

УДК 531.383

DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-15-23

Оценка параметров твердотельного волнового гироскопа на различных этапах производства

Г. А. Трутнев, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
Ф. И. Спиридонов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия
Р. И. Мингазов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

В статье рассматривается твердотельный волновой гироскоп, описываются принципы его работы. Изучаются ключевые этапы изготовления, анализируются параметры твердотельного волнового гироскопа на различных этапах производства, характеризующие его качество. Поднимаются вопросы создания автоматизированных систем контроля качества. Выбирается набор параметров гироскопических изделий – физические параметры рабочих мод колебаний резонатора. Предложенный набор параметров достаточно полно характеризует качество прибора и может быть рассчитан на каждом из ключевых этапов производства. С целью формирования методики оценки параметров ТВГ анализируется математическая модель ТВГ в виде парциального осциллятора для случая свободных колебаний, связывающая динамику фазовых переменных и физических параметров. Изучается основной параметр качества гироскопического устройства – собственная скорость дрейфа волны в резонаторе. Рассматривается зависимость скорости дрейфа от физических параметров ТВГ. На основе рассмотренных математических моделей разрабатывается схема измерений предложенного набора параметров, предлагается методика, проектируются программные решения для реализации предложенных подходов. Описываются структурная диаграмма и диаграммы состояния предлагаемой системы измерений параметров ТВГ. Предлагаемая система состоит из двух компонент: измерительной и вычислительной. Описываются особенности функционирования каждой из компонент. Рассматриваются различные режимы работы системы оценки параметров ТВГ: режим свободных колебаний, вращение волновой картины, рабочий режим, переходные процессы. Изучается вопрос применимости и эффективности предложенных решений. Приводится пример использования спроектированной системы. Анализируются результаты получения непосредственной оценки скорости дрейфа в рабочем режиме и оценки скорости дрейфа, полученного по математической модели и оцененным физическим параметрам ТВГ. Рассматриваются направления совершенствования методики оценки параметров твердотельного волнового гироскопа.

Ключевые слова: твердотельный волновой гироскоп, автоматизация производства, измерение параметров, разночастотность, частота, разносторонность, добротность.

Введение

Современные задачи навигации и управления подвижными объектами требуют применения гироскопических датчиков, обладающих высокой точностью и надежностью, при этом являющихся простыми в конструктивном плане и дешевыми в производстве. Одним из таких датчиков является твердотельный волновой гироскоп (ТВГ). ТВГ является одним из наиболее сбалансированных датчиков по различным параметрам [1], таким как точность, стоимость, габариты, масса, устойчивость к механическим перегрузкам. ТВГ нашел широкое применение в различных инерциальных системах [2]. К основным преимуществам ТВГ относятся малое время готовности, длительное время непрерывной работы, сохранение инерциальной информации при краткосрочном отключении питания, высокая стойкость к механическим воздействиям, низкое энергопотребление [3].

Теория разработки ТВГ достаточно хорошо проработана и изучена [4, 5]. Основной упор в

современных научных работах делается на детальном исследовании технологического обеспечения производства изделий [6]. В производстве ТВГ, как и в других производственных сферах, наиболее актуальные задачи связаны с вопросами автоматизации (рис. 1). Ключевым элементом управления автоматизированных производств является система контроля параметров изделия, необходимая для выявления отклонений параметров изделий от допустимых на всех стадиях изготовления.

Для достижения целевых показателей качества на современных предприятиях используются автоматизируемые системы контроля качества (АСКК) на базе ЭВМ (Computer-aided Quality Control, CAQ [7–10]). Основное назначение данных систем – это снижение операционных затрат, облегчение управления производственным процессом, возможность анализа данных в режиме реального времени, высокая скорость анализа данных, управление процессами с возможностью

быстрого реагирования и устранение причин возникающих проблем.



Рис. 1. Рассматриваемые предметные области
Fig. 1. Subject are as covered

Система контроля качества применяется в большом количестве ключевых операций изготовления ТВГ, при этом непосредственный контроль качества окончательного изделия определяется метрологическими параметрами, доступными для измерения на последних этапах производства. При этом на промежуточных контрольных точках измеряется большой массив разнородной информации: геометрические, электрические, технологические, параметры материалов и др. Зависимости данных параметров с метрологическими параметрами изделий не всегда теоретически известны. Поэтому для оптимизации технологических процессов конструктивных параметров и выбора материалов необходимо определение конечного набора параметров, обуславливающих основное влияние на метрологические параметры конечного изделия.

Целью работы является разработка системы выявления несоответствия требованиям продукции на ранних этапах производства на основе оценки физических параметров на различных этапах производства и зависимости метрологических параметров от физических. Для этого требуется решить задачи определения параметров, характеризующих качество прибора, выбора адекватных зависимостей между ними, разработки методики и инструментария для оценки этих параметров.

Анализ технологического процесса производства ТВГ

Основными параметрами качества измерительного прибора ТВГ являются метрологические параметры и их стабильность во времени (рис. 2). При этом большая часть метрологических параметров может оцениваться после полной сборки механических узлов и настройки электронных компонент, поэтому для контроля качества ТВГ на начальных этапах производства необходимо сформировать набор параметров, который содержит основные факторы метрологических параметров.

Основными метрологическими параметрами ТВГ является собственная скорость дрейфа волновой картины [11, 12], нелинейность масштабного коэффициента [13], шумовые составляющие [14]. Точностные параметры прибора обуславливаются физическими параметрами отдельных узлов, таких как резонатор. Известно, что основными факторами дрейфа являются следующие параметры [15]:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\Omega \left(K + \frac{k_1}{R_0^2} E \right) - \frac{\Delta\omega N}{4\sqrt{E^2 - N^2}} \cos 4(\theta - \varphi_1) + \frac{k_2\omega N}{R_0^2} + \frac{\sin 4(\theta - \varphi_2)}{4} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) + \frac{\mu N}{A} \sin 2\gamma,$$

где θ – угловое положение стоячей волны; Ω – угловая скорость вращения основания; A – интенсивность колебаний; N – эллиптичность колебаний; k_1 и k_2 – коэффициенты; R_0 – средний радиус полусферической оболочки резонатора; ω_0 – круговая частота колебаний; τ_1 – время затухания амплитуды стоячей волны вдоль оси максимальной добротности; τ_2 – время затухания амплитуды стоячей волны вдоль оси минимальной добротности; φ_0 – угол ориентации консервативного дефекта оболочки; φ_4 – угол ориентации диссипативного дефекта оболочки; μ – параметр, определяющий мощность возбуждения; Δ_4 – разность собственных частот резонатора; γ – фазовый сдвиг между фазой колебаний оболочки и фазой импульса параметрического возбуждения.

На основе данных зависимостей точностных параметров от физических параметров можно спроектировать и реализовать однотипную процедуру оценки точностных и физических параметров на различных этапах жизненного цикла изделия от изготовления узлов и сборки датчика до его эксплуатации в составе подвижного объекта.



Рис. 2. Классификация характеристик ТВГ
Fig. 2. Classification of characteristics of TVG

Анализ публикаций в области ТВГ за последние 5 лет выявил, что преобладающее большинство статей посвящены совершенствованию основного узла ТВГ – резонатора, при этом отсутствует системное рассмотрение факторов качества ТВГ на различных этапах производства. Проведя анализ научных материалов с примерами изготовления ТВГ [16–18], была сформирована типовая структура производства ТВГ, выделяющая этапы структурных изменений изделия (рис. 3):

I. Изготовление резонатора и других узлов ТВГ (основание, корпус, электроника).

II. Напыление металлической пленки на резонатор и дополнительные технологии улучшения физических параметров.

III. Вклейка/сборка и дополнительные технологии улучшения физических параметров.

IV. Вакуумирование, сборка, сварка.

V. Сборка электрической части, настройка.

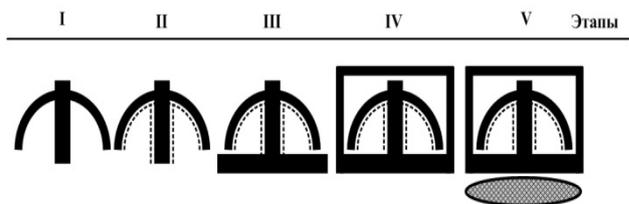


Рис. 3. Ключевые этапы производства ТВГ

Fig. 3. Key stages of TVG production

На каждом из выделенных этапов существует возможность сформировать волновую картину в резонаторе и зафиксировать гироскопический эффект.

Кроме выделенных основных операций, изменяющих структуру предмета производства, существуют дополнительные необходимые технологии повышения параметров ТВГ, визуально не меняющие структуру ТВГ: отжиг, балансировка, травление и другие (таблица).

Анализ структурных изменений в процессе производства

Analysis of structural changes in the production process

Переход между этапами	Структурные изменения	Возможные изменения параметров
I→II	Напыление токопроводящей пленки	Изменение жесткостных и массовых характеристик, изменение частотных характеристик рабочих мод колебаний, изменение демфирующих параметров, появление напряжений в пограничном слое между материалами
II →III	Сборка резонатора с основанием	Изменение демфирующих параметров вследствие конструкционного демпфирования
III→IV	Сборка в корпус	Создания низкого давления в корпусе, изменение демфирующих параметров
IV→V	Сопряжение с электронными компонентами	Формирование измерительной и вычислительной компонент ТВГ. Уменьшение влияния разночастотности посредством использования системы управления динамикой резонатора

Работа ТВГ основана на свойствах инертности упругих волн, возбужденных в твердом теле. Соответственно, как только изготовлен ключевой элемент – резонатор, можно оценивать точность реализации физического эффекта с данным резонатором, физические параметры чувствительного элемента, а также прогнозировать потенциальную точность итогового изделия на этапе V, используя прогнозные характеристики изменения метрологических и физических параметров. Прогнозные характеристики высчитываются на основе статистических данных о параметрах изделий, собранных ранее системой СКП, а также на основе имеющихся теоретических закономерностей, в частности:

– при переходе от I ко II этапу на резонатор наносится металлическая пленка, которая необходима для емкостной системы измерения перемещений резонатора. Металлическая пленка снижает общую добротность резонатора, а также, в зависимости от параметров неоднородности напыления, изменяются параметры разночастотности и разноточности;

– при переходе от III ко IV этапу датчик вакуумируется и сваривается. От уровня вакуума зависит общая добротность резонатора, которая должна сохраняться в течение всего гарантийного срока.

На изменение параметров изделия при переходе от этапа к этапу влияют технологические пара-

метры, которые подвержены влиянию случайных и систематических факторов. Степень влияния отклонения технологических параметров оценивается по картам Шухарда для физических параметров, в частности добротности. Карты Шухарда представляют собой границы допустимых изменений параметров ТВГ при переходе от этапа к этапу. Для фиксации значений параметров ТВГ на каждом из этапов используются математические модели динамик резонатора ТВГ.

Математическая модель динамики резонатора ТВГ

Для измерения колебаний кромки резонатора часто используют следующие фазовые переменные:

$$Uc = A \cos(2\pi ft - \varphi) \cos \theta - B \sin(2\pi ft - \varphi) \sin \theta,$$

$$Us = A \cos(2\pi ft - \varphi) \sin \theta + B \sin(2\pi ft - \varphi) \cos \theta,$$

где Uc , Us – выходные значения измерительной системы ТВГ, косинусный и синусный канал соответственно, A – основная амплитуда колебаний, B – квадратурная составляющая колебаний, θ – угловая ориентация волны, f – частота колебаний, φ – фаза колебаний резонатора.

Для описания динамики колебаний резонатора используются различные модели разной степени точности. Наиболее распространенными математическими моделями чувствительного элемента являются: тонкостенная полусферическая оболочка [19], нерастяжимое кольцо [20], двумерный осциллятор Ван дер Поля [21]. Для оценки физических и точностных параметров ТВГ используется математическая модель плоского парциального осциллятора в режиме свободных колебаний с настройкой на резонансную частоту [22]:

$$\dot{A} = -\frac{1}{\tau} A - \delta_{\tau} \cos(2\theta - 2\theta_{\tau}) A - \delta_f \cos(2\theta - 2\theta_f) B,$$

$$\dot{B} = -\frac{1}{\tau} B + \delta_{\tau} \cos(2\theta - 2\theta_{\tau}) B + \delta_f \cos(2\theta - 2\theta_f) A,$$

$$\dot{\theta} = -K\Omega - \delta_{\tau} \sin(2\theta - 2\theta_{\tau}) \frac{A^2 + B^2}{A^2 - B^2} - \delta_f \sin(2\theta - 2\theta_f) \frac{2AB}{A^2 - B^2},$$

где Ω – входная угловая скорость; K – масштабный коэффициент; τ – постоянная времени затухания колебаний, δ_{τ} – полуразность времени затухания в осях наибольшего и наименьшего времени затухания, θ_{τ} – ось наибольшей постоянной затухания, δ_f – разностотность резонатора, θ_f – ось наибольшей жесткости. Данная математическая модель описывает взаимосвязь динамики фазовых переменных и физических параметров и может быть использована для формирования методики оценки физических параметров на основе данных динамики фазовых переменных.

На основе значений физических переменных и зависимостей физических и метрологических характеристик оцениваются систематические погрешности ТВГ в частности скорость дрейфа:

$$SD = \frac{\sin 4(\theta - \theta_{\tau})}{4} \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right),$$

где SD – скорость изменения углового положения волны вследствие неоднородности постоянных затухания по окружному углу; τ_1 , τ_2 – значения максимальной и минимальной постоянной затухания колебаний резонатора.

Оценка физических параметров состоит из двух крупных этапов: сбор данных о свободных колебаниях резонатора и обработка данных с целью оценки физических параметров. Для получения оценок физических параметров с достаточной достоверностью необходимо наличие данных о выбегах в широком диапазоне угловых положений волны, иначе при обработке данных возникают плохо обусловленные системы уравнений, приводящие к оценкам параметров с высокой неопределенностью.

Важным элементом методики является изменение углового положения волны посредством внешних (поворотный стол) или внутренних (система управления динамикой) моментов.

Концептуальная схема оценки параметров

На основе математической модели проектируется АСКК для производства ТВГ. Дополнительно требуются следующие компоненты:

- структурная схема системы;
- методика оценки параметров ТВГ;
- описание функционирования системы.

Общая концептуальная и структурные схемы автоматизированного рабочего места оценки параметров приведены на рис. 4 и 5.

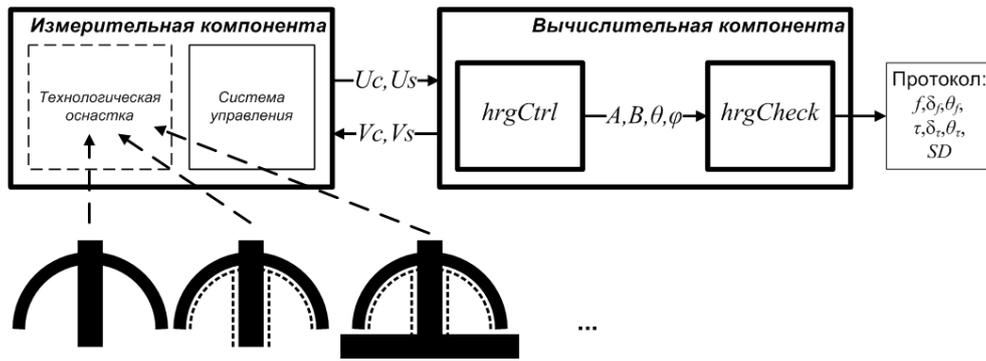


Рис. 4. Концептуальная схема измерения
 Fig. 4. Conceptual scheme of measurement

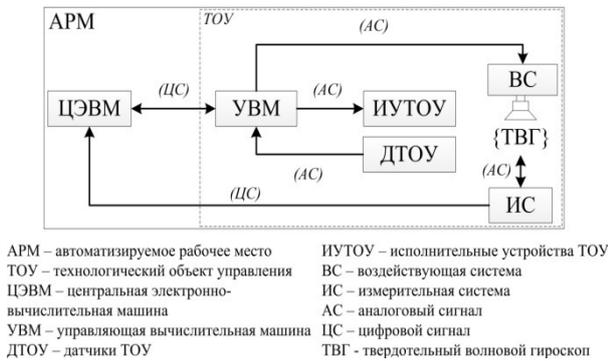


Рис. 5. Структурная схема измерения
 Fig. 5. Structure scheme of measurement

Измерительная компонента на каждом этапе имеет свои особенности. На первом этапе измерительная компонента должна включать собственные датчики перемещения резонатора и первичные аналоговые преобразователи. По мере продвижения по этапам изготовления измерительная компонента состоит все больше из элементов исследуемого ТВГ. На пятом этапе в качестве измерительной компоненты АСКК используется полностью измерительная система ТВГ без дополнительных элементов.

Неизменной частью АСКК для различных этапов остается вычислительная компонента, представляющая собой программное обеспечение и вычислительное устройство. Результатом работы АСКК является формирование данных о параметрах исследуемого изделия и сравнение полученных значений с требуемыми допусками на каждой ключевой стадии производства ТВГ.

Алгоритм процесса вычисления физических и точностных параметров можно разделить на основные этапы:

1. Настройка и инициализация процесса.
2. Сбор данных с измерительной компоненты.

3. Преобразование данных с измерительной компоненты (быстрые переменные) в фазовые переменные волновой картины.

4. Вычисление параметров на основе математической модели динамики фазовых переменных.

5. Вычисление доверительных интервалов и оценка достоверности полученных значений параметров.

6. Формирование отчета.

Порядок изменения состояний системы АСКК приведен на рис. 6.

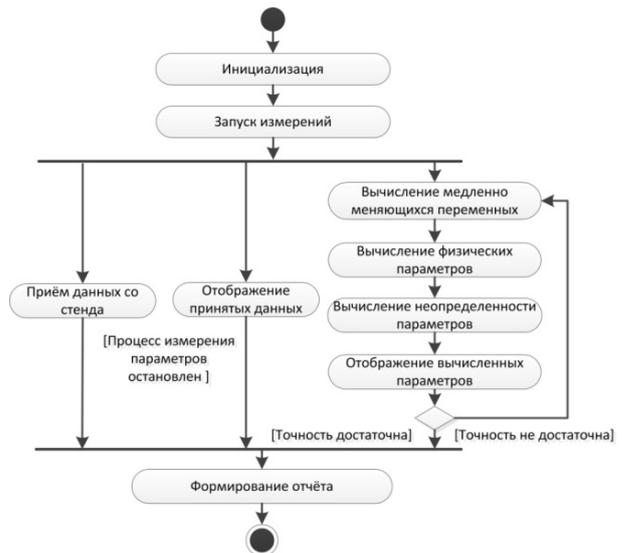


Рис. 6. Диаграмма состояния системы
 Fig. 6. System state diagram

Для решения задач контроля качества ТВГ предлагается система АСКК, основу которой составляют уникальное разработанное программное обеспечение для микроконтроллера «hrgCtrl» и программное обеспечение для персонального компьютера «hrgCheck» [23]. Программное обеспечение «hrgCtrl» реализует заданную логику переключения режимов ра-

боты прибора: режим свободного выбега волны, рабочий режим, режим вращения волновой картины. Также «hrgCtrl» производит первичную обработку данных с гироскопического прибора, формируя необходимый набор параметров для дальнейшей обработки в «hrgCheck». Программное обеспечение «hrgCheck» в соответствии с математическими моделями динамики резонатора ТВГ и математическими моделями погрешностей выходного сигнала обрабатывает данные с гироскопического прибора, сформированные «hrgCtrl». В режиме реального времени в «hrgCheck» формируются оценки параметров качества ТВГ.

Проведение экспериментов

На основе ранее описанных моделей и концепций был разработан измерительный стенд. Была проведена серия испытаний стенда на нескольких образцах датчиков ТВГ, показывающая его эффективность. Для одного из опытных образцов получены следующие оценки физических параметров: $\tau = 582 \pm 1$ секунд, $\delta_\tau = 9 \pm 0,5$ секунды, $\theta_\tau = 13 \pm 0,5$ градуса, $\delta_f = 0,0005 \pm 00001$ Гц, $\theta_f = 46 \pm 0,5$ градуса. На основе значений вычисленных физических параметров было построено ожидаемое распределение скорости дрейфа (рис. 7, сплошная линия). Также было проведено непосредственное измерение скорости дрейфа датчика при работе всех контуров управления (рис. 7, пунктирная линия). Сравнение полученных оценок скорости дрейфа показало, что среднее квадратичное отклонение составляет $0,39^\circ/\text{ч}$, максимальная абсолютная разница – $0,5^\circ/\text{ч}$, что составляет отклонение менее 10 %. Отклонения прогнозных и измеренных параметров собственной скорости дрейфа объясняются влиянием дополнительных факторов, таких как неидеальности подсистемы управления динамикой резонатора ТВГ, наличие шумовых составляющих в информационных каналах ТВГ и др. Приведенный пример подтверждает эффективность применяемых решений.

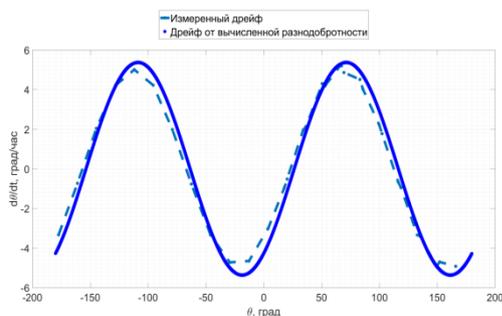


Рис. 7. Сравнение дрейфов опытного образца

Fig. 7. Comparison of prototype drifts

Выводы

В данной работе рассмотрена область автоматизации контроля качества ТВГ. Выявлен унифицированный набор параметров, по которому оцениваются метрологические параметры ТВГ, а также их стабильность при сравнении значений при переходе по ключевым этапам производства. Предложена система оценки физических параметров, включающая в себя измерительную компоненту и вычислительную компоненту. Рассмотрены ключевые элементы измерительной и вычислительной компоненты: программное обеспечение «hrgCtrl» и «hrgCheck». Спроектирована структура и функциональная схема АСКК. Приведен алгоритм, на основе которого функционирует АСКК. Эффективность спроектированной системы подтверждена имитационным моделированием и опытами с опытными образцами ТВГ.

Библиографические ссылки

1. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute для европейского ракетыносителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26, № 4 (103). С. 3–13. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013.
2. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 3–10. DOI 10.17285/0869-7035.0028.
3. Naser El-Sheimy and Ahmed Youssef. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. Satellite Navigation. 2020. DOI 10.1186/s43020-019-0001-5.
4. Климов Д. М., Журавлев В. Ф., Жбанов Ю. К. Кварцевый полусферический резонатор (Волновой твердотельный гироскоп). М.: ФГБУНИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2017. 193с.
5. Basarab M. A., Lunin B. S., Ivanov I. P. Analytical solution of the dynamics equations for a wave solid-state gyroscope using the angular rate linear approximation // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2021. № 5. С. 17–32.
6. Шишаков К. В. Математические модели для цифровых двойников неидеальных резонаторов твердотельных волновых гироскопов // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 12–23. DOI 10.22213/2410-9304-2022-3-12-23.
7. Wiecha Łukasz, Ćwikła Grzegorz. Statistical process control and CAQ systems as a tools assuring quality in the automotive industry, September 2019 Multidisciplinary Aspects of Production Engineering 2(1):336-344 DOI:10.2478/mape-2019-0033.
8. Krebs, J.; Roedel, L.; Mueller, G.: Computer Aided Inspection Planning For Automation Of On-Machine Inspection Of Customised Milling Parts. In: Herberger, D.; Hübner, M.; Stich, V. (Eds.): Proceedings of the Conference on Production Systems and

Logistics: CPSL 2023 - 1. Hannover : publish-Ing., 2023, S. 758-766. DOI: <https://doi.org/10.15488/13495>.

9. Soori M., & Asmael M. (2021). Classification of research and applications of the computer aided process planning in manufacturing systems. Independent Journal of Management & Production, 12(5), 1250-1281. <https://doi.org/10.14807/IJMP.V12I5.1397>

10. Hsu J. -Y., Wang Y. -F., Lin K. -C., Chen M. -Y. and Hsu J. H. -Y., "Wind Turbine Fault Diagnosis and Predictive Maintenance Through Statistical Process Control and Machine Learning," in IEEE Access, vol. 8, pp. 23427-23439, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968615.

11. Zhuravlev V.Ph. Temperature Drift of a Hemispherical Resonator Gyro (HRG). *MECHANICS OF SOLIDS Vol. 53 No. 3 2018. P. 241–248.*

12. Ruan, X. Ding, Y. Gao, Z. Qin and H. Li, "Analysis and Compensation of Bias Drift of Force-to-Rebalanced Micro-Hemispherical Resonator Gyroscope Caused by Assembly Eccentricity Error," in Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 32, no. 1, pp. 16-28, Feb. 2023, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3228268.

13. Трутнев Г. А. Нелинейность масштабного коэффициента твердотельного волнового гироскопа // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. № 4. С. 138–144. DOI 10.22213/2410-9304-2018-4-138-144.

14. Ruiqi Wang, Guoxing Yi, Weinan Xie, Zhennan Wei, Qi Wang, Modeling, identification and compensation for assembly error of whole-angle mode hemispherical resonator gyro, Measurement, Vol. 204, 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112064>.

15. Лунин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : монография. М. : Радиотехника, 2014. 176 с.

16. Yan Shi, Xiang Xi, Yulie Wu, WeiLi, Kun Lu, Zhanqiang Hou, Xuezhong Wu, Dingbang Xiao. Wafer-level fabrication process for micro hemispherical resonators. Transducers. 2019. EUROSENSORS XXXIII Berlin, GERMANY, 23-27 June, 2019.

17. Zhennan Wei, Guoxing Yi *, Yan Huo, Ziyang Qi and Zeyuan Xu. The Synthesis Model of Flat-Electrode HRG. Sensors 2019, 19, 1690; doi:10.3390/s19071690 www.mdpi.com/journal/sensors.

18. Распопов В. Я., Лихошерст В. В., Каликанов А. В. Волновые твердотельные гироскопы российской разработки для бортовых систем летательных аппаратов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 4. С. 148–153.

19. Нарайкин, О & Naraikin, O & Сорокин, Федор & Sorokin, F. & Козубняк, Светлана & Kozubnyak, Svetlana. Численное определение расщепления собственных частот тонкостенной оболочки с малой неосесимметричностью срединной поверхности Numerical determination of the splitting

of natural frequencies of an thin-walled shell with small nonaxisymmetric of the of the middle surface. Математическое моделирование. 35. 106-126. 10.20948/mm-2023-03-07.

20. Басараб М. А., Лунин Б. С., Колесников А. В. Численно-аналитическое решение дифференциального уравнения свободных колебаний упругого кольца при произвольном законе поворота основания // Динамика сложных систем – XXI век. 2020. Т. 14, № 2. С. 5–15. DOI 10.18127/j19997493-202002-01.

21. Журавлев В. Ф. Пространственный осциллятор Ван-дер-Поля. Технические приложения // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2020. № 1. С. 158–164. DOI 10.31857/S0572329920010249.

22. Определение параметров резонатора твердотельного волнового гироскопа и моделирование по экспериментальным данным / А. В. Кривов, Р. В. Мельников, Ф. И. Спиридонов, Г. А. Трутнев // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2019. № 2. С. 127–133.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022613573 Российская Федерация. HrgCheck: № 2022612660 : заявл. 25.02.2022; опубл. 14.03.2022 / Г. А. Трутнев, Ф. И. Спиридонов, Л. Р. Закиров, Р. И. Мингазов; заявитель акционерное общество «Ижевский электро-механический завод «Купол».

References

1. Deljeje F. [SpaceNaute onboard inertial coordinate system for the European launch vehicle "Ariane 6" based on a wave solid-state gyroscope]. *Giroskopi-ja i navigacija*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 3-13 (in Russ.).

2. Peshehonov V.G. [Prospects for the development of gyroscopy]. *Giroskopi-ja i navigacija*, 2020, vol. 28, no. 2, pp. 3-10 (in Russ.).

3. Naser El-Sheimy and Ahmed Youssef. Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends. *Satellite Navigation*. 2020. DOI 10.1186/s43020-019-0001-5.

4. Klimov D.M., Juravlev V.F., Jbanov Y.K. *Kvartsevyy i polusfericheskiy resonator (Volnovoi tverdotel'nyi giroskop)* [Quartz hemispherical resonator gyroscope]. Moscow: FGBUN IPMehim. A. Y. Ishlinskogo, 2017 (in Russ.).

5. Basarab M. A., Lunin B. S., Ivanov I. P. Analytical solution of the equations of dynamics of a wave solid-state gyroscope using a linear approximation of angular velocity. In *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Natural sciences*. 2021. No. 5. Pp. 17-32.

6. Shishakov K.V. Mathematical models for digital twins of non-ideal resonators of solid-state wave gyroscopes. In *Intelligent systems in production*. 2022. Vol. 20, no. 3. Pp. 12-23. DOI 10.22213/2410-9304-2022-3-12-23 (in Russ.).

7. WiechaŁukasz, ĆwikłaGrzegorz. Statistical process control and CAQ systems as a tools assuring

quality in the automotive industry, September 2019 Multidisciplinary Aspects of Production Engineering 2(1):336-344 DOI:10.2478/mape-2019-0033.

8. Krebs, J.; Roedel, L.; Mueller, G.: Computer Aided Inspection Planning For Automation Of On-Machine Inspection Of Customised Milling Parts. In: Herberger, D.; Hübner, M.; Stich, V. (Eds.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2023 - 1. Hannover : publish-Ing., 2023, S. 758-766. DOI: <https://doi.org/10.15488/13495>.

9. Soori, M., & Asmael, M. Classification of research and applications of the computer aided process planning in manufacturing systems. Independent Journal of Management & Production, 2021. 12(5), 1250-1281. <https://doi.org/10.14807/IJMP.V12I5.1397>.

10. J. -Y. Hsu, Y. -F. Wang, K. -C. Lin, M. -Y. Chen and J. H. -Y. Hsu, "Wind Turbine Fault Diagnosis and Predictive Maintenance Through Statistical Process Control and Machine Learning," in IEEE Access, vol. 8, pp. 23427-23439, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2968615.

11. Zhuravlev V.Ph. *Mehanika tverdogo tela* [Mechanics of Solids], 2018, vol. 53, no. 3, pp. 241-248 (in Russ.).

12. Ruan, X. Ding, Y. Gao, Z. Qin and H. Li, "Analysis and Compensation of Bias Drift of Force-to-Rebalanced Micro-Hemispherical Resonator Gyroscope Caused by Assembly Eccentricity Error," in Journal of Microelectromechanical Systems, vol. 32, no. 1, pp. 16-28, Feb. 2023, doi: 10.1109/JMEMS.2022.3228268.

13. Trutnev G. A. [Nonlinearity of the scale factor of a solid-state wave gyroscope]. *Intellektualnye sistemy v proizvodstve*. 2018, vol. 16, no. 4, pp. 138-144 (in Russ.).

14. Ruiqi Wang, Guoxing Yi, Weinan Xie, Zhennan Wei, Qi Wang, Modeling, identification and compensation for assembly error of whole-angle mode hemispherical resonator gyro, Measurement, Vol. 204, 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112064>.

15. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoi tverdotel'nyi giroskop. Teoriya i tekhnologiya : monografiya* [Wave solid-state gyroscope. Theory and

technology: monograph]. Moscow, Radio engineering, 2014. 176 p. (in Russ.).

16. Yan Shi, Xiang Xi, Yulie Wu, Wei Li, Kun Lu, Zhanqiang Hou, Xuezhong Wu, Dingbang Xiao. Wafer-level fabrication process for micro hemispherical resonators. Transducers 2019. EUROSENSORS XXXIII Berlin, GERMANY, 23-27 June, 2019.

17. Zhennan Wei, Guoxing Yi *, Yan Huo, Ziyang Qi and Zeyuan Xu. The Synthesis Model of Flat-Electrode HRG. Sensors 2019, 19, 1690; doi: 10.3390/s19071690 www.mdpi.com/journal/sensors.

18. Raspopov V.Ya., Likhoshurst V.V., Kalikanov A.V. [Wave solid-state gyroscopes of Russian design for on-board systems of aircraft]. *Izvestia of Higher educational institutions. Aviation equipment*. 2021. No. 4. Pp. 148-153 (in Russ.).

19. Naraykin, O & Naraikin, O & Sorokin, Fedor & Sorokin, F. & Kozubnyak, Svetlana & Kozubnyak, Svetlana. Numerical determination of the splitting of natural frequencies of a thin-walled shell with a small non-axisymmetry of the median surface. *Mathematical modeling*. 35. 106-126. 10.20948/mm-2023-03-07 (in Russ.).

20. Basarab M.A., Lunin B.S., Kolesnikov A.V. [Numerical and analytical solution of the differential equation of free oscillations of an elastic ring with an arbitrary law of rotation of the base]. *Dinamika slozhnykh sistem – XXI vek*. Vol. 14, no. 2. Pp. 5-15. DOI 10.18127/j19997493-202002-01 (in Russ.).

21. Zhuravlev V.F. [The spatial Van der Pol oscillator. Technical applications]. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Solid state mechanics. 2020. No. 1. Pp. 158-164. DOI 10.31857/S0572329920010249 (in Russ.).

22. Krivov A.V., Mel'nikov R.V., Spiridonov F.I., Trutnev G.A. [Determination of the parameters of the resonator of a solid-state wave gyroscope and modeling based on experimental data]. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*. 2019. Vol. 75, no. 2, pp. 127-133 (in Russ.).

23. Trutnev G.A., Spiridonov F.I., Zakirov L.R., Mingazov R.I. HrgCheck. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM* [Certificate of state registration of computer program No. 2022613573 Russian Federation. HrgCheck]. 2022, no. 2022612660 (in Russ.).

Solid State Wave Gyroscope Parameter Assessment at Various Production Stages

G. A. Trutnev, Applicant, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia;

F. I. Spiridonov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia;

R. I. Mingazov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Izhevsk, Russia

The paper considers a solid-state wave gyroscope and describes the principles of its operation. Key stages of production together with parameters of solid-state wave gyroscope, characterizing quality, are studied and analyzed. The problem of automated quality control system development is raised. The set of gyroscope parameters, physical parameters of resonator oscillation modes, is chosen. The proposed set of parameters gives full description of device quality and can be analyzed at any of key production stages. So as to develop the evaluation method for solid-state wave

gyroscope parameters a solid-state wave gyroscope mathematical model, as a free oscillation partial oscillator, that relates the phase variable dynamics with physical parameters, is analyzed.

The resonator intrinsic wave drift rate being the principal quality parameter of gyroscope is studied. The relation between the drift rate and solid-state wave gyroscope physical parameters is considered. The measuring diagram for the suggested parameter set is developed on the basis of considered mathematical models, the technique is proposed, and software solutions for suggested approach implementation is developed. Structure diagram and state chart for the proposed solid-state wave gyroscope measurement parameters are described. The proposed diagram consists of two components: measurement and computational ones.

The performance features of each component are described. Various operation modes of solid-state wave gyroscope parameter evaluation system are considered: free oscillation mode, wave pattern rotation, operation mode, and transition processes. The problem of applicability and efficiency of the proposed solutions is studied. The example of the developed system application is given. The results of obtaining the operating mode drift rate direct evaluation and drift rate evaluation obtained according to mathematical model and evaluated solid-state wave gyroscope physical parameter are analyzed. Possible ways of solid-state wave gyroscope parameter evaluation method improvement are considered.

Keywords: solid-state wave gyroscope, production automation, parameter measurement, multi-frequency, multi-quality.

Получено: 30.05.24

Образец цитирования

Трутнев Г. А., Спиридонов Ф. И., Мингазов Р. И. Оценка параметров твердотельного волнового гироскопа на различных этапах производства // Интеллектуальные системы в производстве. 2024. Т. 22, № 4. С. 15–23. DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-15-23.

For Citation

Trutnev G.A., Spiridonov F.I., Mingazov R.I. [Evaluation of parameters of solid-state wave gyroscope at different stages of production]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2024, vol. 22, no. 4, pp. 15-23 (in Russ.). DOI: 10.22213/2410-9304-2024-4-15-23.