности и составляет в данном случае 0,7 °/ч.

Д
 ставл
 от ож
 измер
 соста
 Д
 тем б
 время
 вение
 тате «
 От
 сиров
 состо
 тельно
 сдела
 В
 (рис. 8
 вием 1

На
 бильно
 бильно
 которо

Дрейф угла – основная шумовая компонента в выходных данных МЭМС-датчиков – представляет собой компоненту аддитивного белого шума, проявляется в отклонении значений от ожидаемых случайным образом; влияет на результат интегрирования (для преобразования измеряемой датчиком угловой скорости в угол поворота) [5]. Значение дрейфа угла ТГ-100 составляет $0,052 \text{ }^\circ/\sqrt{\text{ч}}$.

Дрейф угловой скорости имеет накопительный характер, и чем дольше запись по времени, тем больше значение этой характеристики, которая показывает случайное блуждание измеряемых датчиком физических величин, таких как угловая скорость, ускорение, а также изменение температуры окружающей среды или изменение температуры электроники в результате «прогрева».

Оценка нестабильности смещения нуля от включения к включению

Оценка нестабильности смещения нуля от включения к включению проводилась при фиксированной температуре $25 \text{ }^\circ\text{C}$ в камере тепла-холода, датчик был закреплен в неподвижном состоянии. Запись выходного сигнала проводилась в течение 10 мин с паузами продолжительностью 2 ч. Питание на ДУС подавалось только во время записи сигнала. Всего было сделано 10 циклов записи выходного сигнала.

В результате испытаний получена временная зависимость выходного сигнала ДУС (рис. 8). На графике отображены отдельные записи ДУС (разным цветом 10 циклов) с указанием времени, которое выдержано относительно первой записи.

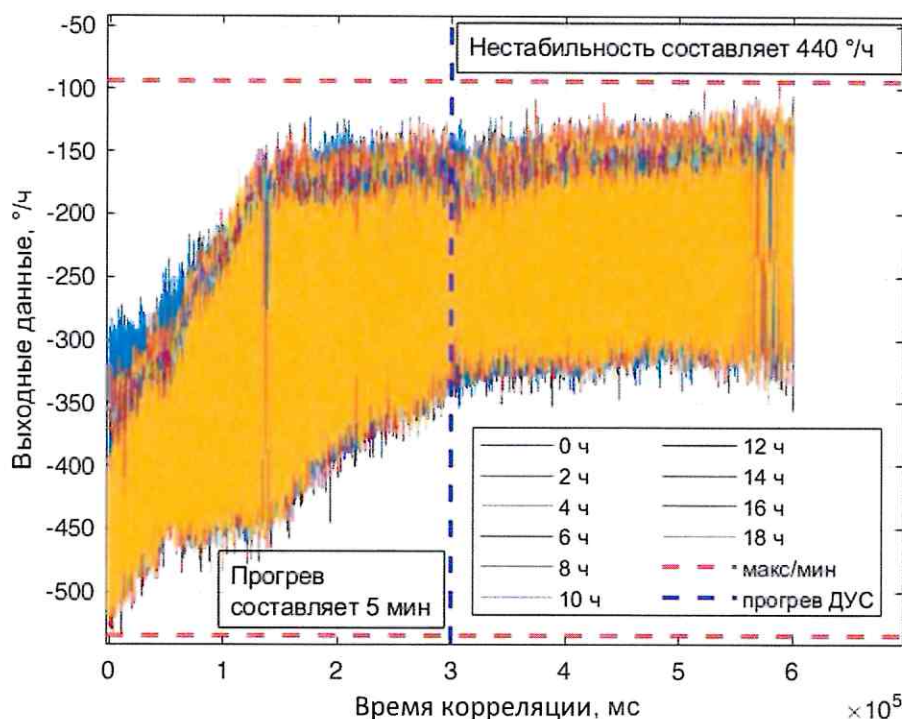


Рис. 8. Циклы записи выходного сигнала ДУС

На основе записей (см. рис. 8) видно, что «прогрев» ТГ-100 не превышает 5 мин. Нестабильность смещения нуля за время «прогрева» ДУС составляет $440 \text{ }^\circ/\text{ч}$. Для оценки нестабильности смещения нуля ТГ-100 от включения к включению рассмотрим сектор графика, в котором датчик «прогрет» (см. рис. 8). На рис. 9 этот фрагмент представлен более подробно.

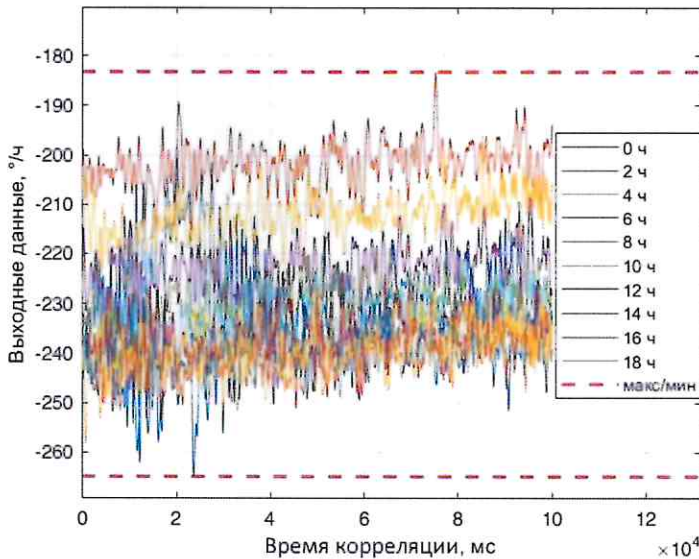


Рис. 9. Выходной сигнал ДУС от включения к включению после «прогрева» (10 записей)

Из рис. 9 можно оценить СКО нестабильности смещения нуля от включения к включению на основе 10 проведённых циклов («прогрев» датчика не учитывается): СКО нестабильности смещения нуля не превысило 28 %/ч.

Заключение

Проведенные исследования показали высокую стойкость ДУС ТГ-100 к внешним воздействиям, хорошую повторяемость смещения нуля (в том числе при воздействии внешних факторов), а также необходимость компенсации температурного дрейфа нуля:

- изменение смещения нуля в диапазоне температур от -50 до 85 °С не превышает $\pm 0,08$ %/с при использовании температурной компенсации;
- нестабильность смещения нуля после внешних воздействий (линейное ускорение $200g$ по трем осям, широкополосная случайная вибрация с СКО $12g$ в диапазоне частот от 100 до 2000 Гц по трем осям, 5 температурных циклов от 0 до $+50$ °С со скоростью изменения температуры 2 °/мин) не превышает ± 30 %/ч;
- нестабильность смещения нуля в запуске (по диаграмме Аллана) составляет $0,7$ %/ч, случайное угловое блуждание $0,052$ %/ $\sqrt{\text{ч}}$;
- нестабильность смещения нуля после включения во время «прогрева» не превышает 440 %/ч;
- нестабильность смещения нуля от включения к включению (после «прогрева») не превышает 28 %/ч (СКО).

ООО «Лаборатория Микроприборов» разрабатывает конкурентоспособные датчики для решения широкого круга задач, связанных со стабилизацией и наведением, а также для точной автономной навигации. Более подробная информация представлена на сайте: www.mp-lab.ru.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. Иванов С. Ю. Разработка цифровой электронной подсистемы микромеханического гироскопа с кварцевым резонатором // Тр. МФТИ. 2016. Т. 8, № 2. С. 142–152.
2. Материалы сайта: <https://www.ti.com>
3. IEEE Std 1554-2005. IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment, Instrumentation, Data Acquisition and Analysis.
4. Михеев А. В., Анчутин С. А., Кочурина Е. С., Тимошенко А. С. Применение вариации Аллана для оценки случайных погрешностей датчиков угловой скорости // Нано- и микросистемная техника. 2021. Т. 23, № 1. С. 153–157. DOI: 10.17587/nmst.23.153-157.
5. Литвин М. А., Малюгина А. А., Миллер А. Б., Степанов А. Н., Чикрин Д. Е. Типы ошибок в инерциальных навигационных системах и методы их аппроксимации // Информ. процессы. 2014. Т. 14, № 4. С. 326–339.