

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 531.383

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-3-4-17

Изменение точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов при отстройке частоты возбуждения от резонансной

И. А. Вихляев, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

К. В. Шишаков, доктор технических наук, доцент, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье проведены расчетное и экспериментальное исследования меры ухудшения точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов при отстройке их частоты возбуждения от резонансной.

Для этого построена имитационная модель, которая исследована в пакете Matlab. Выполнено моделирование работы измерительного устройства на переменном токе и на постоянном токе. Показано, что мера несовпадения расчетной сетки с периодом колебаний резонатора гироскопа явилась основной причиной погрешностей при расчете угла поворота гироскопа в рамках имитационной модели. Это подтверждают полученные графики зависимостей погрешностей от отклонения частоты возбуждения от резонансной частоты.

Проведенные экспериментальные исследования на лабораторных макетах непромышленного производства подтвердили принципиальную возможность изготовления конструкции твердотельного волнового гироскопа без контура фазовой автоподстройки частоты без существенной потери в точности. Для этого были созданы и исследованы три макета гироскопов невысокой точности. В первом макете применялось измерительное устройство на переменном токе, а параметрическая подкачка колебаний выполнялась одним кольцевым электродом с дополнительным включением контура коррекции разночастотности с шестнадцатью электродами. Во втором макете в предыдущей схеме было заменено измерительное устройство для работы на постоянном токе. В третьем макете исследовалась двухканальная восьмиелектродная система управления.

На всех макетах оказалось допустимым работать при отклонении частоты возбуждения от резонансной 5 кГц на величину ± 20 Гц. При этом форма функции систематического дрейфа практически не изменилась. А ее амплитуда и уровень случайной погрешности также изменялись приемлемо.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, частота возбуждения, резонансная частота, частота дискретизации, имитационная модель, лабораторные макеты, измерительное устройство.

Введение

На сегодняшний день прикладная теория и области практического применения твердотельных волновых гироскопов (сокр. ТВГ – является эквивалентом сокращению ВТГ) продолжают активно развиваться [1–4], что подтверждается большим количеством научных публикаций, а также появлением новых опытных и серийных образцов таких изделий.

Кратко охарактеризуем последние публикации. В [5] сообщается о двух новых направлениях в разработке гироскопов. Первое – технологии производства, позволившие получить малый размер ТВГ с меньшим числом деталей, что упростило его производство. Второе – метод самокалибровки в реальном времени, обеспечивающий высокую стабильность параметров в течение дня с учетом изменения температуры. В результате получены оценки случайного дрейфа $0,00025$ °/√ч и систематического дрейфа $0,005$ °/ч («уход» нуля). В [6] описаны измене-

ния в электронике, отвечающей за считывание и управление гироскопом для работы в режиме отслеживания всего угла, а также показаны возможности сокращения количества элементов электроники, необходимых для поддержания колебательной картины ТВГ. В буклетах [7, 8] французской компании SAGEM указано, что их гироскопы имеют показатели случайного дрейфа $0,0002$ °/√ч и смещения нуля $0,0001$ °/ч. В [9] рассмотрен дифференциальный режим работы, обеспечивающий высокую устойчивость к внешним помехам, действующим на гироскоп при работе в режимах запуска, стыковки и посадки космического аппарата. Он отличается от двух других известных режимов наличием двух (X и Y) измерительных каналов. Каждый канал измеряет угол с противоположным знаком. Этот режим работы может быть реализован путем расположения структуры стоячей волны между управляющими и чувствительными электродами. В статье представлены перспективные воз-

возможности такого режима работы для самокомпенсации внешних помех. Для этого было рассчитано положение угла стоячей воды в $21,95^\circ$, а затем проведен ряд экспериментов, таких как шокковые испытания, вибрационные испытания, воздействие магнитным полем. В [10] описан цифровой контроллер для двухкомпонентного полусферического резонаторного гироскопа. Выполнена обработка сигнала на основе метода мультигибкости и применен дифференциальный алгоритм управления. Экспериментально подтверждено, что нестабильность смещения нуля и случайный дрейф оцениваются $0,07^\circ/\text{ч}$ и $0,006^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. В [11] представлен микрополусферический резонирующий гироскоп из поликремния с высокой симметрией и сферическими электродами. Он работает на частоте $14,184\text{ кГц}$ с добротностью 22000 и частотной симметрией 10 Гц . Частотное разделение можно уменьшить до $0,003\%$ электростатической настройкой. Благодаря сферическим электродам и высокой симметрии гироскопа его срабатывание и операция согласования режимов могут быть выполнены путем подачи низких напряжений в пределах 3 В , что значительно снизит энергопотребление. Размеры изделия составляют: 4 мм (длина) \times 4 мм (ширина) \times 1 мм (высота). В [12, 13] разработан новый резонатор с микрооболочкой (MSRG) и с шестнадцатью Т-образными массами, расположенными по краю оболочки резонатора. MSRG работает в режиме балансировки усилия и имеет масштабный коэффициент $0,112\text{ В}/(^\circ/\text{с})$, случайное блуждание по углу $0,035^\circ/\sqrt{\text{ч}}$ и стабильность смещения $0,877^\circ/\text{ч}$. В [14] проведены исследования метода анализа собственных значений в вибрационном гироскопе с металлической оболочкой с несколькими поверхностями. Такой гироскоп имеет преимущество в стойкости к перегрузкам, упрощенную конструкцию, низкую стоимость, широкий диапазон работы и длительный срок службы. Он был протестирован на различных скоростях в диапазоне от минус 3600 до плюс $3600^\circ/\text{с}$. Получены характеристики: смещение нуля составляет $7,862^\circ/\text{ч}$ (25°C), угловое случайное блуждание составляет $1,487^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. В [15] проведены исследования влияния внешней нагрузки на систему управления с обратной связью полусферического резонатора с ограничениями по состоянию. Исследовано влияние изменения взаимного положения съемных электродов и резонатора в результате деформации резонатора, а также изменение начального межэлектродного зазора. В [16] выполнен анализ влияния электростатических сил на колеба-

тельные характеристики кориолисовых вибрационных гироскопов. Эксперименты проводились на цилиндрическом резонаторе из плавленого кварца с пленочным покрытием и кольцевыми электродами. Под действием электростатических сил резонансная частота уменьшилась на $0,022\text{ Гц}$, рассогласование частот уменьшилось на $0,026\text{ Гц}$, время затухания уменьшилось на $0,205\text{ с}$, а разбиение времени затухания увеличилось на $0,111\text{ с}$. Было оценено изменение частотного расщепления и времени затухания в зависимости от емкостного промежутка и приложенного напряжения. Показано, что меньшие емкостные зазоры и большее приложенное напряжение приводят к меньшему рассогласованию частот и меньшему времени затухания. В [17] проведены теоретические расчеты и практическая проверка метода настройки демпфирования. Эксперименты проводились с использованием полусферического резонаторного гироскопа в полноугловом режиме. Во время настройки энергия и квадратурная управляющая сила использовались в качестве наблюдателя, чтобы охарактеризовать влияние настройки на демпфирование и частоту. Метод уменьшил асимметрию затухания на 87% с затратами 3% времени затухания. Кроме того, зависящий от угла дрейф сигнала при измерении скорости был уменьшен до $15,6\%$ от дрейфа без настройки демпфирования, что привело к снижению нелинейности масштабного коэффициента с $5,49\text{ ppm}$ до $2,66\text{ ppm}$. В [18] проводились теоретические расчеты и практическая проверка высокоточных гироскопов с полусферическим резонатором. Достигнута нестабильность смещения ниже $0,001^\circ/\text{ч}$. Ошибка уровня смещения некомпенсированной системы улучшена в 40 раз, а стабильность масштабного коэффициента также может быть увеличена до 19 раз. Показана хорошая адаптивность предложенного гироскопа к окружающей среде.

Производством ТВГ в России занимаются предприятия АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (РПКБ), ПАО «АНПП «Темп-Авиа», АО «НПК «КБМ» (г. Коломна), ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ОАО «ЛНППК»), АО «Завод «Фиолент», ЗАО «НПП «Медикон», ОАО «ИЭМЗ» Купол». Также проблематикой ТВГ занимаются и лаборатории разных институтов.

В [19, 20] рассмотрен малогабаритный твердотельный волновой гироскоп нового поколения для инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата. Точностные

характеристики ВТГ – 30 мг при комнатной температуре окружающего воздуха: стандартное среднее квадратичное отклонение (СКО) в запуске не превысило значения $\text{СКО} = 0,005 \text{ } ^\circ/\text{ч}$, а случайный уход по углу менее $0,003 \text{ } ^\circ/\sqrt{\text{ч}}$. Для их достижения разработан способ «самокалибровки» прибора. Предполагается получить законченный моноблок системы весом не более 4,5 кг. В [21] рассмотрена схема усилителя с синхронным детектором на отечественной элементной конструкторской базе. Показана пригодность метода синхронного детектирования для первичного преобразования сигнала с емкостного чувствительного элемента ВТГ. Выходные параметры усилителя позволяют подавать сигналы сразу на АЦП для дальнейшей цифровой обработки. Уменьшено количество элементов электроники. Помехозащищенность схемы достигается за счет применения синхронного детектирования. В [22] приведены методы компенсации погрешностей гироскопов, вызванных нелинейными колебаниями резонатора. Предложены три способа компенсации дрейфа. Первый способ предназначен для гироскопов, работающих в разомкнутом режиме датчика угловой скорости. Заключается в использовании предложенной в статье формулы. Второй способ предназначен для гироскопов, работающих в компенсационном режиме датчика угловой скорости. Он основан на подаче управляющих сигналов, учитывающих коэффициент нелинейности и другие дефекты гироскопа. Третий способ заключается в линеаризации колебаний резонатора с помощью специально сформированных сигналов, подаваемых на электростатические датчики управления. Патент [23] предлагает способ считывания и управления колебаниями ВТГ с помощью установленного внутри резонатора блока возбуждения с равномерно установленными по окружности нечетным и простым числом электродов съема и управления. При этом в резонаторе одновременно с колебаниями на второй моде возбуждают и поддерживают колебания третьей рабочей моды. Использование такой системы позволяет повысить точность интегрирующего гироскопа и уменьшить некомпенсированный дрейф. В [24] предлагается цифровое преобразование Гильберта как альтернативный способ идентификации квадратурного сигнала.

На практике отдельный интерес представляет уменьшение массогабаритных показателей таких изделий и их стоимости с сохранением требуемых точностных характеристик. Это предполагает не только уменьшение размеров гироскопов,

но и блоков управления ими. Последнее связано с упрощением электронных схем и алгоритмов управления гироскопами.

Большое количество статей о схемотехнических и алгоритмических решениях в области ТВГ говорят об актуальности вопросов оптимизации их электронных схем. В настоящее время электроника гироскопов размещена на плате управления. Она традиционно включает: блоки буферных усилителей, аналого-цифровые преобразователи (АЦП), блоки цифровой обработки сигналов (ЦОС, состоят из ПЛИС и микроконтроллера, посылающего сигналы в блок формирования управляющих воздействий). При этом обычно частота обработки сигналов ТВГ зависит от контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), который занимает дополнительное место на плате. От него требуется достаточно точная настройка на частоту резонатора. А при выходе его из строя возможна неправильная работа изделия.

Разработка схемотехнических решений с исключением ФАПЧ уменьшит сложность системы и повысит ее надежность (исключится один из внутренних контуров управления). Однако при этом частотный план электронного блока становится фиксированным (или же медленно настраиваемым в дополнительном цифровом контуре слежения за частотой резонансных колебаний). В то же время при изменении температуры (при нагреве или остывании резонатора) в диапазоне от минус 50 до плюс 50 °С резонансная частота может измениться в диапазоне от минус 100 до плюс 100 Гц. Возникающая частотная отстройка от резонанса может ухудшать процессы возбуждения резонатора, а также влиять на алгоритмы обработки из-за нарушения синхронизации сетки дискретизации с периодом резонансных колебаний.

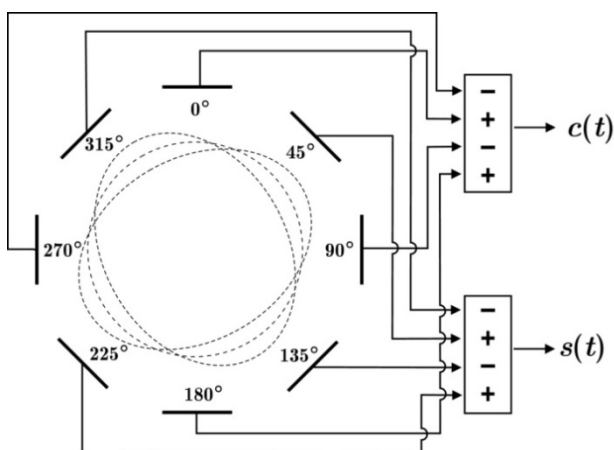
Целью статьи выбрано проведение расчетного и экспериментального исследования меры ухудшения точностных характеристик ТВГ при отстройке их частоты возбуждения от резонансной.

Имитационная модель обработки измерительных сигналов

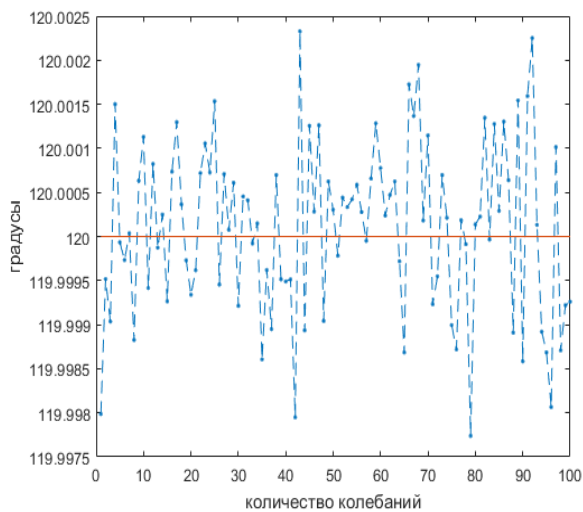
Типовая система съема измерительных сигналов показана на рис. 1, а. В результате по сигналам r с восьми емкостных датчиков формируются два измерительных сигнала для последующей обработки:

$$\begin{cases} c(t) = r(t, 0) - r\left(t, \frac{\pi}{2}\right) + r(t, \pi) - r\left(t, \frac{3\pi}{2}\right), \\ r(t) = r\left(t, \frac{\pi}{4}\right) - r\left(t, \frac{5\pi}{4}\right) + r\left(t, \frac{5\pi}{4}\right) - r\left(t, \frac{7\pi}{4}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где сигнал $c(t)$ называется косинусным сигналом, а сигнал $s(t)$ – синусным.



a



б

Рис. 1. Система съема измерительных сигналов (a) и временное изменение рассчитанного угла θ при $\omega = 5$ кГц (б)
 Fig. 1. Measuring signal removal system (a) and the time change of the calculated angle θ at $\omega = 5$ kHz (b)

Ниже рассмотрим упрощенную модель. В частности, в ней отсутствует расчет сигналов рассогласования и контура управления (включая контур ФАПЧ). Также приняты некоторые допущения по уровню шума в системе и по уровню нелинейностей. Далее будем пользоваться материалом статьи [25], где описана электрическая схема измерительной компоненты на основе операционных усилителей. Похо-

жие статьи данных авторов за последние годы можно также найти в номерах журналов «Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» и «Интеллектуальные системы в производстве».

Если частота переменного напряжения на резонаторе выбрана кратной основной частоте колебаний резонатора ω (с коэффициентом k , где k – целое число), тогда сигналы (1) будут описываться следующими выражениями:

$$\begin{aligned}
 U_c(t) &= [A \cos \theta \sin(\omega t + \tau) + B \sin \theta \cos(\omega t + \tau)] \cos(k\omega t + \psi) + \\
 &+ k [A \cos \theta \cos(\omega t + \tau) - B \sin \theta \sin(\omega t + \tau)] \sin(k\omega t + \psi) = \\
 &= A_c - \cos((k-1)\omega t) + B_c - \sin((k-1)\omega t) + A_c + \cos((k+1)\omega t) + B_c + \sin((k+1)\omega t), \\
 U_s(t) &= [A \sin \theta \sin(\omega t + \tau) + B \cos \theta \cos(\omega t + \tau)] \cos(k\omega t + \psi) + \\
 &+ k [A \sin \theta \cos(\omega t + \tau) - B \cos \theta \sin(\omega t + \tau)] \sin(k\omega t + \psi) = \\
 &= A_s - \cos((k-1)\omega t) + B_s - \sin((k-1)\omega t) + A_s + \cos((k+1)\omega t) + B_s + \sin((k+1)\omega t),
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где A, B – амплитуды основных и квадратурных колебаний; θ – угловая ориентация рабочей стоячей волны; τ, ψ – начальные фазы.

Заметим, что в выражения (2) в общем случае будут входить различные шумы. Поэтому

предварительно проводится фильтрация с использованием преобразования Фурье для частот $(k-1)\omega$ и $(k+1)\omega$.

Далее из выражений (2) выделяются основные измерительные сигналы:

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{1}{2} (a_{c-}^2 + a_{c+}^2 + b_{c-}^2 + b_{c+}^2 + a_{s-}^2 + a_{s+}^2 + b_{s-}^2 + b_{s+}^2) = (A^2 - B^2) \cos 2\theta, \\
 A_s &= (a_{c-} a_{s-} + a_{c+} a_{s+} + b_{c-} b_{s-} + b_{c+} b_{s+}) = (A^2 - B^2) \sin 2\theta, \\
 \theta &= \arctg \left(\frac{A_s}{A_c} \right),
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

где A_c – амплитуда косинусного канала; A_s – амплитуда колебаний синусного канала; θ – угловое положение волны.

Заметим, что если в (2) принять $k = 0, \psi = \pi/2$, то получим формулы для варианта измерительного устройства на постоянном напряжении.

Для адекватной аппроксимации исходного сигнала некоторой частоты суммой гармонических сигналов по теореме Котельникова необходимо выбирать частоту дискретизации, более чем в два раза превышающую максимальную частоту исходного сигнала. Следовательно, для расчета амплитуд $(k - 1)$ и $(k+1)$ гармоник требуется более $2(k+1)$ точек на период резонатора.

Для определенности примем $\omega = 5$ кГц. В качестве гармоники несущей частоты будем рассматривать либо нулевую гармонику модулирующего сигнала ($k = 0$ – для измерительного устройства на постоянном токе), либо 98-ю гармонику ($k = 98$ – для измерительного устройства на переменном токе). В последнем случае требуется минимальная частота АЦП:

$$f_d \geq 2f_{rez} \cdot k = 2 \cdot 5000 \cdot 98 = 980000 \rightarrow f_d \geq 980 \text{ кГц.}$$

Следовательно, нужно выбирать не менее 196 точек на период колебаний резонатора для расчета амплитуд 97-й и 99-й гармоник (а для частот дискретизации 1, 2, 3 и 4 МГц потребуются 200, 400, 600 и 800 точек на период колебаний).

Разработка упрощенной имитационной модели в соответствии с формулами (2), (3) выполнена в пакете Matlab: 1) сначала синтезируются сигналы по формулам (2) до их преобразований к окончательному виду; 2) далее выполняется дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и выделяются амплитуды рабочей и квадратурной стоячих волн в синусном и косинусном каналах на гармониках 97 (индекс «←») и 99 (индекс «+»); 3) с их помощью рассчитываются сигналы (3).

В качестве исходных данных были выбраны: максимальная амплитуда синусного и косинусного каналов 1 у. е.; квадратура 0,01 у. е.; заданный угол 120° ; сдвиг по фазе колебаний резонатора 0° ; сдвиг по фазе колебаний несущей 0° ; частоты колебаний резонатора от 4900 до 5100 Гц; частота резонатора 5000 Гц; гармоника переменного тока 98,0; частоты дискретизации 1, 2, 3, 4 МГц; уровень шума 0,00025 от уровня амплитуды колебаний.

Так как выходным измерительным сигналом ТВГ является угол стоячей волны θ , поэтому он выбран в качестве основного критерия, вычисляемого по формуле (3). Для оценки погрешности вычислений выбран размах $\pm 3\sigma$ (σ – величина среднеквадратического отклонения СКО).

Проанализируем, как при различных соотношениях частоты резонатора ω и постоянной заданной частоты дискретизации f_d изменится точность расчета угла θ . Заметим, что практически во всех временных зависимостях рассчитанного угла θ присутствовала паразитная гармоническая компонента, которая тоже учитывалась при расчете соответствующих погрешностей 3σ . Она была обусловлена появлением смещения расчетной сетки от периода колебаний. При расчете гармоник сигнала это вносило погрешность в расчет амплитуд, на основе которых в итоге рассчитывался угол.

Случай измерительного устройства на переменном токе. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты промежуточных расчетов для частоты колебаний $\omega = 5010$ Гц и частотах дискретизации f_d , равной 1 и 2 МГц (для частот 3, 4 МГц результаты не приведены, так как мало отличались от случая частоты 2 МГц).

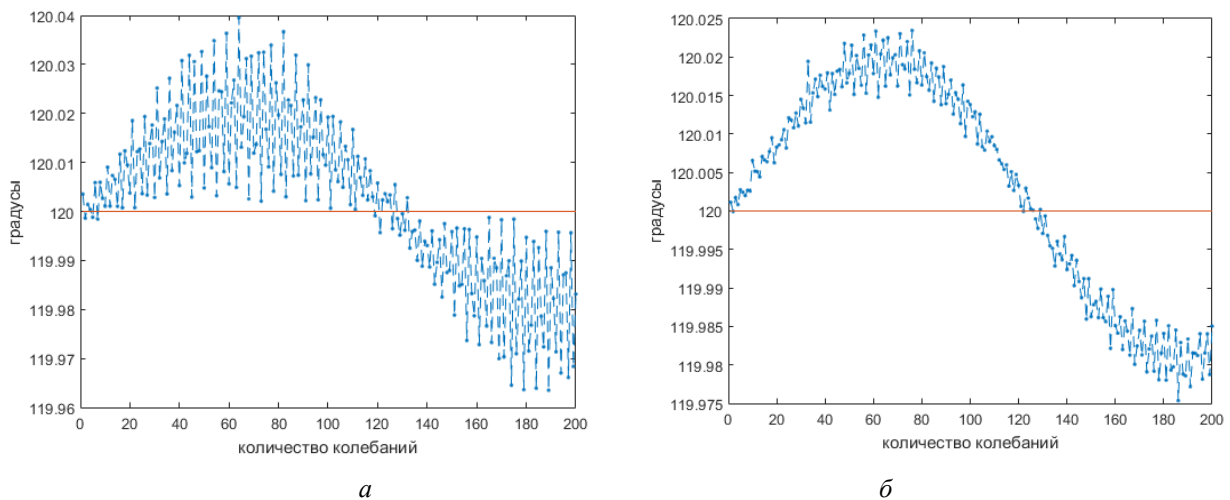


Рис. 2. Временные зависимости рассчитанного (пунктирные линии) и исходного (сплошные линии) угла θ при f_d , равной 1 МГц (а) и 2 МГц (б)

Fig. 2. Time dependences of the calculated (dotted lines) and initial (solid lines) angle θ at f_d equal to 1 MHz (a) and 2 MHz (b)

Для этих же условий на частоте резонатора $\omega = 4990$ Гц получались аналогичные графики, но «опрокинутые вниз» (т. е. повернуты на 180 градусов) относительно исходного угла в 120° .

В результате проведенных многочисленных расчетов были вычислены погрешности измерения угла при различных частотах ω резонатора

и различных частотах дискретизации, показанные на рис. 3, а. Так как для случаев $f_d = 1, 2, 3, 4$ МГц графики получились очень близкими (с ростом частоты дискретизации происходил незначительный прирост в точности расчетов, порядка 10^{-5}), поэтому они практически слились на рисунке.

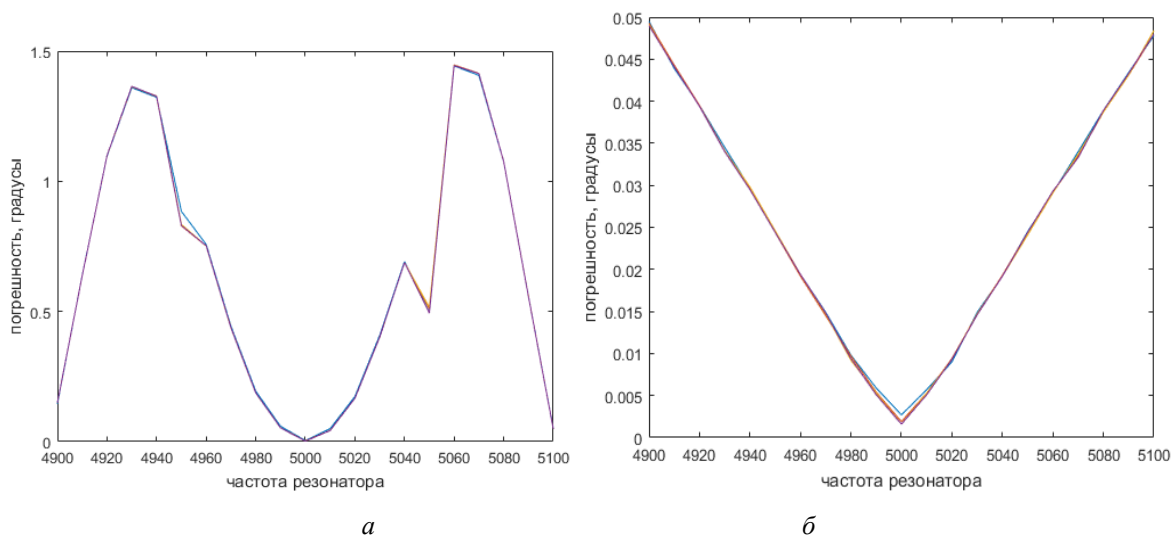


Рис. 3. Погрешности (3σ) расчета угла θ в зависимости от ω для вариантов измерительного устройства на переменном (а) и постоянном (б) токе

Fig. 3. Errors (3σ) in calculating the angle θ as a function of ω for the variations of the measuring device on alternating (a) and direct (b) current

Наименьшая погрешность получилась на уровне 5 кГц. Это соответствует случаю, когда в АЦП обрабатывается ровно один период колебаний резонатора. В свою очередь, наибольшая погрешность получилась при изменении частоты резонатора на 60–80 Гц, когда смещение периода колебаний вносит наибольшую погрешность в расчет ДПФ (следовательно, и амплитуд).

Случай измерительного устройства на постоянном токе. Здесь, как и в предыдущем случае, для $\omega = 5010, 4990$ Гц и $f_d = 1, 2, 3, 4$ МГц получались временные зависимости, очень похожие на приведенные на рис. 2. При этом с ростом f_d наблюдался незначительный прирост в точности расчетов, порядка 10^{-5} . Это позволяет ограничиться f_d от 1 до 2 МГц.

Наименьшая погрешность получилась на уровне 5 кГц (рис. 3, б), то есть когда в АЦП обрабатывался ровно один период колебаний резонатора. Характерное временное изменение рассчитанного угла θ при $\omega = 5$ кГц показано на рис. 1, б (пунктирной линией показан рассчитанный угол, сплошной линией – заданный). Погрешность расчетов составила $0,0029^\circ$ или 10,5 угловых секунд, что соответствует шуму реального макетного образца.

В свою очередь, наибольшая погрешность получалась при наибольшем изменении частоты резонатора (на 100 Гц), когда смещение периода колебаний вносило наибольшую погрешность в расчет ДПФ и амплитуд (рис. 3, б).

Из полученных результатов следует, что при постоянной частоте дискретизации гироскоп продолжает работать с достаточной точностью (погрешность расчета $\sim 0,05^\circ$) при отклонении частоты колебаний резонатора на 10–15 Гц для измерительного устройства на переменном токе и при отклонении на 100 Гц для измерительного устройства на постоянном токе. Так как прирост в точности при обработке сигнала с частотой более 2 МГц получился малым, поэтому для ослабления требований к АЦП вполне допустимо работать на частотах дискретизации от 1 до 2 МГц.

Экспериментальное исследование точностных характеристик твердотельных волновых гироскопов без контура ФАПЧ

В измерительном устройстве ТВГ аналоговые синусный и косинусный сигналы (1) поступают на АЦП (рис. 4, а).

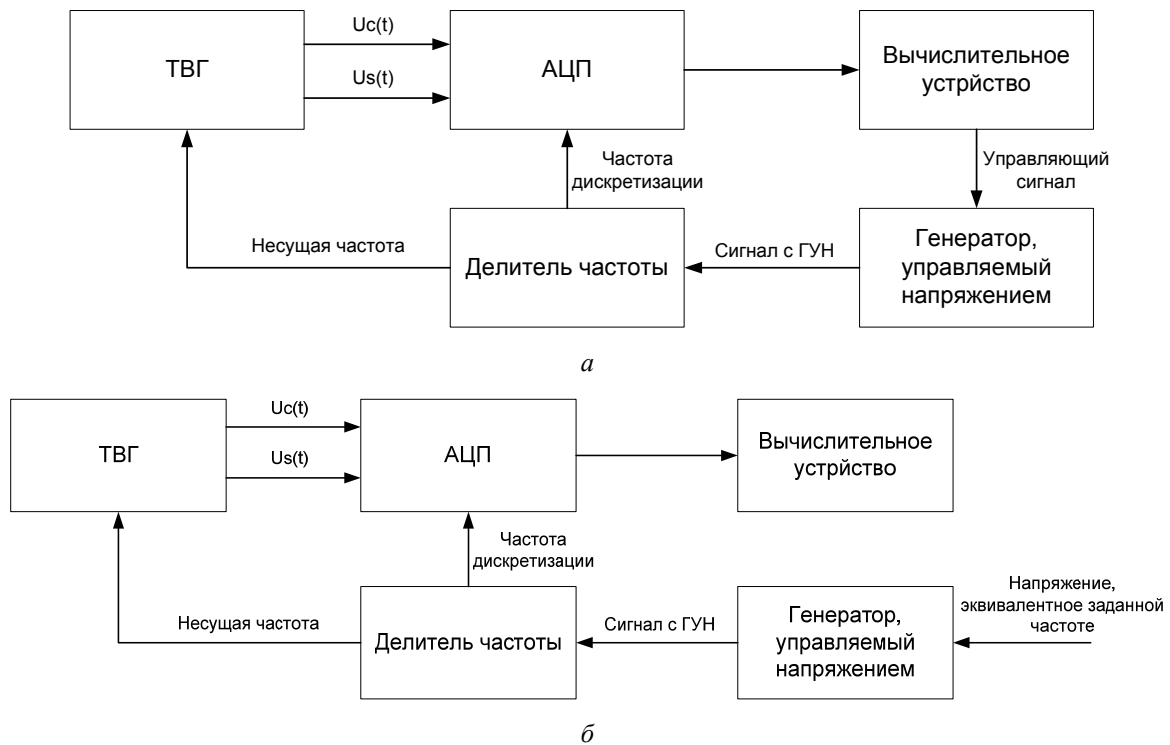


Рис. 4. Схемы обработки сигналов с ФАПЧ (а) и без него (б)
 Fig. 4. Signal processing schemes with PLL (a) and without it (b)

В традиционных схемах электроники частота дискретизации АЦП настроена таким образом, чтобы выполнялась оцифровка ровно одного периода колебаний резонатора. Для выбранного макетного образца один период колебания резонатора оцифровывался 224 точками на период колебаний. При этом имеем частоту выборки (дискретизации) $224 \cdot 5000 = 1,12$ МГц.

Вычислительное устройство оценивает параметры колебаний резонатора, включая частоту ω , и рассчитывает сигнал рассогласования по частоте. Этот сигнал отправляется в контур ФАПЧ, который состоит из ГУН (генератора, управляемого напряжением) и делителя частоты.

Далее ГУН генерирует сигнал, поступающий на делитель частоты. Из него выделяются: 1) частота, поступающая на вход тактирования АЦП для оцифровки сигнала; 2) несущая частота для поддержания частоты напряжения на резонаторе; 3) частота тактирования кольцевого электрода для поддержания параметрического возбуждения; 4) частота колебаний резонатора для синхронизации расчетов микроконтроллера. Видно, что в такой схеме все частоты кратны частоте колебаний резонатора.

В исследуемой схеме электроники без контура ФАПЧ (рис. 4, б) осуществляется подача на ГУН напряжения сразу на заданной частоте. При этом в реальных эксплуатационных условиях она может слабо «уходить» от резонансной

частоты. Поскольку микроконтроллер перестает рассчитывать сигнал рассогласования по частоте, поэтому в АЦП обычно будет оцифровываться больше или меньше одного периода колебаний резонатора.

В целом, небольшие уходы от резонансной частоты, в силу слабого изменения АЧХ вблизи резонанса, не должны приводить к существенному ухудшению характеристик ТВГ. Если же будет иметь место значительный уход частоты, то в контуре поддержания амплитуды колебаний дополнительно потребуются увеличенные напряжения. Кроме этого, уменьшение добротности колебаний на нерезонансной частоте усилит вклад шумов. Рассмотрим этот вопрос более подробно на лабораторном макете.

Эксперимент заключался в подаче на ГУН сначала частоты, на 20 Гц превышающей резонансную частоту. И на стенде вращения происходил съем параметров дрейфа и шума электрического угла в различных угловых положениях. После этого на ГУН подавалась частота, на 20 Гц меньшая резонансной частоты. И также снимались параметры дрейфа и шума.

Были исследованы три разных варианта исполнения систем управления ТВГ. В первом варианте применялось измерительное устройство на переменном токе, а параметрическая подкачка колебаний выполнялась одним кольцевым электродом с дополнительным включением кон-

тура коррекции разночастотности с шестнадцатью электродами. Во втором варианте в предыдущей схеме было заменено измерительное устройство для работы на постоянном токе. В третьем же варианте исследовалась двухканальная восьмиэлектродная система управления. Более подробно с принципами работы таких систем можно познакомиться в приведенном списке литературы, а также в [26].

Вариант системы управления с измерительным устройством на переменном напряжении. Результаты измерения дрейфа и шума при включенной системе параметрической подкачки колебаний приведены на рис. 5. Для сравнения, на рис. 6 также приведены результаты, полученные в режиме свободного выбега (при выключенной системе параметрической подкачки).

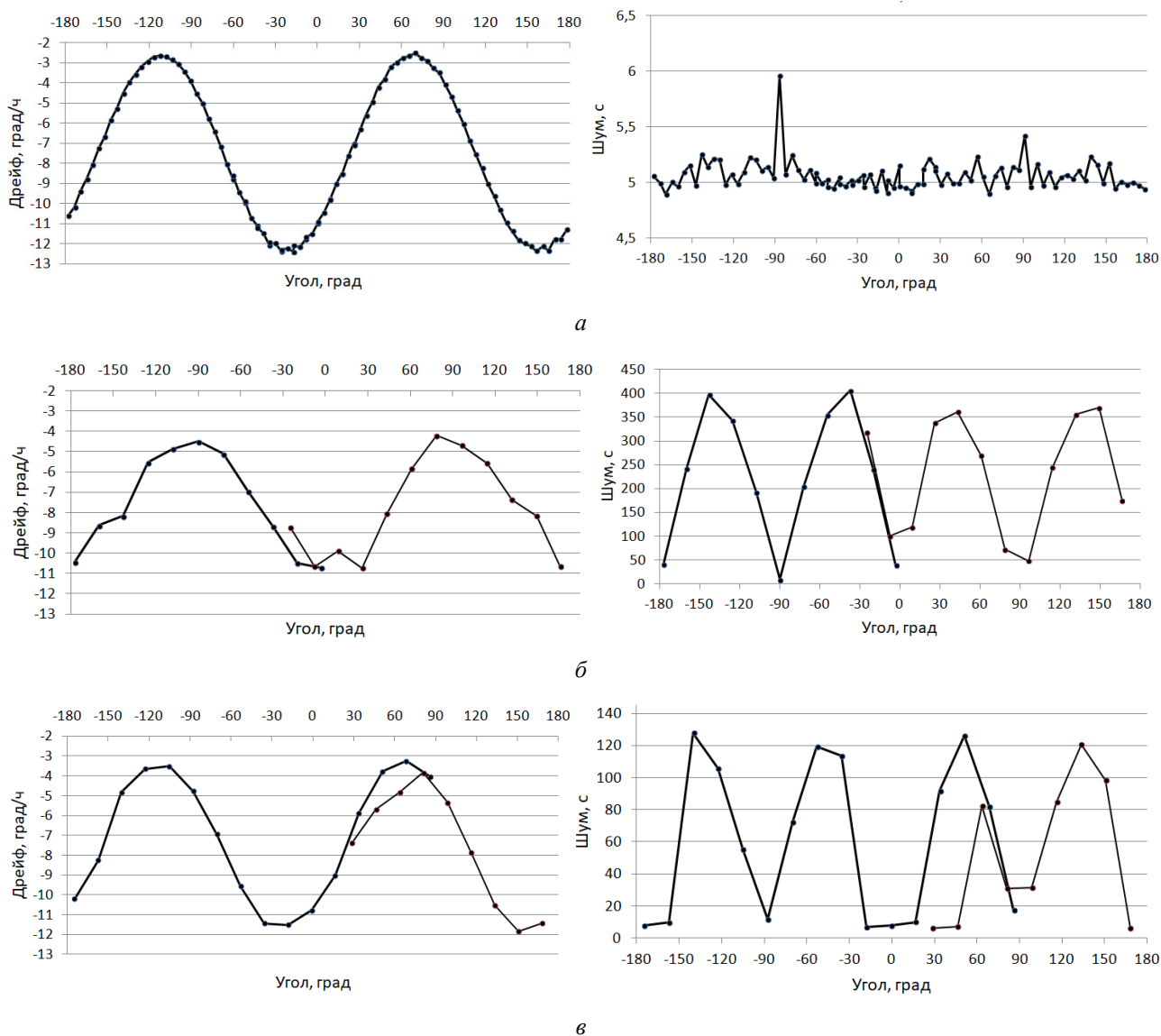


Рис. 5. Дрейф (слева) и шум (справа) угла для системы управления на переменном токе:

а – $\omega = 5000$ Гц; б – $\omega = 5020$ Гц; в – $\omega = 4980$ Гц

Fig. 5. Drift (left) and noise (right) of the angle for the AC control system:

а – $\omega = 5000$ Hz; б – $\omega = 5020$ Hz; в – $\omega = 4980$ Hz

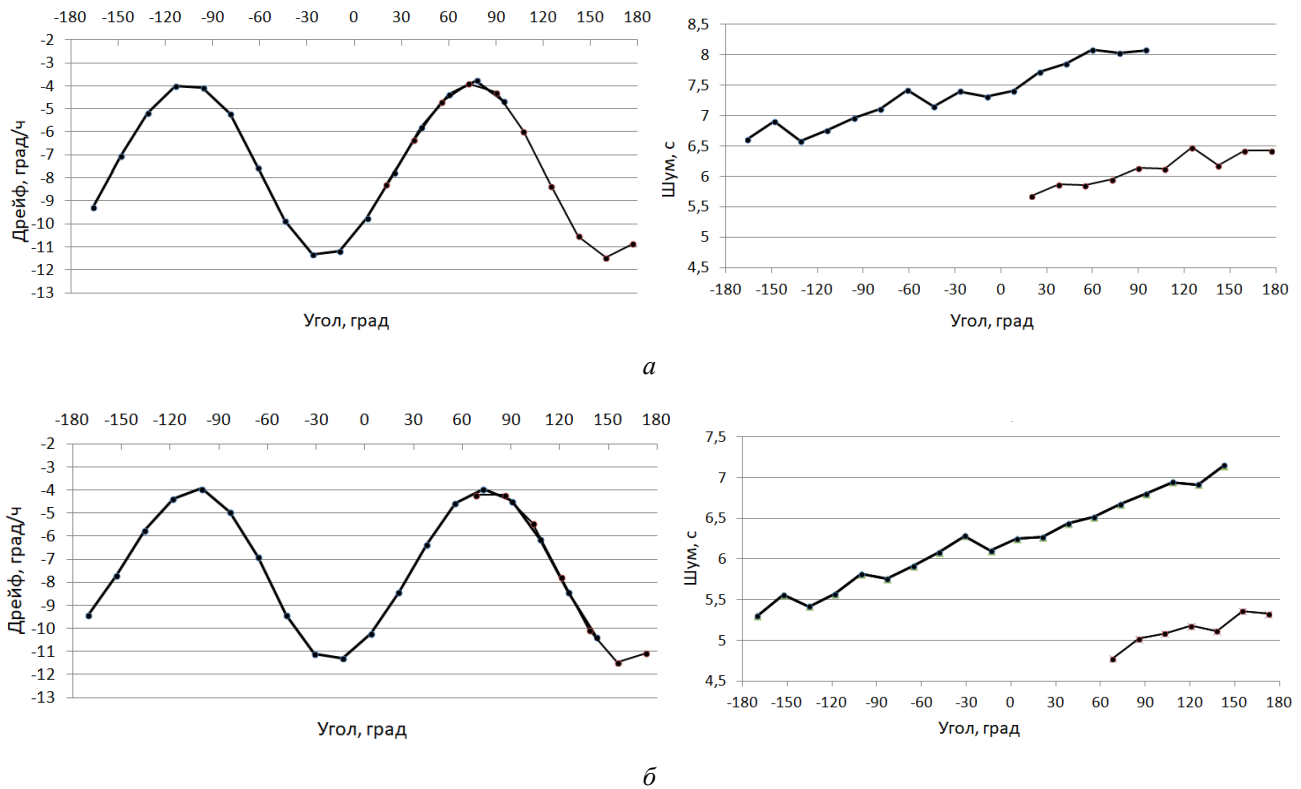


Рис. 6. Дрейф (слева) и шум (справа) угла для измерительного устройства на переменном токе при выключенном возбуждении: а – $\omega = 5020$ Гц; б – $\omega = 4980$ Гц

Fig. 6. Drift (left) and noise (right) of the angle for an alternating current measuring device when the excitation is switched off: а – $\omega = 5020$ Hz; б – $\omega = 4980$ Hz

Как видно из графиков, характеристика по дрейфу при подаче различных частот и при работе/отключении кольцевого электрода практически не изменилась. Минимумы и максимумы дрейфа остались в тех же местах. При работающем кольцевом электроде характеристика имеет больше отклонений от синусоидальной формы, а также повышенный уровень шума. Это вызвано воздействием сигналов кольцевого электрода на исследуемый сигнал в его полосе частот. При работе на удвоенной резонансной частоте данное воздействие фильтруется.

При отключенном кольцевом электроде имеем меньший уровень шума, однако время работы в данном случае ограничивается добротностью резонатора, которая влияет на время затухания колебаний. Поскольку амплитуда колебаний падает, происходит падение соотношения сигнал-шум, это приводит к увеличению уровня шума со временем.

Вариант системы управления с измерительным устройством на постоянном напряжении (токе). В этом случае был собран макетный образец с аналоговым контуром управления кольцевым электродом. В контур поступают непосредственно сигналы с ТВГ, представляющие собой синусоиды с частотой колебаний резонатора. Рассчитывается амплитуда колебаний резонатора и сигнал рассогласования по амплитуде, отправляемый на кольцевой электрод с удвоенной резонансной частотой.

Результаты измерения дрейфа и шума при включенной системе параметрической подкачки колебаний приведены на рис. 7.

Здесь получили дрейф от минус 15 до 40 °/ч, шум до 60 с. При подаче различных частот характеристика по дрейфу практически не изменилась. Минимумы и максимумы дрейфа остались в тех же местах. Большой уровень дрейфа вызван разнородностью чувствительного элемента. Однако поскольку он имеет систематический характер, его можно уменьшить на этапе компенсации погрешностей.

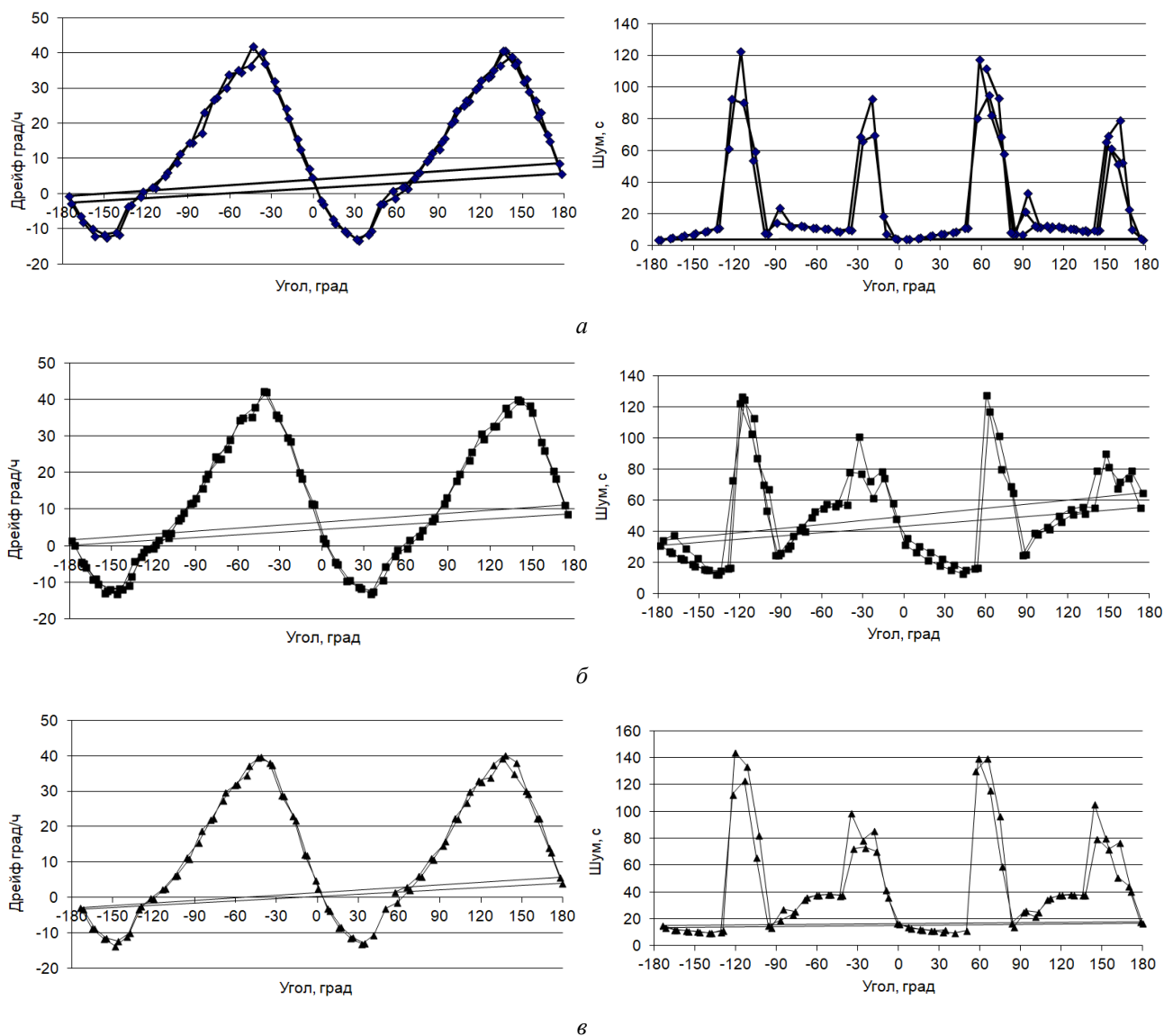


Рис. 7. Дрейф (слева) и шум (справа) угла для системы управления на постоянном токе:
 а – $\omega = 5000$ Гц; б – $\omega = 5020$ Гц; в – $\omega = 4980$ Гц
 Fig. 7. Drift (left) and noise (right) of the angle for a DC control system:
 а – $\omega = 5000$ Hz; б – $\omega = 5020$ Hz; в – $\omega = 4980$ Hz

Вариант двухканальной восьмиэлектродной системы управления на постоянном напряжении (токе). Для этого случая был собран свой макетный образец. На рис. 8 показан четвертной электрический угол, поэтому реальные значения шума и дрейфа будут в 2 раза меньше.

Данный макетный образец показал следующие результаты: уровень дрейфа от минус 20 до плюс 20 °/ч и уровень шума до 35 с.

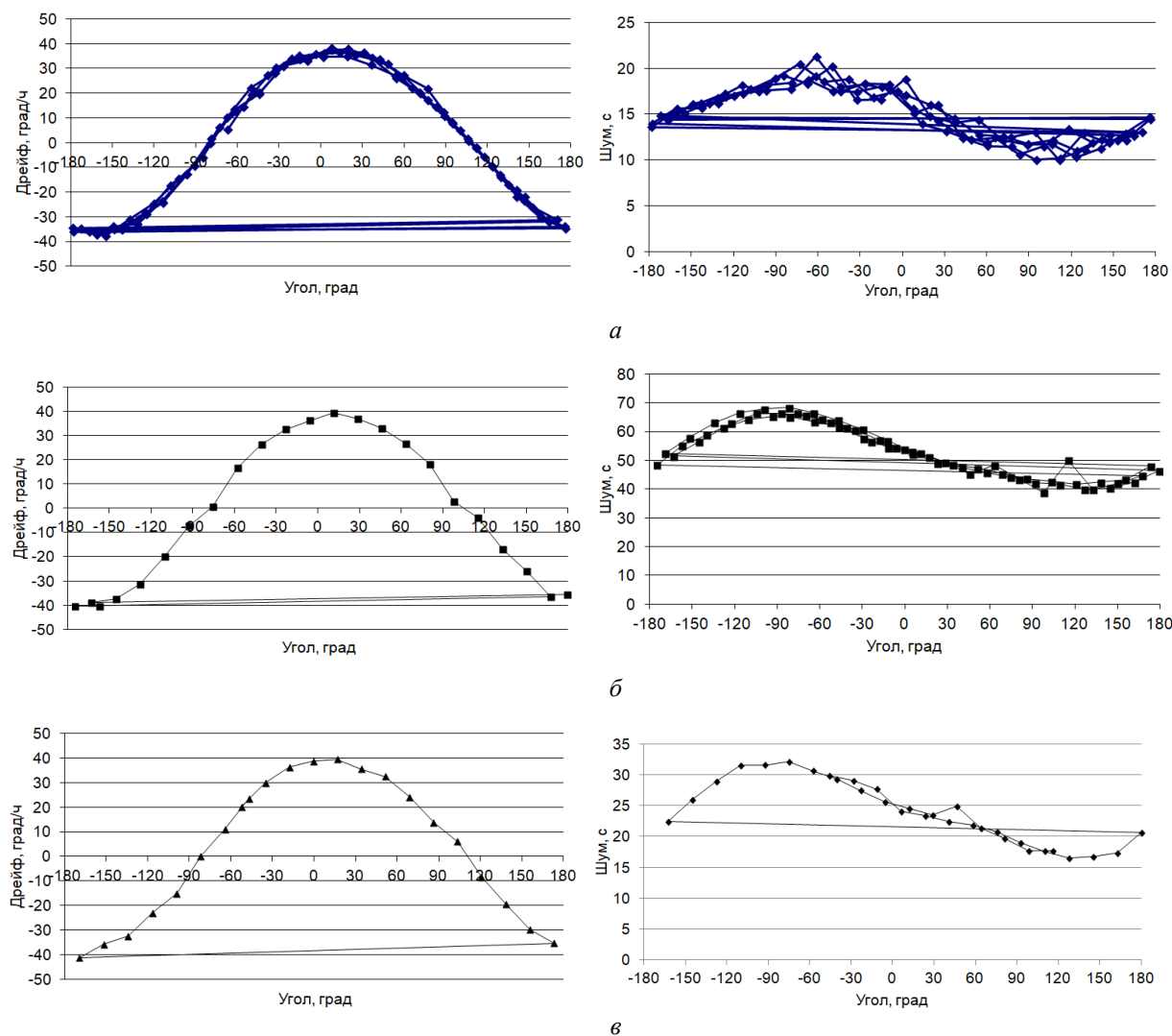


Рис. 8. Дрейф (слева) и шум (справа) угла для двухканальной системы управления:

$a - \omega = 5000$ Гц; $b - \omega = 5020$ Гц; $c - \omega = 4980$ Гц

Fig. 8. Drift (left) and noise (right) of the angle for a two-channel control system:

$a - \omega = 5000$ Hz; $b - \omega = 5020$ Hz; $c - \omega = 4980$ Hz

Закключение

Проведенные исследования на лабораторных макетах подтвердили возможности изготовления конструкции ТВГ без контура ФАПЧ без существенной потери в точности. В нашем случае это было допустимо при небольшом отклонении частоты возбуждения от резонансной (от минус 20 до плюс 20 Гц) во всех рассмотренных системах управления. При этом уровень дрейфа оставался неизменным и являлся систематическим. И поэтому его можно значительно компенсировать с помощью стандартных процедур постобработки выходных измерительных сигналов. Шум также обычно разрешается отфильтровать до приемлемого уровня.

В исследованных макетах для системы управления с измерительным устройством на переменном напряжении форма дрейфа не изменилась, а амплитуда составила 8 °/ч. Уровень

шума при отключенном кольцевом электроде составил 8 угловых секунд. При работе измерительного устройства на постоянном напряжении форма дрейфа от изменения частоты не изменилась, а амплитуда составила 50 °/ч. Уровень шума достиг 60 угловых секунд. В свою очередь, при переходе на двухканальную восьмиэлектродную систему управления на постоянном напряжении форма дрейфа также не изменилась, а амплитуда составила 40 °/ч. Уровень шума достиг 35 угловых секунд.

Таким образом, при разработке и изготовлении твердотельных волновых гироскопов среднего уровня точности для работы в стабильных климатических условиях (без сильного перепада температур) контур ФАПЧ можно исключать с платы управления, что позволит снизить стоимость и повысить надежность ее работы.

Библиографические ссылки

- 1 Журавлёв В. Ф., Климов Д. М. Волновой твердотельный гироскоп. М. : Наука, 1985. 125 с.
- 2 Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 168 с. : ил.
- 3 Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М. : Радиотехника, 2014. 176 с. : ил.
4. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В. Я. Распопов, И. А. Волчихин, А. И. Волчихин и др. ; под ред. В. Я. Распопова. Тула : Изд-во ТулГУ, 2018. 189 с.
5. Trusov, A. A. et al., mHRG: Miniature CVG with beyond navigation grade performance and real time self-calibration // 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. 2016. P. 29-32.
6. Matthews, A. An Operation and Mechanization of the Hemispherical Resonator Gyroscope // 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2018. P. 7-14.
7. Jeanroy, A.; Grosset, G.; Goudon, J.-C.; Delhaye, F. HRG by Sagem from laboratory to mass production // 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. 2016. P. 1-4.
8. Delhaye, F. HRG by SAFRAN: The game-changing technology // 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). 2018. P. 1-4.
9. Chikovani, V. Self-compensation for disturbances in differential vibratory gyroscope for space navigation / V. Chikovani, O. Sushchenko // Hindawi. 2019. P. 1-9.
10. Lee, J.; Yun, S.W., Rhim, J. Design and Verification of a Digital Controller for a 2-Piece Hemispherical Resonator Gyroscope // Sensors. 2016. P. 16-555.
11. Wan, Q., Gu, H., Fan B. A high symmetry polysilicon micro hemispherical resonating gyroscope with spherical electrodes // 2017 IEEE SENSORS. 2017. P. 1-3.
12. Li, W. et al. A Novel Micro Shell Resonator Gyroscope with Sixteen T-Shape Masses // 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). 2019. P. 434-437.
13. Lu, K., Xi, X., Li, W. Research on precise mechanical trimming of a micro shell resonator with T-shape masses using femtosecond laser ablation. // Sensors and Actuators A: Physical V. 290. 2019. P. 228-238.
14. Liu, N. and Su, Z. Research on Eigenvalue Analysis Method in Multi-Surface Metal Shell Vibratory Gyro // IEEE Access vol. 7. 2019. P. 142097-142114.
15. Xu, Z., Yi, G., Xie, Y. Influence of external load on hemispherical resonator gyro feedback control system with state constraints // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. P. 6217-6222.
16. Xiao, P., Qiu, Z., Pan, Y. Influence of Electrostatic Forces on the Vibrational Characteristics of Resonators for Coriolis Vibratory Gyroscopes // Sensors. 2020. No. 20. P. 295.
17. Guo, K., Wu Y.; Zhang, Y.; Sun, J.; Xiao, D.; Wu, X. Damping Asymmetry Trimming Based on the Resistance Heat Dissipation for Coriolis Vibratory Gyroscope in Whole-Angle Mode // Micromachines. 2020. No. 11. P. 945.
18. Zhao, W., Rong, Y., Li, C. High Precision Hemispherical Resonator Gyroscopes With Oven Control Systems // IEEE Sensors Journal. 2021. 21. 6. 7388-7401.
19. Миниатюрный волновой твердотельный гироскоп нового поколения для бескарданных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов / В. Ф. Журавлев, С. Е. Переляев, Б. П. Бодунов, С. Б. Бодунов // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : сб. материалов, СПб., 27–29 мая 2019 года. СПб. : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 241–245.
- 20 Бодунов Б. П. Разработка волнового твердотельного гироскопа для низкодинамичных и высокодинамичных объектов // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 : сб. трудов XIII Всероссийского совещания по проблемам управления ВСПУ-2019, Москва, 17–20 июня 2019 года. Москва: Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, 2019. С. 1336–1341. DOI 10.25728/vspru.2019.1336.
- 21 Штек С. Г., Жеглов М. А., Исаев М. М. Разработка узла преобразователя для съема сигналов волнового твердотельного гироскопа с кварцевым резонатором // Вестник концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 2(33). С. 65–73.
- 22 Маслов Д. А., Меркурьев И. В. Компенсация погрешностей волнового твердотельного гироскопа с электростатическими датчиками управления // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. № 9(81). С. 2.
- 23 Патент № 2704334 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Способ считывания и управления колебаниями волнового твердотельного гироскопа: № 2019109616 : заявл. 02.04.2019 : опублик. 28.10.2019 / Д. М. Климов, В. Ф. Журавлев, С. Е. Переляев, А. В. Алехин ; заявитель ФГБУН Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.
- 24 Переляев С. Е., Алехин А. В. Применение цифрового преобразования Гильберта в обработке первичных сигналов волнового твердотельного гироскопа // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2017. № 1. С. 434–437.
- 25 Трутнев Г. А., Перевозчиков К. К., Назаров С. Б. Система съема и способы измерения колебаний резонатора твердотельного волнового гироскопа // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2020. № 1(130). С. 50–63.
- 26 Шишаков К. В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2018. 264 с.

References

1. Klimov D.M., Juravlev V.F. *Volnovoi tverdotel'nyi giroskop* [Wave solid state gyroscope]. Moscow: Science Publ., 1985. 125 p. (in Russ.).
2. Matveev V.A., Lipatnikov V.I., Alehin A.V. *Proektirovanie volnovoogo tverdotelnogo giroskopa* [Designing of hemispherical resonator gyroscope]. Moscow: MGTU im. N. E. Bauman, 1997 (in Russ.).
3. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoj tverdotel'nyj giroskop. Teorija i tehnologii* [Hemispherical resonator gyro. Theory and technology]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2014 (in Russ.).
4. Raspopov V.Y., Volchikhin I.A., Volchikhin A.I., etc. *Volnovoi tverdotel'nyi giroskop s metallicheskim rezonatorom* [Wave solid state gyroscope with metal resonator]. Tula: Tula House, 2018. 189 p. (in Russ.).
5. Trusov, A. A. et al., mHRG: Miniature CVG with beyond navigation grade performance and real time self-calibration. In 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. 2016. 29-32.
6. Matthews, A. An Operation and Mechanization of the Hemispherical Resonator Gyroscope. In 2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). 2018. 7-14.
7. Jeanroy, A.; Grosset, G.; Goudon, J.-C.; Delhaye, F. HRG by Sagem from laboratory to mass production. In 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems. 2016. 1-4.
8. Delhaye, F. HRG by SAFRAN: The game-changing technology. In 2018 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems, 2018, P. 1-4.
9. Chikovani V., Sushchenko O. Self-compensation for disturbances in differential vibratory gyroscope for space navigation. In Hindawi, 2019, p. 1-9.
10. Lee, J.; Yun, S.W., Rhim, J. Design and Verification of a Digital Controller for a 2-Piece Hemispherical Resonator Gyroscope. In Sensors. 2016. 16-555.
11. Wan, Q., Gu, H., Fan B. A high symmetry polysilicon micro hemispherical resonating gyroscope with spherical electrodes. In 2017 IEEE SENSORS, 2017, 1-3.
12. Li, W. et al. A Novel Micro Shell Resonator Gyroscope with Sixteen T-Shape Masses. In 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). 2019. 434-437.
13. Lu, K., Xi, X., Li, W. Research on precise mechanical trimming of a micro shell resonator with T-shape masses using femtosecond laser ablation. In Sensors and Actuators A: Physical V. 290. 2019. 228-238.
14. Liu, N. and Su, Z. Research on Eigenvalue Analysis Method in Multi-Surface Metal Shell Vibratory Gyro. In IEEE Access vol. 7. 2019. 142097-142114.
15. Xu, Z., Yi, G., Xie, Y. Influence of external load on hemispherical resonator gyro feedback control system with state constraints. In IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. 6217-6222.
16. Xiao, P., Qiu, Z., Pan, Y. Influence of Electrostatic Forces on the Vibrational Characteristics of Resonators for Coriolis Vibratory Gyroscopes. In Sensors. 2020. 20. 295.
17. Guo, K., Wu Y.; Zhang, Y.; Sun, J.; Xiao, D.; Wu, X. Damping Asymmetry Trimming Based on the Resistance Heat Dissipation for Coriolis Vibratory Gyroscope in Whole-Angle Mode. In Micromachines. 2020. 11. 945.
18. Zhao, W., Rong, Y., Li, C. High Precision Hemispherical Resonator Gyroscopes With Oven Control Systems. In IEEE Sensors Journal. 2021. 21. 6. 7388-7401.
19. Juravlev V.F., Perelyaev S.E., Bodunov B.P., Bodunov S.B. Miniature wave solid state gyroscope of the next generation for the non-carless inertial navigation systems of unmanned aerial vehicles. In XXVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems: Materials Collection, St. Petersburg, May 27-29, 2019. - St. Petersburg: "Central Research Institute "Electro-Device" 2019. P. 241-245.
20. Bodunov B.P. *Razrabotka volnovoogo tverdotelnogo giroskopa dlya nizkodynamichnykh i vysokodynamichnykh ob"ektov* [Development of a wave solid state gyroscope for low-dynamic and high-dynamic objects]. XIII Vserossiiskoe soveshchanie po problemam upravleniya VSPU-2019 : sb. trudov XIII Vserossiiskogo soveshchaniya po problemam upravleniya VSPU-2019, Moskva, 17-20 iyunya 2019 goda [Proc. 13Th Russia-Russia Meeting on Governance of VSPU-2019 : Moscow, June 17-20, 2019]. Institute of Management Problems, 2019. Pp. 1336-1341 (in Russ.). DOI 10.25728/vspu.2019.1336.
21. Stek, S.G., Shcheglov M.A., Isaev M.M. [Development of the converter node for the removal of signals of the wave solid gyroscope with quartz resonator]. *Vestnik kontserna VKO «Almaz – Antei»*. 2020. No. 2. Pp. 65-73 (in Russ.).
22. Maslov, DA, Mercuriev I.V. [Compensation for the errors of wave solid gyroscope with electrostatic control sensors]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii*. 2018. No. 9. P. 2 (in Russ.).
23. Patent No. 2704334 C1 Russian Federation, IPC G01C 19/56. How to read and control the vibrations of the wave solid gyroscope: No. 2019109616 : 02.04.2019 : opul. 28.10.2019 / D. M. Klimov, V.F. Shhuravlev, S.E. Perelyaev, A.V. Alekhine; applicant of the Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mechanical Problems by A.A. Ishlin of the Russian Academy of Sciences (in Russ.).
24. Perelyaev, S.E., Alekhine A.V. [Application of Hilbert's digital transformation in the processing of the primary signals of the wave solid gyroscope]. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii*. 2017. No. 1. Pp. 434-437 (in Russ.).
25. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Carriers K.K. [The Removable System and ways to measure the vibrations of the resonator of solid wave gyroscopes]. *Vestnik of Moscow State University by N.E. Bauman. Ser. Instrumentation*. 2020. No. 1. Pp. 20-63 (in Russ.).
26. Shishakov K.V. *Tverdotel'nye volnovye giroskopy: volnovye protsessy, upravlenie, sistemnaya integratsiya* [Solid wave gyroscopes: wave processes, control, system integration]. Izhevsk: Izd-vo IzhGTU, 2018. 264 p. (in Russ.).

* * *

Deterioration of Accuracy Characteristics of Solid-State Wave Gyroscopes when the Excitation Frequency Is Adjusted from the Resonance Frequency

I. A. Vikhlyaev, Master's degree student, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

K. V. Shishakov, DSc in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

The paper presents the calculated and experimental study of the measure of deterioration of accuracy characteristics of solid wave gyroscopes when adjusting their frequency from the resonance one.

To do this, a simulation model was built, which was researched in the Matlab package. The measurement device is modeled at the alternating and direct current. It is shown that the measure of mismatch of the calculation grid with the period of vibrations of the gyroscope resonator was the main reason for errors in calculating the angle of the gyroscope in the simulation model. This is confirmed by the graphs of dependencies of errors on the deviation of the excitation frequency from the resonance one.

Experimental studies on laboratory models of non-industrial production confirmed the principle possibility of making a solid-state wave gyroscope design without the contour of phase auto-adjustment frequency, without a significant loss of the accuracy. To do this, three models of low-precision gyroscopes were created and researched. In the first layout, a variable-current measuring device was used, and the parametric swing of oscillations was performed by one ring electrode with an additional inclusion of a different-frequency correction path with sixteen electrodes. In the second layout, the previous diagram replaced the measuring device for working on a direct current. The third mock-up examined a two-channel eight-electrode control system.

On all layouts it was permissible to work at the excitation frequency deviation from the resonant 5 kHz equal to the value (20 Hz). At the same time, the form of the systematic drift function has not changed much. And its amplitude and random error rate also changed acceptably.

Keywords: solid wave gyroscope; frequency of excitation; resonance frequency; sampling frequency; simulation model; lab layouts; measurement device.

Получено: 29.06.2021