

УДК 531.383, 534.08, 519.876  
DOI: 10.22213/2410-9304-2020-21-29

## Твердотельный волновой гироскоп с независимыми каналами измерения угла и угловой скорости

*Р. В. Мельников*, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*Г. А. Трутнев*, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*А. В. Кривов*, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск, Россия

*И. Р. Кадыров*, аспирант, Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

*В работе рассматривается новый перспективный принцип работы твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) – одновременная работа прибора в режимах свободных и вынужденных колебаний на независимых формах колебаний. Режим свободных колебаний реализует датчик угла (ДУ), режим вынужденных колебаний формирует датчик угловой скорости (ДУС). Режим ДУ и ДУС являются независимыми каналами инерциальной информации. Режим ДУС реализует измерения мгновенной угловой скорости, но имеет большие погрешности вычисления угла поворота на длинном интервале времени при работе прибора в условиях вибраций и ударов. Режим ДУ реализует устойчивое физическое интегрирование угловой скорости (эффект Брайана) в любых условиях внешних механических воздействий на длинных интервалах времени, но имеет большие погрешности в определении мгновенной угловой скорости. Достоинством ДУ является широкий динамический диапазон, датчик работает в диапазоне угловых скоростей до нескольких тысяч градусов в секунду, с угловыми ускорениями до нескольких десятков тысяч градусов в секунду в квадрате. Динамический диапазон режима ДУС существенно меньше. Режим ТВГ с одновременной независимой работой в режимах ДУ и ДУС расширяет сферу применения ТВГ, одновременно повышает надежность, точность измерений, а также увеличивает устойчивость к внешним возмущениям. В области навигации и управления движением актуальным направлением является разработка прецизионных систем, обладающих высокой точностью определения мгновенной угловой скорости, широким динамическим диапазоном и устойчивостью интегрирования угловой скорости на длительных временных промежутках. Одна из попыток справиться с одновременными требованиями к точности и робастности – это разработка двухрежимного ТВГ, переключающего режимы в зависимости от требований. Существенным недостатком двухрежимного переключающегося ТВГ является наличие переходных процессов при переключении режимов, во время которого не происходит адекватного измерения вращения. Также отсутствуют четкие критерии переключения режимов. Предлагается принципиально другой подход: разработка ТВГ, в котором два режима совмещены одновременно. Разделение режимов предлагается осуществлять не по времени, а по частоте. В резонаторе формируется не менее двух форм колебаний на своих резонансных частотах. Колебания по одной из форм используются для режима ДУ, другая форма используется для режима ДУС. Тем самым достигается формирование двух независимых каналов и получение преимуществ обоих режимов.*

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп, резонатор, датчик угловой скорости, амплитудно-частотная характеристика, система управления, математическая модель.

### Введение

Твердотельный волновой гироскоп является одним из перспективных датчиков для создания систем управления, стабилизации и навигации [1–5]. Преимуществами ТВГ является отсутствие вращающихся частей, простота конструкции, высокая устойчивость к внешним вибрациям и ударам, низкое электропотребление, сохранение инерциальной информации при перерывах в питании и другое [6–10]. Актуальной задачей в области ТВГ является повышение точности и надежности датчиков. Вопросы точности и надежности решаются различными типами датчиков, которые выбираются исходя из требований к точности измерения и условиям их функционирования. На сегодняшний день не существует ни одного универсального подхода.

Датчики можно классифицировать по следующим признакам:

1. Режим работы: режим свободных колебаний, режим вынужденных колебаний.
2. Динамический диапазон: широкий ( $\pm 10000^\circ/\text{с}$ ), средний ( $\pm 100^\circ/\text{с}$ ), узкий ( $\pm 1^\circ/\text{с}$ ).
3. Погрешность измерения: низкая ( $0,0001\text{--}0,1^\circ/\text{ч}$ ), средняя ( $0,1^\circ/\text{ч} \text{--} 10^\circ/\text{ч}$ ), высокая (более  $10^\circ/\text{ч}$ ).
4. Полоса пропускания: широкая (более 100 Гц), средняя (до 10 Гц), узкая (до 1 Гц).

Классификация не является четкой, она необходима для иллюстрации противоречивости требований к датчикам: требования по увеличению одного параметра приводят к ухудшению других параметров. Примером может служить противоположность параметров полосы пропускания

и режима работы датчика. Режим свободного гироскопа обладает широким динамическим диапазоном, высокой полосой пропускания, но данный режим относится к среднему и низкому уровню точности. Режим вынужденных колебаний обладает потенциально высокой точностью, но это существенно снижает значения полосы пропускания и динамического диапазона [11]. Эксплуатация многих изделий не является однородной во времени, то есть периоды эксплуатации изделия можно разделить на стадии с разными требованиями к изделию на разных этапах жизни. Примером может служить запуск ракетно-носителя, на котором установлен блок гироскопических датчиков. Во время подготовки к полету, датчик не испытывает никаких существенных перегрузок по значениям вибрации, ударов, температурным градиентам или другим параметрам, но требует высокой точности измерения вращения Земли. Для данного этапа подходит режим вынужденных колебаний, обеспечивающий высокую точность измерений малых угловых скоростей. Во время непосредственного запуска (вибрации, ускорения и т. д. можно взять на сайте РОСКОСМОСа) от датчиков требуется устойчивость работы и адекватность выходных значений (робастность) в условиях высоких нагрузок. Робастность лучше всего соответствует режиму свободных колебаний, который обеспечивает максимальный уровень устойчивости выходных характеристик к перегрузкам. Во время полета датчик испытывает меньшие нагрузки и должен обеспечивать средний динамический диапазон и среднюю точность – данная стадия является граничной, и заранее сложно сказать, какой из режимов будет работать лучше.

Для удовлетворения противоречивых требований используются двухрежимные датчики. В данной работе предложен принцип построения датчика с одновременной работой двух режимов, что устраняет основную проблему существующих двухрежимных датчиков – переходные процессы между переключениями режимов.

Таблица 1. Области применения гироскопов

№	Область применения	Основные требования	Применимость
1	Авиационная техника (гражданская)	Высокая надежность	Не применим
2	Авиационная техника (военная)	Высокая надежность, широкий динамический диапазон, высокая точность	Применим
3	Космическое направление	Высокая надежность, широкий динамический диапазон, высокая точность	Применим
4	Подвижные наземные объекты	Низкая стоимость	Не применим
5	Подвижные надводные объекты	Низкая стоимость	Не применим
6	Подвижные подводные объекты	Высокая надежность, широкий динамический диапазон, высокая точность	Применим
7	Ракетное вооружение	Надежность, низкая стоимость	Не применим

### Обзор существующих датчиков

В патенте US 2006/0248953 A1 описывается система управления ТВГ, которая работает в режиме свободного угла и в режиме вынужденных колебаний. Переключение между режимами осуществляет цифровой процессор. В каждый момент времени ТВГ работает только в одном режиме.

Применение двух форм колебаний для определения угла было предложено использовать в патенте US 2017/0074656 A1, но данный принцип реализован в области МЭМС гироскопов. МЭМС используют другой чувствительный элемент, измерительную и вычислительную компоненты в сравнении с ТВГ. В данном патенте предлагается сконфигурировать объемно акустические волны для работы с двумя парами независимых мод вместо одной, чтобы смягчить влияние изменений в зазорах. В частности, резонатор гироскопа сконфигурирован для одновременного возбуждения с целью повторения двух разных резонансных мод 1 и 2 (упоминаемых как основной режим и составной режим) с тем же набором электродов, используемых для возбуждения двух резонансных мод (т. е. все управляющие электроды используются для возбуждения двух режимов). Когда датчик испытывает внешнее вращение, энергия соединяется с управляемыми модами вибрации с двумя соответствующими ортогональными сенсорными модами посредством силы Кориолиса. Один и тот же набор чувствительных электродов используется для определения двух режимов. Первая мода второй формы колебаний по отношению к возбуждающим электродам является основной, вторая (составная) мода является синфазной.

Таким образом, изменение зазора будет влиять на измерение скорости, измеренной только в основном режиме.

Обзор областей применения основных мировых производителей, таких как Sagem (Франция), Northrop Grumman (США) [12, 13], представлен в табл. 1.

Наиболее перспективные области применения предлагаемого типа датчиков:

- 1) авиационная военная техника (боевые вертолеты и самолеты);
- 2) космические аппараты (ракетносители и спутники);
- 3) подводные объекты (подводные лодки, автономные роботы).
- 4) бурильные колонны для наклонных нефтяных и газовых скважин.

Наибольшее количество объектов, которые потенциально нужно оснастить гироскопическими приборами, относятся к области авиационной техники.

Поскольку ТВГ способен работать на разных режимах, логично предположить, что и полоса пропускания должна отличаться. Согласно источникам [15] полоса пропускания гироскопа в режиме ДУС намного ниже полосы пропускания в режиме ДУ и равна менее 5 Гц. Часто узкой полосы пропускания режима ДУС не достаточно, например, для высокоманевренных объектов. Для расширения сфер применения ТВГ существуют датчики, переключающие режимы в зависимости от условий работы. К недостаткам таких датчиков можно отнести наличие переходного процесса при переключении между режимами. В работе [16] проведено исследование и получены данные этих процессов (рис. 1).

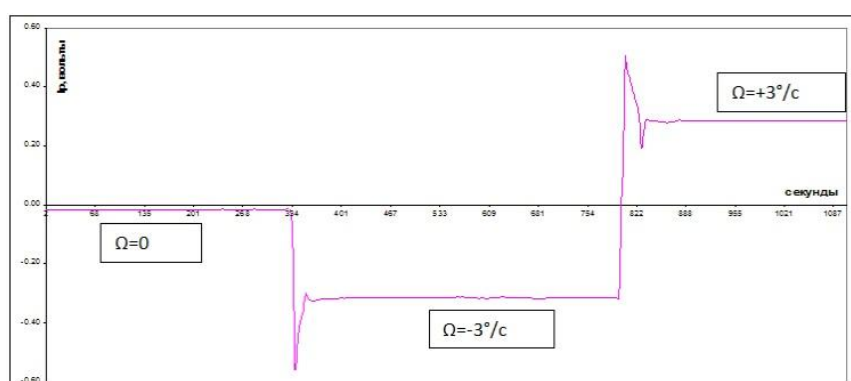


Рис. 1. Переходный процесс гироскопа при переключении режимов управления

Из рисунка видно, что в первый момент времени гироскоп работал в режиме ДУС, удерживая волну в одном положении, измеряя угловую скорость, равную 0. Далее происходило повышение скорости до 3 град/с, гироскоп в данном случае осуществил переключение с режима ДУС на режим ДУ. Наблюдается наличие переходного процесса.

Для разработки двухрежимного датчика требуется решить следующие задачи:

- 1) исследовать АЧХ и ФЧХ гироскопических датчиков;
- 2) исследовать точностные характеристики двухрежимного ТВГ, разработать математическую модель и имитационную модель;
- 3) исследовать процессы балансировки резонатора ТВГ для двухрежимного датчика;
- 4) разработать общую схему двухрежимного датчика.

#### **Исследование точностных характеристик ТВГ при использовании двух форм колебаний**

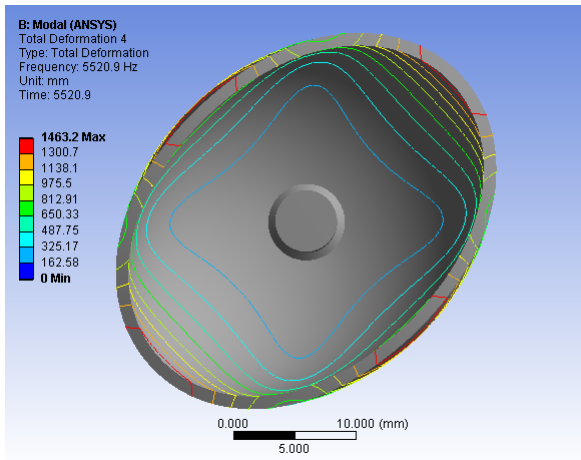
Основным элементом высокоточных ТВГ является кварцевый резонатор [14]. Резонатор – это упругая оболочка с некоторым количеством парных мод колебаний. Для работы прибора обычно

используют вторую форму изгибных колебаний резонатора. Хотя для получения инерционной информации может быть использована любая форма колебаний, не только вторая, но, например, и третья (рис. 2, 3). Масштабный коэффициент различных форм отличается. Для построения ТВГ с двумя независимыми каналами инерциальной информации, полученной с одного резонатора, требуется соблюдение следующие требования:

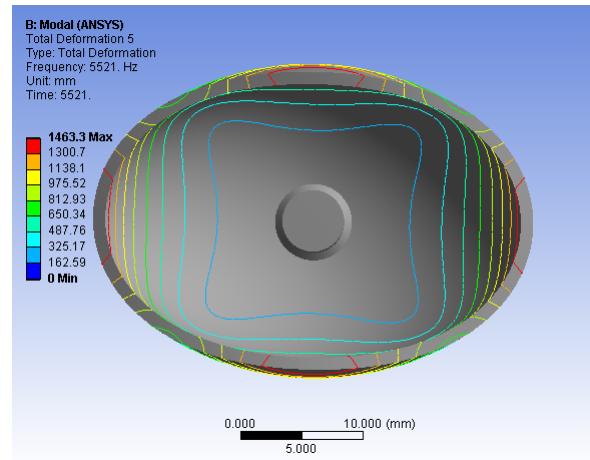
- 1) независимость рабочих форм колебаний. Необходимо разработать методику балансировки резонатора, которая устраняет взаимное влияние двух рабочих форм;
- 2) расширенные возможности измерительного компонента. Необходимо трансформировать механические колебания на двух резонансных частотах в электрические токи. При этом необходимо, чтобы полезная информация из получаемых электрических сигналов выделялась без интерференции колебаний;
- 3) повышенная мощность вычислительных средств. Необходимо разработать более сложную математическую модель измерительной системы, а также предусмотреть возможность реализации использования производительных цифровых процессоров;

4) независимость управляющих воздействий. Для исключения влияния управления одной формой на динамику другой формы необходимо

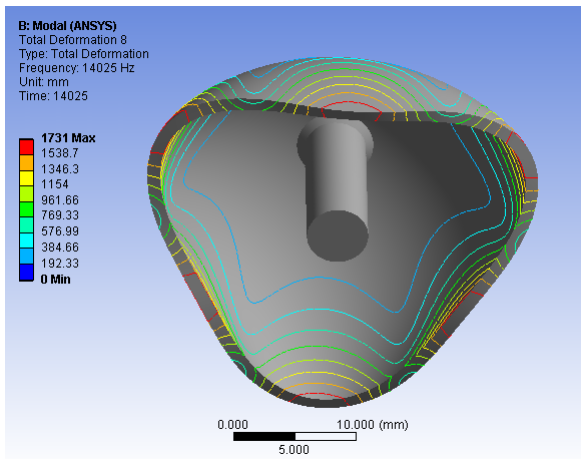
оптимизировать управляющие напряжения с учетом перекрестного влияния.



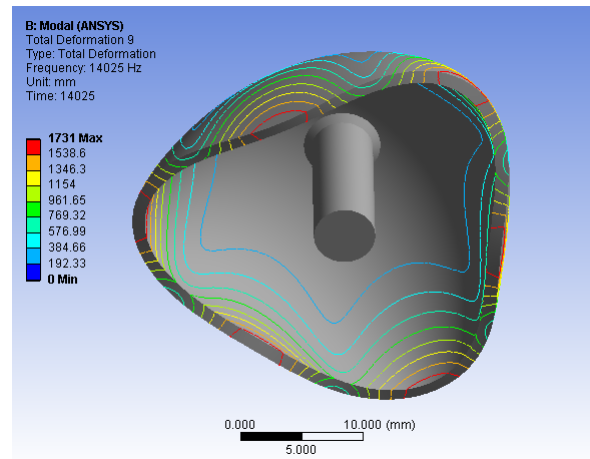
а



б



в



г

Рис. 2. Собственные формы колебаний резонатора по второй форме колебаний и по третьей, имеющего две моды колебаний: а – первая мода второй формы колебаний; б – вторая мода второй формы колебаний; в – первая мода третьей формы колебаний; г – вторая мода третьей формы колебаний

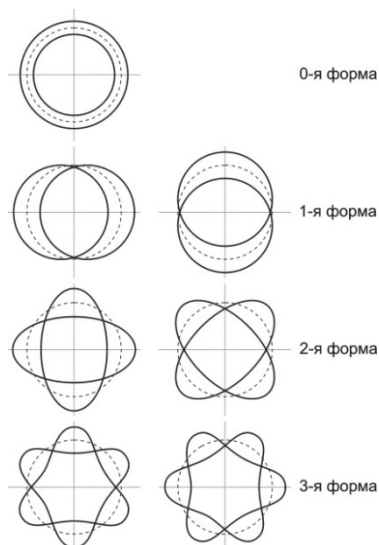


Рис. 3. Формы колебаний кромки резонатора

Главным преимуществом исследуемого датчика одновременной независимой работы в двух режимах является высокая точность, широкий динамический диапазон и отсутствие переходных процессов ввиду отсутствия переключения между режимами. Достоинства являются следствием формирования двух независимых форм колебаний в резонаторе, которые являются независимыми источниками инерциальной информации.

Общая структурная схема ТВГ приведена на рис. 4. Основным элементом является резонатор, за перевод механических колебаний в электрические сигналы отвечает система съема. Далее электрические сигналы оцифровываются и на основе математической модели далее интерпретируются в вычислительной компоненте.

Также в вычислительном компоненте формируются значения выходных значений (угловой скорости режим ДУС) и полного интеграла угловой скорости (режим ДУ), а также рассчитываются сигналы рассогласования для системы

управления. Система управления формирует необходимые напряжения на электродах управления, на основе значений сигналов рассогласования, рассчитанных в вычислительном компоненте.

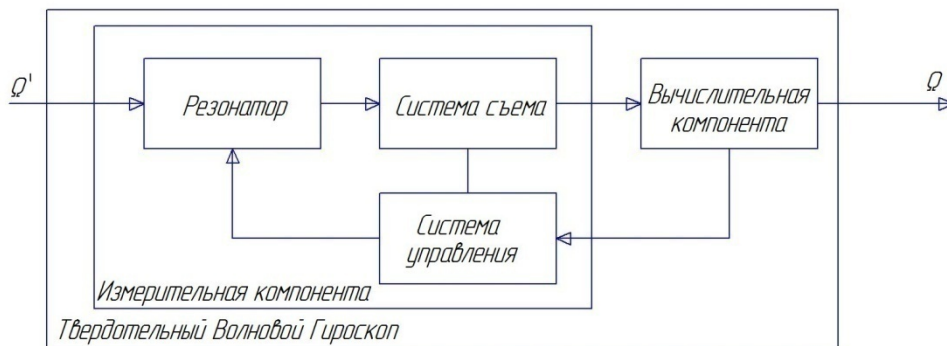


Рис. 4. Схематичная структура логики работы ТВГ

Принципиальная схема работы ТВГ содержит следующие аспекты:

1. В резонаторе помимо двух мод, относящихся ко второй форме колебаний (четыре узла и четыре пучности), возбуждается еще две моды, относящиеся к третьей форме колебаний (шесть узлов и шесть пучностей).

2. Система съема формирует сигналы, из которых могут быть получены параметры двух форм колебаний. Для оценки параметров второй и третьей формы колебаний по теореме Котельникова требуется не менее 7 датчиков.

3. В цифровом процессоре решается задача интерпретации сигналов системы съема, даются оценки фазовых переменных колебаний. В зависимости от выбранных математических моделей необходимо выбирать микросхемы с нужным уровнем вычислительной мощности.

4. Система управления нового типа датчика должна содержать контур для управления параметрами каждой из форм колебаний, а также необходимы силы, уменьшающие взаимное влияние форм колебаний. Количество управляющих электродов определяется управляющими силами. При этом важно учесть влияние интерференции различных контуров.

Работу двухрежимного датчика можно описать в виде парциального осциллятора [17]:

$$\begin{aligned} x' + K_1 \Omega y' + x &= 0, \\ y' - K_1 \Omega x' + y &= 0, \\ p' + K_2 \Omega q' + p &= \alpha \theta_3 q', \\ q' - \Omega p' + q &= -\alpha \theta_3 p', \end{aligned}$$

$$\theta_2 = F(x, y), \theta_3 = F(p, q),$$

где  $x$  – амплитуда первой моды второй формы колебаний (рис. 2);  $y$  – амплитуда второй моды второй формы колебаний (рис. 3);  $p$  – амплитуда первой моды третьей формы колебаний (рис. 4);  $q$  – амплитуда второй моды третьей формы колебаний (рис. 9);  $K_1 \approx 0,3, K_2 \approx 0,25$  – масштабные коэффициенты Брайана для второй и третьей формы колебаний соответственно;  $\Omega$  – внешняя угловая скорость вращения (работа прибора направлена на выработку оценки  $\Omega$ );  $\alpha$  – коэффициент обратной связи для контура управления угловым положением (в модели учитывается только пропорциональное управление);  $\theta_2, \theta_3$  – угловое положение волны второй и третьей формы соответственно;  $F$  – преобразование осуществляемое системой съема и блоком цифровой обработки сигналов для расчета значения угловых положений. Для идеального случая изготовления резонатора и системы съема (отсутствие погрешностей) функция  $F$  задается следующим образом:

$$\begin{aligned} F(u, v) &= \\ &= \arctan \left( \frac{A_u^2 - B_u^2 + A_v^2 - B_v^2}{(A_u A_v + B_u B_v)} \right) / 2, \\ u(t) &= A_u \cos(\omega t) + B_u \sin(\omega t), v(t) = \\ &= A_v \cos(\omega t) + B_v \sin(\omega t), \end{aligned}$$

медленно меняющиеся амплитуды  $A_u, A_v, B_u, B_v$  выделяются с помощью дискретного преобразования Фурье.

### Имитационное моделирование работы ТВГ

Для проверки возможности функционирования прибора при одновременной независимой работе режимов ДУ и ДУС была разработана имитационная модель функционирования гироскопа в программном продукте Matlab/Simulink. В качестве основы положен эффект Брайана,

создается и управляется стоячая волна согласно известным законам и силам Кориолиса. Осуществлена модель работы в режимах ДУС и ДУ, которая на рис. 5 и 6 представлена в виде блок-схем. В блоке HRG реализована математическая модель в виде дифференциального уравнения парциального осциллятора.

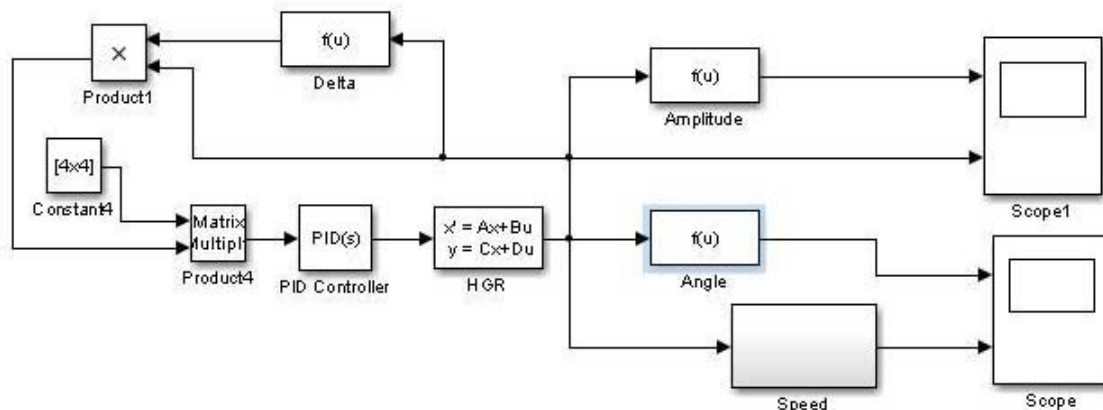


Рис. 5. Структура имитационной модели



Рис. 6. Форма инициализации параметров модели

На рис. 7 представлен график скорости от времени работы в режиме ДУС при моделировании. А на рис. 8 представлен график угла от времени работы режима ДУ при постоянной угловой скорости.

На рис. 9 представлен график отклика режима работы ДУС при линейно увеличивающейся скорости, а на рис. 10 – график отклика режима работы ДУ при линейно увеличивающейся угловой скорости.

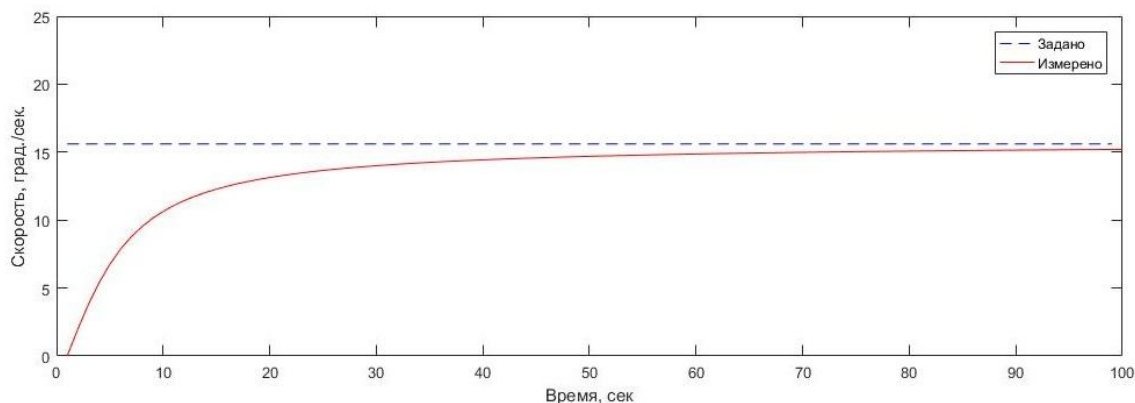


Рис. 7. График скорости от времени работы прибора в режиме ДУС (постоянная угловая скорость)

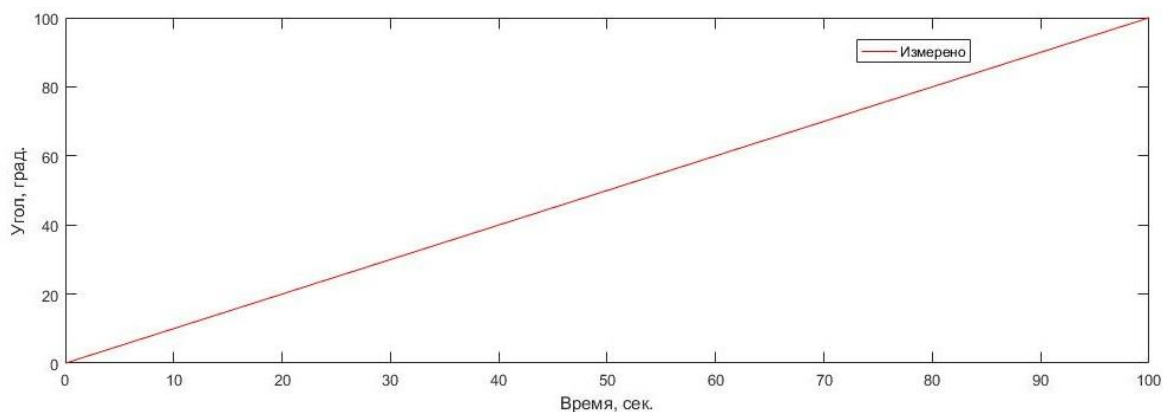


Рис. 8. График угла от времени работы прибора в режиме ДУ (постоянная угловая скорость)

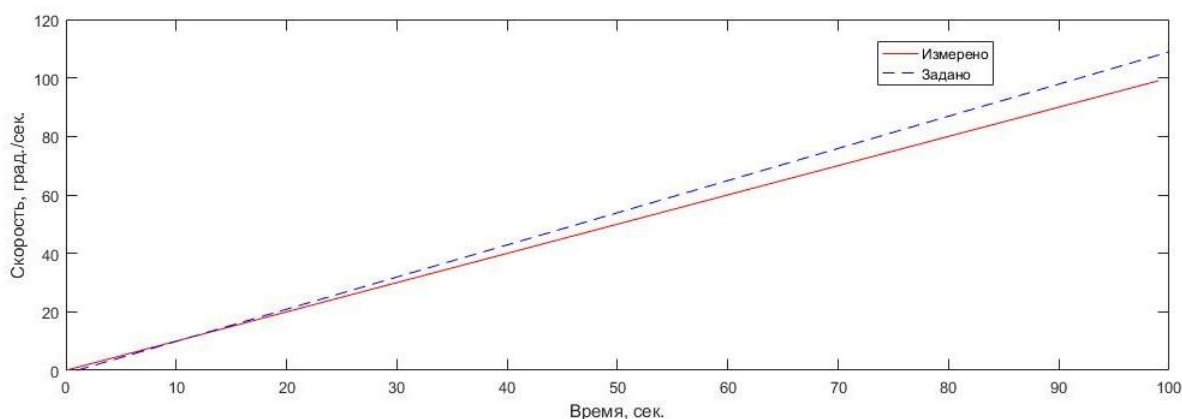


Рис. 9. График скорости от времени работы прибора ДУС при растущей линейно угловой скорости

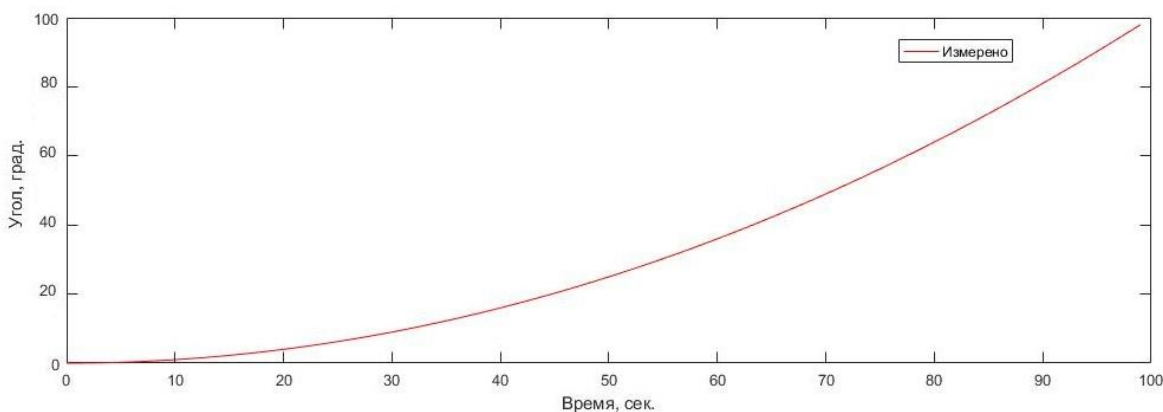


Рис. 10. График угла от времени работы прибора ДУ при растущей линейно угловой скорости

Разработанная имитационная модель показывает принципиальную возможность создания двухрежимного датчика с одновременной работой двух режимов.

**Выводы и заключения**

В данной работе проанализированы известные реализации прибора на основе ТВГ с комбинированной работой режимов ДУ и ДУС. Выявлены основные преимущества и недостатки существующих аналогов, описаны их основные известные характеристики и проведено сравне-

ние с предлагаемой системой на основе одновременной работы режимов ДУ и ДУС в ТВГ.

Описана возможность работы и принципиальные отличия функционирования прибора на основе ТВГ, который совмещает работу ДУ и ДУС. Создана математическая модель парциального осциллятора двухрежимного ТВГ, которая позволяет провести численные расчеты. Результаты численного имитационного моделирования так же подтверждают принципиальную возможность работы данного датчика и воз-

возможность в обработке и интерпретации выходных сигналов прибора ТВГ. Дальнейшими исследованиями данной работы являются численное моделирование динамики резонатора ТВГ, создание математической модели, описание принципа балансировки полусферического резонатора с целью устранения взаимного влияния форм колебаний, создание опытного макета ТВГ.

#### Библиографические ссылки

1. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. №1.

2. Журавлев В. Ф. Волновой твердотельный гироскоп: современное состояние теории // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент. 2011. № 2 (33). С. 118–123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26104278>.

3. Новое поколение ИНС на основе ВТГ / С. Негри, Э.Лабарр К., Линьон, Э. Брунштейн, Э. Салаён // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 1 (92). С. 49–59. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25774581>.

4. Meyer D., Rozelle D. Milli-HRG inertial navigation system // Gyroscopy and navigation. Vol. 3. No. 4. 2012. Pp. 227-234. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24144813>

5. Жанруа Алан, Буве А., Ремиллье Жорж. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4 (83). С. 24–34.

6. Климов Д. М. Журавлев В. Ф., Жбанов Ю. К. Кварцевый полусферический резонатор (Волновой твердотельный гироскоп). М.: ФГБУН ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2017. 193 с.

7. Qiu B., Li P., Wang J. Full digital control of hemispherical resonator gyro under force-to-rebalance mode // IEEE Sensors Journal. Т. 15. №1. 2015. P. 71-75. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2339229. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24635569>.

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

9. Лунин Б. С. Физико-химические разработки полусферического резонатора ВТГ. М.: Изд-во МАИ, 2005. 224 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19637401>.

10. Журавлев В. Ф. ВТГ, содержащий  $m$  информационных и  $n$  управляющих электродов // Механика твердого тела. 2015. № 4. С. 11–15.

11. Журавлев В. Ф., Переляев С. Е. Волновой твердотельный гироскоп – инерциальный датчик нового поколения с комбинированным режимом функционирования // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 425–431.

12. Jeanroy A., Bouvet A., Remillieux G. HGR and marine applications, Gyroscopy and navigation, Т.5, № 2, 2014. P. 67-74

13. Phillips Edward H. Northrop grumman targets newport news shipbuilding, Aviation week & space technology. 2001. Vol. 154. No. 20. P. 80.

14. Измерительно-вычислительный комплекс ТВГ / Г. А. Трутнев, С. Б. Назаров, К. К. Перевозчиков, А. В. Щеняцкий // Интеллектуальные системы в производстве. 2017. Т.15, № 3. С. 62–72. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.

15. Журавлев В. Ф., Переляев С. Е. Волновой твердотельный гироскоп – инерциальный датчик нового поколения с комбинированным режимом функционирования // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. № 1. С. 425–431.

16. Там же.

17. Журавлев В. Ф. Двумерный осциллятор Ван дер Поля с внешним управлением // Нелинейная динамика. 2016. Т. 12. № 2. С. 211–222. DOI: 10.20537/nd1602004.

#### References

1. Peshekhonov V.G. [Current state and development prospects of gyroscopic systems]. *Гироскопия и навигация*. 2011. No. 1 (in Russ.).

2. Zhuravlev V.F. [Wave solid-state gyroscope: state of the art]. *Aktual'nye problemy aviatsionnykh i aэрокосмических sistem: protsessy, modeli, eksperiment*. 2011. No. 2. Pp. 118-123. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26104278> (in Russ.).

3. Negri S., Labarr E., Lin'on K., Brunshtein E., Salaen E. [A new generation of INS based on HTG]. *Гироскопия и навигация*. 2016. Vol. 24. No. 1. Pp. 49-59. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.1.049-059. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25774581> (in Russ.).

4. Meyer D., Rozelle D. Milli-HRG inertial navigation system // *Gyroscopy and navigation*. 2012. Vol. 3. No. 4. Pp. 227-234. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24144813>.

5. Zhanrua Alan, Buve A., Remill'e Zhorzh [Wave solid state gyroscope and its application in marine instrumentation]. *Гироскопия и навигация*. 2013. No. 4. Pp. 24-34 (in Russ.).

6. Klimov D.M. Zhuravlev V.F., Zhanov Iu.K. *Kvartsevyi polusfericheskii rezonator (Volnovoi tverdotel'nyi giroskop)* [Quartz Hemispherical Resonator (Wave Solid State Gyroscope)]. Moscow: FGBUN IP-Mekh im. A.Iu.Ishlinskogo RAN, 2017. 193 p. (in Russ.).

7. Qiu B., Li P., Wang J. Full digital control of hemispherical resonator gyro under force-to-rebalance mode // *IEEE Sensors Journal*. Vol. 15. No. 1. 2015. Pp. 71-75. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2339229. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24635569>.

8. Lunin B.S., Matveev V.A., Basarab M.A. *Volnovoi tverdotel'nyi giroskop. Teoriia i tekhnologii : monografiia* [Wave solid state gyroscope. Theory and tech-



nology]. Moscow: Radiotekhnika Publ., 2014. 176 p. (in Russ.).

9. Lunin B.S. *Fiziko-khimicheskie razrabotki polusfericheskogo rezonatora VTG* [Physicochemical developments of the HTG hemispherical resonator.]. Moscow: Izd-vo MAI, 2005. 224 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=19637401>.

10. Zhuravlev V.F. [HTG containing m information and n control electrodes]. *Mekhanika tverdogo tela*. 2015. No. 4. Pp. 11-15 (in Russ.).

11. Zhuravlev V.F., Pereliaev S.E. [Wave solid-state gyroscope - new generation inertial sensor with combined operation mode]. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii*. 2016. No. 1. Pp. 425-431 (in Russ.).

12. Jeanroy A., Bouvet A., Remillieux G. HGR and marine applications, *Gyroscopy and navigation*. 2014. Vol. 5, no. 2. Pp. 67-74.

13. Phillips Edward H. Northrop grumman targets newport news shipbuilding, *Aviation week & space technology*, 2001, vol. 154, no. 20. P. 80.

14. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Perevozchikov K.K., Shcheniatskii A.V. [Measuring and computing complex TVG]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2017. Vol. 15, no. 3. Pp. 62-72. DOI: 10.22213/2410-9304-2017-3-62-72.

15. Zhuravlev V.F., Pereliaev S.E. [Wave solid-state gyroscope - new generation inertial sensor with combined operation mode]. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii*. 2016. No. 1. Pp. 425-431 (in Russ.).

16. Ibid.

17. Zhuravlev V.F. [Two-dimensional Van der Pol oscillator with external control]. *Nelineinaya dinamika*. 2016. Vol. 12. No. 2. Pp. 211-222. DOI: 10.20537/nd1602004 (in Russ.).

\*\*\*

### A Solid-State Wave Gyro with Independent Channels for Measuring the Angle and Angular Velocity

R. V. Melnikov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

G. A. Trutnev, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

A. V. Krivov, Post-graduate, Kalashnikov ISTU, Izhevsk, Russia

I. R. Kadyrov, Post-graduate, Udmurt State University, Izhevsk, Russia

*A new promising principle of a hemispherical resonator gyroscope (HRG) operation is considered in this work - simultaneous operation of the device in free and forced oscillation modes on independent vibration modes. The mode of free vibrations is realized by an angle sensor (AS); the mode of forced oscillations is formed by a sensor of angular velocity (AVS). The angle sensor and angular velocity sensor are independent channels of inertial information. The AVS mode implements measurements of the instantaneous angular velocity. Still, it has large errors in calculating the angle of rotation over a long time interval when the device operates in conditions of vibration and shock. The remote control mode implements stable physical integration of the angular velocity (Brian effect) under external mechanical stress conditions for long time intervals. Still, it has large errors in determining the instantaneous angular velocity. The remote control's advantage is a wide dynamic range; the sensor operates in the range of angular velocities up to several thousand degrees per second, with angular accelerations up to several tens of thousands of degrees per second squared. The dynamic range of the AVS mode is much smaller. The HRG mode with simultaneous independent operation in the remote control and the remote control system expands the scope of the HRG; simultaneously, the reliability, accuracy of measurements, and resistance to external disturbances are increased. In navigation and motion control, an urgent direction is the development of precision systems with high accuracy in determining the instantaneous angular velocity, a wide dynamic range, and the stability of the integration of angular velocity over long time periods. One of the attempts to cope with the simultaneous requirements for accuracy and robustness is the development of a dual-mode HRG, switching modes depending on the requirements. A significant drawback of a dual-mode switching HRG is transients' presence when switching modes, during which an adequate measurement of rotation does not occur. There are also no clear criteria for switching modes. A fundamentally different approach is proposed: the development of HRG, in which two modes are combined simultaneously. Separation of modes is proposed to be carried out not in time but the frequency. At least two forms of oscillations are formed in the resonator at their resonant frequencies. Fluctuations in one form are used for the AS remote control mode; another form is used for the AVS remote control mode. It ensures the formation of two independent channels and obtaining the benefits of both modes.*

**Keywords:** Solid-state wave gyroscope, resonator, angular velocity sensor, amplitude-frequency characteristic, control system, mathematical model.

Получено: 12.11.2020