

Радиолокация и радионавигация

УДК 531.77, 531.383

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-4-81-89>

## Алгоритмы повышения точности твердотельного волнового гироскопа

К. А. Смирнов<sup>✉</sup>, Е. А. Зарубайло

АО "НИИ командных приборов", Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> kiryasmirnof@gmail.com

### Аннотация

**Введение.** Твердотельный волновой гироскоп (ТВГ) является одним из перспективных датчиков инерциальной информации, применяемых в составе навигационных систем летательных и космических аппаратов. В последнее десятилетие большое внимание уделяется проблеме повышения точности ТВГ. Одним из возможных решений актуальной проблемы повышения точности измерений инерциальных навигационных приборов является применение алгоритмов, что и послужило причиной проведения работы, по результатам которой написана настоящая статья.

В АО "НИИ командных приборов" в рамках научно-исследовательской работы разрабатывается датчик угловой скорости (ДУС) компенсационного типа на базе ТВГ с металлическим резонатором цилиндрической формы, электростатической системой возбуждения колебаний и съема информации, с цифровой обратной связью.

**Цель работы.** Разработать методы повышения точности ТВГ на основании связи между каналами измерения и возбуждения, а также с помощью учета погрешности замыкания обратной связи.

**Материалы и методы.** Для получения информации о выходном сигнале чувствительного элемента использовано быстрое преобразование Фурье. Для управления воздействием на чувствительный элемент применен ПИД-регулятор.

**Результаты.** Разработаны методы повышения точности ДУС на базе ТВГ посредством компенсации погрешностей выходного сигнала. Эксперименты подтвердили корректность работы предложенного метода. В результате применения разработанного алгоритма снижения нестабильности нулевого сигнала скорости среднеквадратическое отклонение этого сигнала в запуске уменьшилось на 76.4 %. В результате применения метода повышения точности с помощью некомпенсированной составляющей среднеквадратическое отклонение уменьшилось на 69.52 %.

**Заключение.** Результаты экспериментов наглядно демонстрируют возможность значительного улучшения характеристик прибора за счет применения различных математических алгоритмов обработки информации.

**Ключевые слова:** твердотельный волновой гироскоп, обработка сигнала, компенсация уходов

**Для цитирования:** Смирнов К. А., Зарубайло Е. А. Алгоритмы повышения точности твердотельного волнового гироскопа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 4. С. 81–89. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-81-89

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.02.2022; принята к публикации после рецензирования 14.07.2022; опубликована онлайн 28.09.2022



## Algorithms for Increasing the Accuracy of Solid-State Wave Gyroscopes

Kirill A. Smirnov✉, Ekaterina A. Zarubailo

JSC Research Institute of Command Devices, St Petersburg, Russia

✉ kirysmirnof@gmail.com

### Abstract

**Introduction.** Wave solid-state gyroscopes (SWG) are promising sensors of inertial information used in the navigation systems of air- and spacecrafts. Over the past decade, much attention has been paid to the problem of improving the accuracy of SWGs. The accuracy of measurements performed by inertial navigation instruments can be increased by developing effective algorithms, which fact determines the relevance of the present study. Research works conducted at the JSC Research Institute of Command Instruments are aimed at developing a compensation-type angular velocity sensor (AVS) based on an SWG with a cylindrical metal resonator, an electrostatic system for excitation of oscillations and information readout, with a digital feedback.

**Aim.** To develop methods for increasing the accuracy of SWGs based on the connection between the measurement and excitation channels, as well as accounting for the uncompensated component.

**Materials and methods.** To obtain information about the output signal of the sensing element (SE), the fast Fourier transform (FFT) method was used. A PID controller was used to control the effect on the sensitive element.

**Results.** Methods for increasing the accuracy of an SWG-based AVS by means of compensating the output signal errors were proposed, whose correctness was confirmed experimentally. The use of the developed algorithm for reducing the instability of the zero-velocity signal allowed its root-mean-square deviation at startup to be decreased by 76.4 %. The application of the developed method for increasing the accuracy using the uncompensated component led to a decrease in the standard deviation by 69.52 %.

**Conclusion.** The obtained experimental results demonstrate the possibility of improving SWG characteristics significantly by using various mathematical algorithms for processing information.

**Keywords:** solid-state wave gyroscope, signal processing, drift compensation

**For citation:** Smirnov K. A., Zarubailo E. A. Algorithms for Increasing the Accuracy of Solid-State Wave Gyroscopes. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 4, pp. 81–89. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-4-81-89

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 01.02.2022; accepted 14.07.2022; published online 28.09.2022

**Введение.** В основе работы любого твердотельного волнового гироскопа (ТВГ) лежит явление инертности стоячих упругих волн колебаний, впервые реализованное в 1982 г. американским физиком Д. Линчем [1]. Строго теоретически эффект инертности упругих волн для резонатора любой формы обоснован в 1983 г. российскими учеными-механиками В. Ф. Журавлевым и Д. М. Климовым [2].

ТВГ является одним из перспективных датчиков инерциальной информации, применяемых в составе навигационных систем летательных и космических аппаратов [3, 4]. В последнее десятилетие большое внимание уделяется проблеме повышения точности приборов указанного типа [5–8].

ТВГ сочетают в себе такие свойства, как надежность, низкая стоимость, высокая точность, малые габариты, малое время готовности, большой запас технического ресурса, сохранение инерциальной информации при кратковременном отключении электропитания. С момента открытия ТВГ прошло незначительное время, поэтому возможно дальнейшее повышение его точности и других характеристик.

В АО "НИИ командных приборов" в рамках научно-исследовательской работы создается датчик угловой скорости (ДУС) компенсационного типа на базе ТВГ. В процессе экспериментов с макетом выявлены взаимосвязи между параметрами напряжения в разных каналах макета. Под каналом в рассматриваемом случае

понимается соединенная пара электродов, напряжение на которых соответствует колебанию кромки чувствительного элемента (ЧЭ) в точке размещения электрода.

В ходе эксперимента выявлены и решены две проблемы. Первая заключалась в нестабильности нулевого сигнала. При статических испытаниях в измерительном канале наблюдается некоторая гармоническая составляющая напряжения, параметры которой непостоянны, что влияет на точность измерений. Для решения этой проблемы выявлена причина нестабильности и разработан алгоритм, снижающий влияние указанной составляющей сигнала.

Вторая проблема заключалась во влиянии методической погрешности замыкания обратной связи на точность измерений. Поскольку ТВГ является прибором компенсационного типа, точность полученных с его использованием измерений зависит, в том числе, от алгоритма замыкания обратной связи.

Так как синтез идеального регулятора невозможен из-за наличия нелинейности, вызванной свойствами материала резонатора и влиянием окружающей среды, а компенсация происходит с запаздыванием, было принято решение увеличить точность за счет сложения напряжения компенсации и некомпенсированной составляющей.

В настоящей статье описаны разработка и применение указанного алгоритма.

**Описание исследуемой системы.** Работа проводилась с макетом ТВГ, разработанным в АО "НИИ командных приборов", представляющим собой металлический резонатор цилиндрической формы (ЧЭ)  $M1$  с электростатической системой возбуждения колебаний и съема информации (рис. 1). В качестве вычислительного устройства использовался 32-разрядный контроллер.

Система возбуждения и детектирования колебаний в ЧЭ представляет собой 4 пары диаметрально противоположных электродов  $M2$ , смещенных друг относительно друга в поперечном сечении на угол  $45^\circ$ , образующих 4 канала:

1.  $E1-E5$  – возбуждения колебаний резонатора.
2.  $E3-E7$  – измерения колебаний резонатора.
3.  $E2-E6$  – измерения сигнала угловой скорости.
4.  $E4-E8$  – компенсации выходного сигнала.

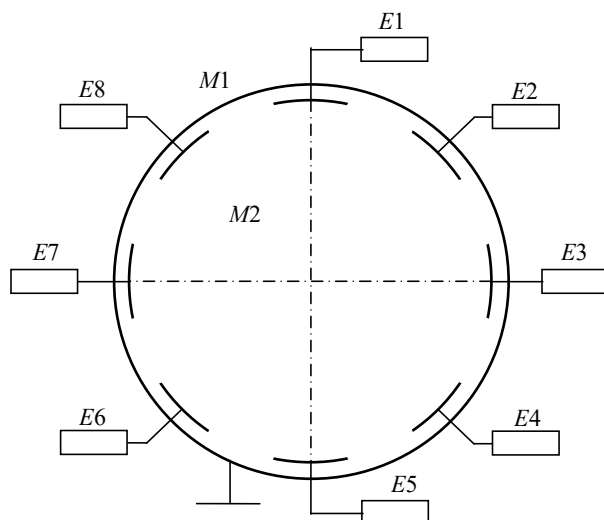


Рис. 1. Схема расположения электродов ТВГ

Fig. 1. A scheme of electrode positioning in a solid-state wave gyroscope

Корпус резонатора подключен к общему проводу.

В рассматриваемом макете применен позиционный метод возбуждения колебаний резонатора. Он заключается в том, что переменное напряжение с частотой, в 2 раза меньшей частоты собственных колебаний, подается на пару электродов канала возбуждения ( $E1-E5$ ), расположенных на оси начальной ориентации стоячей волны. Возбуждение колебаний ЧЭ состоит из этапа начального возбуждения и этапа стабилизации амплитуды колебаний. Цель этапа начального возбуждения заключается в возбуждении в резонаторе колебаний заданной амплитуды на его резонансной частоте. Этот этап длится до достижения амплитуды колебаний, стремящейся к заданной. После этапа возбуждения начинается этап стабилизации амплитуды, который заключается в подаче напряжения, удерживающего заданную амплитуду колебаний в канале измерения колебаний резонатора ( $E3-E7$ ) с высоким уровнем стабильности.

Для работы ТВГ в качестве ЧЭ необходимо реализовать две обратные связи – одну для контура возбуждения (между каналом возбуждения колебаний и каналом их измерения), другую для контура измерения угловой скорости (между каналом измерения сигнала угловой скорости ( $E2-E6$ ) и каналом компенсации выходного сигнала ( $E4-E8$ )).

**Математическое описание упругих колебаний резонатора.** Контроль упругих колебаний

резонатора и измерение параметров волновой картины колебаний осуществляются с помощью системы силовых и измерительных электростатических электродов, расположенных вблизи свободного края резонатора. С помощью управляющих датчиков возбуждается первичная волна. При вращении гироскопа по причине инертных свойств волн возникает вторичная волна, пучности которой совпадают с узлами первичной волны. Результирующая волна является суперпозицией двух описанных волн, повернутых друг относительно друга на угол  $90^\circ$ . Инерциальная информация определяется измерением колебаний резонатора. В режиме вынужденных колебаний вычисляется угловая скорость гироскопа относительно инерциального пространства, т. е. гироскоп работает как датчик угловой скорости. В режиме свободных колебаний вычисляется угол поворота гироскопа в инерциальном пространстве, т. е. гироскоп работает в интегрирующем режиме.

В [9] исследуются погрешности таких гироскопов с различными формами колебательного резонатора. Погрешности изготовления резонатора (переменная плотность, толщина и др.) нарушают симметрию упругих свойств и приводят к биениям резонатора, в которых изгибные колебания совершаются на двух близких частотах [10].

Математическое описание упругих колебаний резонатора имеет вид [11]

$$\begin{aligned}\ddot{C}(t) - 1.6\Omega\dot{S}(t) + 2\zeta v\dot{C}(t) + v^2 C(t) &= \\ &= -0.2f_1(t); \\ \ddot{S}(t) - 1.6\Omega\dot{C}(t) + 2\zeta v\dot{S}(t) + v^2 S(t) &= \\ &= -0.2f_2(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где  $C(t)$ ,  $S(t)$  – функции времени колебаний кромки резонатора, соответствующие напряжению в каналах  $E3-E7$  и  $E2-E6$  соответственно;  $\Omega$  – измеряемая угловая скорость;  $v$  – собственная частота второй моды колебаний резонатора;  $\zeta$  – коэффициент колебательности;  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  – функции времени гармонических сил возбуждения и управления колебаниями соответственно.

Первое уравнение описывает упругие колебания резонатора по осям каналов  $E1-E5$ ,  $E3-E7$  (первичные колебания); второе – по осям каналов  $E2-E6$ ,  $E4-E8$  (вторичные колебания).

Если значением угловой скорости  $\Omega$  можно пренебречь, уравнения (1) интегрируются независимо друг от друга. В противном случае уравнения связаны между собой за счет влияния сил Кориолиса.

Вхождение угловой скорости  $\Omega$  в оба уравнения (1) показывает связь амплитуд первичных и вторичных колебаний при повороте ТВГ.

Компенсационный режим ДУС обеспечивается замыканием обратной связи в контуре измерения угловой скорости. Выходной сигнал ТВГ состоит из нескольких кратных гармоник. Рабочей является вторая гармоника, поскольку радиальное перемещение кромки резонатора на ней наибольшее.

Повысить точность гироскопа можно с помощью алгоритмов компенсации, использующих значения параметров ТВГ [12].

**Математическое описание обработки выходного сигнала.** Для работы с ЧЭ ТВГ необходимо выделить параметры рабочей гармоники – амплитуду и фазу.

Периодический сигнал  $s(t)$  можно представить в виде [13]

$$s(t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)],$$

где  $A_0$ ,  $A_n$ ,  $B_n$  – коэффициенты Фурье;  $\omega$  – круговая частота;  $n$  – номер гармоники;  $t$  – время.

Исходя из этого представления можно рассчитать амплитуду и начальную фазу входящего сигнала, используя фурье-анализ [14, 15].

Из дискретного сигнала указанные параметры можно определить по следующим формулам [16]:

$$dA = \sum_{t=1}^N [X_t \sin(\omega t)]; \quad (2)$$

$$dB = \sum_{t=1}^N [X_t \cos(\omega t)]; \quad (3)$$

$$A = \frac{dA}{(TN_T) + 1}; \quad (4)$$

$$B = \frac{dB}{(TN_T) + 1}; \quad (5)$$

$$\text{Ampl} = \sqrt{A^2 + B^2}; \quad (6)$$

$$\varphi = \arctg(B/A), \quad (7)$$

где  $N$  – количество точек исследуемого массива;  $X_t$  – отсчет дискретного сигнала;  $\omega$  – частота искомого сигнала;  $\text{Ampl}$  – амплитуда искомого сигнала;  $\varphi$  – начальная фаза искомого сигнала;  $T$  – период сигнала;  $N_T$  – количество периодов.

Выходным сигналом в канале скорости является сумма сигнала смещения стоячей волны от вращения основания прибора и сигнала компенсации. При известных параметрах амплитуды и фазы каждого из этих сигналов можно получить параметры выходного сигнала по формулам, применяемым для гармонических сигналов одинаковой частоты:

$$A_{K_{i-1}} \sin(\varphi_{K_{i-1}}) + A_{\text{изм}_i} \sin(\varphi_{\text{изм}_i}) = A_{K_i} \sin(\varphi_{K_i}); \quad (8)$$

$$A_{K_i} = \left[ A_{K_{i-1}}^2 + A_{\text{изм}_i}^2 + 2 A_{K_{i-1}} A_{\text{изм}_i} \cos(\varphi_{K_{i-1}} - \varphi_{\text{изм}_i}) \right]^{0.5}; \quad (9)$$

$$\varphi_{K_i} = \arctg \frac{A_{K_{i-1}} \sin(\varphi_{K_{i-1}}) + A_{\text{изм}_i} \sin(\varphi_{\text{изм}_i})}{A_{K_{i-1}} \cos(\varphi_{K_{i-1}}) + A_{\text{изм}_i} \cos(\varphi_{\text{изм}_i})}, \quad (10)$$

где  $A_{K_{i-1}}$  – амплитуда сигнала компенсации на предыдущем шаге;  $A_{\text{изм}_i}$  – амплитуда смещения стоячей волны от вращения основания прибора;  $A_{K_i}$  – амплитуда выходного сигнала;  $\varphi_{K_{i-1}}$  – начальная фаза сигнала компенсации на предыдущем шаге;  $\varphi_{\text{изм}_i}$  – начальная фаза смещения стоячей волны от вращения основания прибора;

$\varphi_{K_i}$  – начальная фаза выходного сигнала.

Таким образом происходит расчет параметров полезного сигнала в канале скорости и параметров напряжения в канале компенсации. На основании указанных расчетов определяются параметры сигнала, который нужно ввести в канал обратной связи в контуре измерения угловой скорости, в результате чего амплитуда выходного сигнала, измеряемого в канале скорости, должна стремиться к нулю.

Так как ТВГ является прибором компенсационного типа, параметры напряжения, которое подается на электроды  $E4$ ,  $E8$  (канал компенсации) для компенсации колебаний электродов  $E2$ ,  $E6$  (канал скорости), несут информацию об угловой скорости. На рис. 2 представлен результат математического моделирования данного алгоритма, где 1 – компенсируемый сигнал, состоящий из трех гармоник, до его фильтрации по формулам (2)–(7); 2 – компенсируемый сигнал после прохождения фильтра; 3 – сигнал компенсации. Вертикальной штрихпунктирной линией отмечен момент замыкания обратной связи.

Из результатов моделирования видно, что после замыкания обратной связи амплитуда компенсируемого сигнала не равна нулю. Данная некомпенсированная составляющая вызвана запаздыванием компенсации и методической погрешностью алгоритма.

Изменение напряжения в канале компенсации происходит на некотором интервале вре-

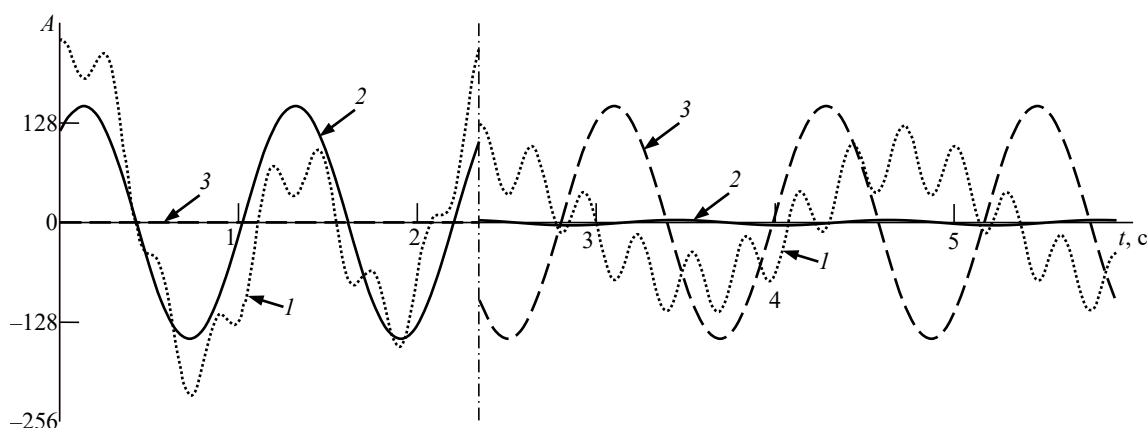


Рис. 2. Результат моделирования осциллограммы выходного сигнала в канале скорости:  
1 – компенсируемый сигнал до фильтрации; 2 – компенсируемый сигнал после фильтрации; 3 – сигнал компенсации.  
Штрихпунктирной линией отмечен момент замыкания обратной связи

Fig. 2. Results of modeling the waveform of an output signal in the velocity channel:  
1 – compensated signal before filtering; 2 – compensated signal after filtering; 3 – compensation signal.  
The moment of feedback closure is marked with a dash-dotted line

мени, поэтому напряжение компенсации можно представить в следующем виде:

$$U_{K_i} = \sum_{i=1}^N \Delta U_{\Omega_i};$$

$$\Delta U_{\Omega_i} = U_{K_{i-1}} - U(\Omega),$$

где  $U_{K_i}$  – напряжение компенсации на  $i$ -м шаге компенсации;  $\Delta U_{\Omega_i}$  – изменение напряжения на  $i$ -м шаге компенсации;  $U(\Omega)$  – напряжение в канале скорости, вызванное угловой скоростью.

Значение сигнала, который несет информацию об угловой скорости, можно представить в следующем виде:

$$S_{изм_i} = U_{K_i} - U_0, \quad (11)$$

где  $U_0$  – гармоническая составляющая сигнала, вызванная погрешностями изготовления.

Амплитуда сигнала, подаваемого для компенсации измерений скорости, несет информацию о значении угловой скорости, а фаза – о ее направлении. Расчет данных параметров происходит по формулам (2)–(7).

На основании зависимостей первичных и вторичных колебаний резонатора (1) разработаны описанные далее методы снижения погрешностей выходного сигнала ДУС на базе ТВГ.

**Снижение неустойчивости нулевого сигнала скорости.** Экспериментально выявлено, что в канале скорости присутствует гармоническая составляющая той же частоты, что и полезный сигнал. Данная составляющая была измерена как сигнал в канале скорости при отсутствии вращения. Также было экспериментально установлено, что изменение напряжения в канале возбуждения вследствие использования ПИД-регулятора в контуре возбуждения (который удерживает параметры первичных колебаний резонатора около постоянных значений) приводит к изменению этой составляющей и, как следствие, к неустойчивости нулевого сигнала скорости.

На основании данного наблюдения и наличия связи между колебаниями в каналах первичных и вторичных колебаний (1) разработан алгоритм уменьшения указанной неустойчивости с учетом изменения амплитуды напряжения возбуждения резонатора [12], блок-схема которого

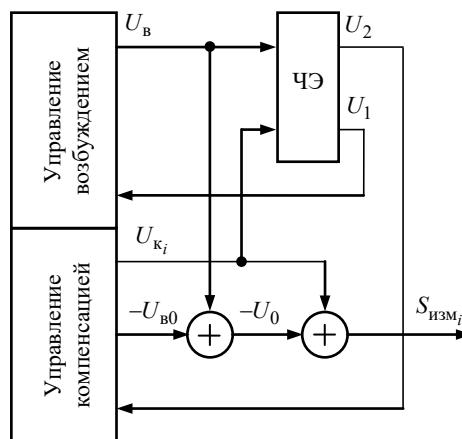


Рис. 3. Блок-схема алгоритма уменьшения неустойчивости нулевого сигнала скорости

Fig. 3. A block diagram of the algorithm for reducing the instability of the zero-velocity signal

го изображена на рис. 3, где  $U_B$  – напряжение возбуждения;  $U_K$  – напряжение компенсации;  $U_{B0}$  – начальное напряжение возбуждения;  $U_1$ ,  $U_2$  – напряжения, вызываемые первичными и вторичными колебаниями резонатора соответственно. Сложение происходит по формулам (8)–(10).

Представленный алгоритм предназначен для повышения точности измерения угловой скорости. Испытания показали, что в результате применения алгоритма неустойчивость выходного сигнала значительно уменьшена. Результат испытания алгоритма на макете приведен на рис. 4.

После обработки выходного сигнала ТВГ

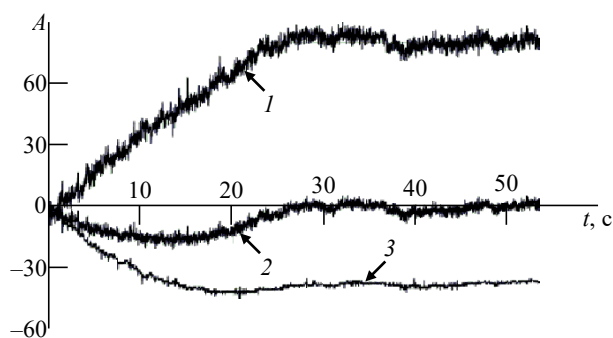


Рис. 4. Тестирование алгоритма снижения неустойчивости нулевого сигнала скорости:

1 – результат измерения амплитуды угловой скорости до применения алгоритма; 2 – то же, в результате применения алгоритма; 3 – амплитуда напряжения возбуждения  $U_B$

Fig. 4. Testing the algorithm for reducing the instability of the zero-velocity signal: 1 – the result of measuring the amplitude of angular velocity deviation without the use of the developed algorithm; 2 – the same, but applying the algorithm; 3 – excitation voltage amplitude  $U_B$

представленным алгоритмом среднее квадратическое отклонение нулевого сигнала скорости в запуске уменьшилось на 76.4 %.

**Метод повышения точности с помощью некомпенсированной составляющей.** Результат математического моделирования показал, что компенсация происходит с погрешностью (см. рис. 2). Для замыкания обратной связи используется ПИД-регулятор.

Напряжение в канале скорости – это разность напряжения компенсации на предыдущем шаге и напряжения, вызываемого наличием угловой скорости, а также погрешностью при замыкании обратной связи.

Для повышения точности измерений в (11) нужно добавить напряжение в канале скорости на текущем шаге (некомпенсированная составляющая). Это действие снизит погрешность измерения угловой скорости, вызванную погрешностью замыкания обратной связи, и позволит получать информацию об угловой скорости без запаздывания. Блок-схема данного алгоритма представлена на рис. 5, а результат коррекции – на рис. 6.

Как видно из рисунка, сигнал 2, получен-

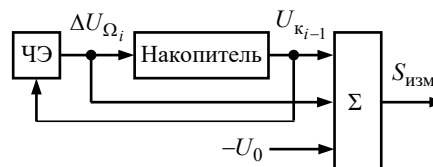


Рис. 5. Блок-схема алгоритма повышения точности с помощью некомпенсированной составляющей

Fig. 5. A block diagram of the developed algorithm for increasing the SWG accuracy using the uncompensated component

ный до корректировки, был скорректирован с помощью некомпенсированной составляющей 4. В результате коррекции был получен сигнал измерений с корректировкой 3. Полученный график значительно лучше совпадает с эталонным графиком 1. На этом основании можно сделать вывод, что алгоритм значительно повышает точность измерений. В результате использования алгоритма среднее квадратическое отклонение уменьшилось на 69.52 %.

**Закключение.** Описанные в настоящей статье алгоритмы повышения точности экспериментально проверены на макете, разработанном в рамках научно-исследовательской работы в АО "НИИ командных приборов". Электронные компоненты указанного макета не рассчитаны на обеспечение высокой точности, поэтому макет служит для ка-

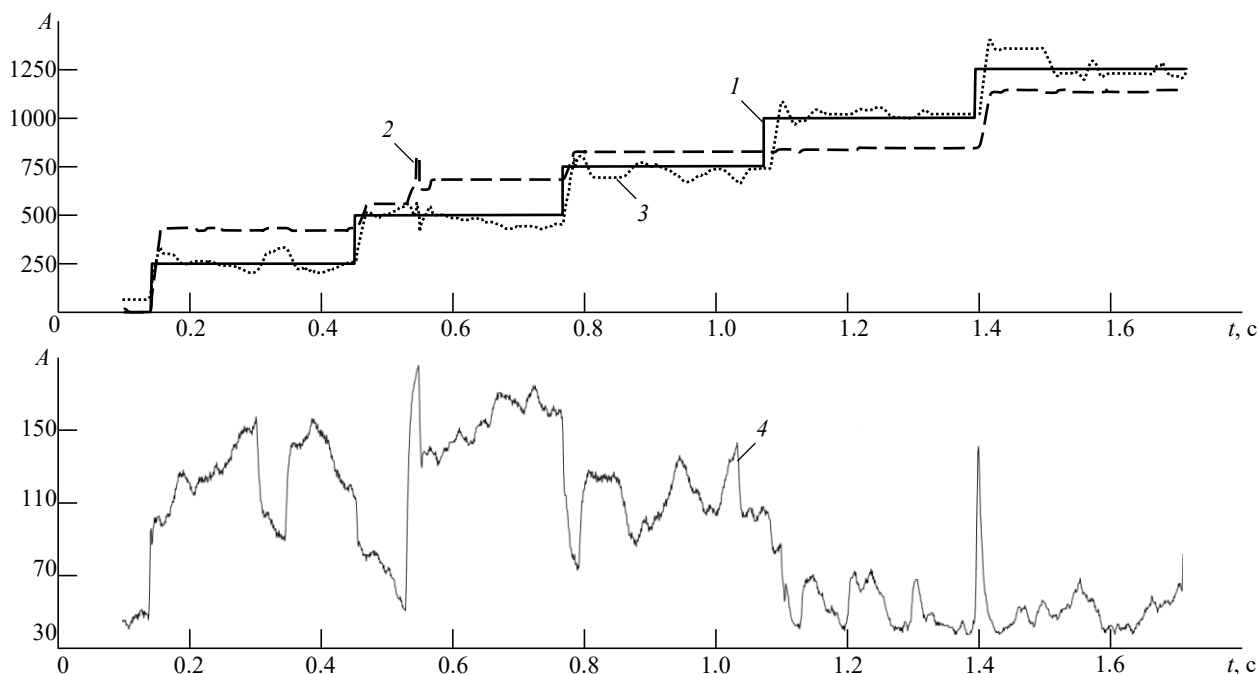


Рис. 6. Коррекция с помощью некомпенсированной составляющей:

1 – эталонные измерения; 2 – измерения без коррекции; 3 – измерения с коррекцией; 4 – сигнал в канале скорости

Fig. 6. Correction using the uncompensated component: 1 – reference measurements; 2 – measurements without correction; 3 – measurements with correction; 4 – signal in the velocity channel

чественной проверки эффективности описанных алгоритмов, а также для разработки новых методов работы с ЧЭ. В результате экспериментов получены данные, подтверждающие эффективность

разработанных решений. Результаты испытаний демонстрируют возможность улучшения характеристик прибора за счет применения различных алгоритмов обработки информации.

### Список литературы

1. Loper E., Lynch D. D. The HRG: a new low-noise Inertial Rotation Sensor // Proc. 16<sup>th</sup> Joint Services Data Exchange for Inertial Systems, Los Angeles, USA, 16–18 Nov. 1982. P. 432–433.
2. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат Space Naute® для европейской ракеты-носителя "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
3. Переляев С. Е. Обзор и анализ направлений создания бесплатформенных инерциальных навигационных систем на волновых твердотельных гироскопах // Новости навигации. 2018. № 2. С. 21–27.
4. Шишаков К. В. Системный анализ погрешностей информационного сигнала ТВГ и методов их компенсации // Интеллектуальные системы в производстве. 2012. № 1(19). С. 181–191.
5. Маслов Д. А., Меркурьев И. В. Линеаризация колебаний резонатора волнового твердотельного гироскопа и сил электростатических датчиков управления // Нелинейная динамика. 2017. Т. 3, № 3. С. 413–421. doi: 10.20537/nd1703008
6. Маслов Д. А., Меркурьев И. В. Компенсация погрешностей волнового твердотельного гироскопа с электростатическими датчиками управления // Инженерный журн.: наука и инновации. 2018. Вып. 9 (81). doi: 10.18698/2308-6033-2018-9-1800
7. Маслов Д. А. Идентификация и компенсация погрешностей волнового твердотельного гироскопа с электростатическими датчиками управления // Машиностроение и инженерное образование. 2018. № 1. С. 36–42.
8. Пешехонов В. Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028
9. Asadian M. H., Wang Y., Shkel A. M. Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes // IEEE/ASME J. of Microelectro-

mechanical Systems. 2019. Vol. 28, № 6. P. 1380–1383. doi: 10.1109/JMEMS.2019.2945713

10. Компенсация уходов волнового твердотельного гироскопа, вызванных анизотропией упругих свойств монокристаллического резонатора / А. А. Маслов, Д. А. Маслов, И. В. Меркурьев, В. В. Подалков // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 25–36. doi: 10.17285/0869-7035.0031

11. Структура и характеристики волнового микромеханического датчика угловой скорости с кольцевым резонатором / Л. А. Северов, В. К. Пономарев, А. И. Панферов, Н. А. Овчинникова // Гироскопия и навигация. 2014. № 3(86). С. 59–72.

12. Методы повышения точности твердотельного волнового гироскопа с помощью алгоритма обработки измерений / Е. А. Зарубайло, А. А. Берденев, М. В. Олышанников, К. А. Смирнов // Навигация и управление движением: материалы XXIII конф. молодых ученых с международным участием, СПб., 17 марта 2021 г. / АО «Концерн ЦНИИ "Электроприбор"», 2021. С. 161–162.

13. Соколова Н. В., Шароватов В. Т. Синтез нелинейных корректирующих устройств. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 111 с.

14. Optimization of the Multigrid-Convergence Rate on Semi-Structured Meshes by local Fourier Analysis / B. Gmeiner, T. Gradl, F. Gaspar, U. Rude // Computers & Mathematics with Applications. 2013. Vol. 65, № 4. P. 694–711. doi: 10.1016/j.camwa.2012.12.006

15. 3D Drape Reconstruction and Parameterization Based on Smartphone Video and Elliptical Fourier Analysis / G. Wu, Z. Yu, A. Hussain, Y. Zhong // Procedia Computer Science. 2017. Vol. 108. P. 1552–1561. doi: 10.1016/j.procs.2017.05.057

16. Положенцев Д. С., Смирнов К. А. Система управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2019. № 8. С. 31–38.

### Информация об авторах

**Смирнов Кирилл Андреевич** – магистр по направлению "Приборостроение" (2019), инженер 2-й категории АО "НИИ командных приборов". Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – программирование; инерциальные навигационные системы; теория автоматического управления. Адрес: АО "НИИ командных приборов", пр. Трамвайный, д. 16, Санкт-Петербург, 198216, Россия. E-mail: kiryasmirnof@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-0207-5703>

**Зарубайло Екатерина Александровна** – магистр по направлению "Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации" (2010), ведущий инженер АО "НИИ командных приборов". Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – гироскопия и навигация. Адрес: АО "НИИ командных приборов", пр. Трамвайный, д. 16, Санкт-Петербург, 198216, Россия. E-mail: zarubaylo\_niikp@bk.ru



## References

1. Loper E., Lynch D. D. The HRG: a new low-noise Inertial Rotation Sensor. Proc. 16<sup>th</sup> Joint Services Data Exchange for Inertial Systems. Los Angeles, USA, 16–18 Nov. 1982, pp. 432–433.
2. Delhay F. Spacenaute® the Hrg Based Inertial Reference System of Ariane 6 European Space Launcher. Gyroscopy and Navigation. 2018, vol. 26, no. 4 (103), pp. 3–13. doi: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013 (In Russ.)
3. Perelyaev S. Y. Review and Analysis of the Lines of Development of Strapdown Inertial Navigation Systems on the Basis of Hemispherical Resonator Gyroscopes. Navigation News. 2018, no. 2, pp. 21–27. (In Russ.)
4. Shishakov K. V. System Analysis of Information Signal Errors of Solid Wave Gyro and Methods of Their Compensation. *Intellekt. Sist. Proizv.* 2012, no. 1(19), pp. 181–191. (In Russ.)
5. Maslov D. A., Merkuriev I. V. The Linearization for Wave Solid-State Gyroscope Resonator Oscillations and Electrostatic Control Sensors Forces. Russian J. of Nonlinear Dynamics. 2017, vol. 3, no. 3, pp. 413–421. doi: 10.20537/nd1703008 (In Russ.)
6. Maslov D. A., Merkuriev I. V. Error Correction in Solid-State Wave Gyroscope with Electrostatic Control Sensors. 2018, vol. 9(81). doi: 10.18698/2308-6033-2018-9-1800 (In Russ.)
7. Maslov D. A. Identification and Errors Compensation Methods for Wave Solid-State Gyroscope with Electrostatic Control Sensors. *Mashinostroyeniye i inzhenernoye obrazovaniye*. 2018, no. 1, pp. 36–42. (In Russ.)
8. Peshekhonov V. G. The Author of Precision Gyroscope. Gyroscopy and Navigation. 2020, vol. 28, no. 2 (109), pp. 3–10. doi: 10.17285/0869-7035.0028 (In Russ.)
9. Asadian M. H., Wang Y., Shkel A. M. Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. IEEE/ASME J. of Microelectromechanical Systems. 2019, vol. 28, no. 6, pp. 1380–1383. doi: 10.1109/JMEMS.2019.2945713
10. Maslov A. A., Maslov D. A., Merkuriev I. V., Podalkov V. V. Compensation of Wave Solid-State Gyro Drifts Caused by Anisotropy of Elastic Properties of a Single-Crystal Resonator. Gyroscopy and Navigation. 2020, vol. 28, no. 2 (109), pp. 25–36. doi: 10.17285/0869-7035.0031 (In Russ.)
11. Severov L. A., Ponomarev V. K., Panferov A. I., Ovchinnikova N. A. The Structure and Characteristics of a Vibratory Micromechanical Rate Sensor with the Ring Resonator. Gyroscopy and Navigation. 2014, no. 3 (86), pp. 59–72. (In Russ.)
12. Zarubaylo E. A., Berdenov A. A., Olshanikov M. V., Smirnov K. A. Methods of Improving the Accuracy of a Solid-State Wave Gyroscope By Means Of a Measurement Processing Algorithm. Proc. of the XXIII Conf. of Young Scientists "Navigation and Traffic Control", SPb, 17 March 2021, pp. 161–162. (In Russ.)
13. Sokolova N. V., Sharovarov V. T. *Sintez nelineynykh korrektiruyushchikh ustroystv* [Synthesis of Non-Linear Corrective Devices]. *Energoatomizdat*. 1985, 111 p. (In Russ.)
14. Gmeiner B., Gradl T., Gaspar F., Rude U. Optimization of the Multigrid-Convergence Rate on Semi-Structured Meshes by local Fourier Analysis. Computers & Mathematics with Applications. 2013, vol. 65, no. 4, pp. 694–711. doi: 10.1016/j.camwa.2012.12.006
15. Wu G., Yu Z., Hussain A., Zhong Y. 3D Drape Reconstruction and Parameterization Based on Smartphone Video and Elliptical Fourier Analysis. Procedia Computer Science. 2017, vol. 108, pp. 1552–1561. doi: 10.1016/j.procs.2017.05.057
16. Polozhentsev D. S., Smirnov K. A. Control System of Control Moment Gyroscope Electric Drive. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University J. 2019, no. 8, pp. 31–38. (In Russ.)

## Information about the authors

**Kirill A. Smirnov**, Master of Science on Instrumentation (2019), 2nd category engineer of the JSC Research Institute of Command Instruments. The author of 2 scientific publications. Area of expertise: programming; inertial navigation systems; automatic control theory.

Address: JSC Research Institute of Command Instruments, 16, Tram Pr., St Petersburg 198216, Russia

E-mail: kiryasmirnof@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0003-0207-5703>

**Ekaterina A. Zarubailo**, Master of Science on Devices and systems of orientation, stabilization and navigation (2010), Lead engineer of the JSC Research Institute of Command Instruments. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: gyroscopy and navigation.

Address: JSC Research Institute of Command Instruments, 16, Tram Pr., St Petersburg 198216, Russia

E-mail: zarubaylo\_niikp@bk.ru