

Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа

Д.М. Малютин

Тульский государственный университет,
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия

Поступила 30.03.2021

Принята к печати 02.06.2021

Разработка волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) является одним из перспективных направлений развития гироскопических датчиков угловой скорости. ВТГ с позиций технологии изготовления, системы настройки и управления, а также точностных характеристик имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами гироскопов. При разработке ВТГ стремятся уменьшить собственный уход гироскопа, смещения нулевого сигнала, нелинейность масштабного коэффициента в рабочем интервале температур. Однако при создании прибора зачастую не уделяется должного внимания существующим возможностям повышения динамической точности гироскопа за счёт разработки перспективных структурных решений построения контуров регулирования и обработки информации. Решение этой проблемы и являлось целью работы.

С использованием методов теории автоматического регулирования выполнены исследования динамики волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором и пьезоэлементами в режиме замкнутого контура компенсации кориолисового ускорения. Пьезоэлементы выполняют функции датчиков перемещений и силы.

Предложены и рассмотрены два перспективных структурных решения построения контуров регулирования и обработки информации ВТГ. Установлены соотношения для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих повышение динамической точности гироскопа. В первом случае предложенная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Такая структура построения ВТГ может быть рекомендована при решении измерительной задачи, в которой необходимо точно измерить величину угловой скорости, а фазовое отставание выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости имеет второстепенное значение. Во втором случае предложенной структуре построения ВТГ соответствует передаточная функция относительной погрешности измерения с астатизмом второго порядка, а абсолютная погрешность измерения в полосе частот 10 Гц не превышает 0,1 %.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, структурные решения, динамическая точность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Адрес для переписки:

Малютин Д.М.
Тульский государственный университет,
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Address for correspondence:

Malyutin D.M.
Tula State University,
Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Для цитирования:

Д.М. Малютин.
Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 146–155.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

For citation:

D.M. Malyutin.
[Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 146–155 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope

D.M. Malyutin

Tula State University,
Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia

Received 30.03.2021

Accepted for publication 02.06.2021

Abstract

The development of wave solid-state gyroscopes (VTG) is one of the promising areas of development of gyroscopic angular velocity sensors. VTG from the standpoint of manufacturing technology, tuning and control systems, as well as accuracy characteristics, has a number of advantages compared to other types of gyroscopes. When developing VTG, they strive to reduce the gyroscope's own care, zero signal bias, and the non-linearity of the scale factor in the operating temperature range. However, when creating the device, due attention is often not paid to the existing opportunities to improve the dynamic accuracy of the gyroscope by developing promising structural solutions for building control circuits and information processing. The solution to this problem was the goal of the work.

Using the methods of the theory of automatic control, the dynamics of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator and piezoelectric elements in the closed-loop mode of Coriolis acceleration compensation are studied. Piezoelectric elements perform the functions of displacement and force sensors.

Two promising structural solutions for constructing VTG control and information processing circuits are proposed and considered. Relations are established for selecting the parameters of the links of these contours, which provide an increase in the dynamic accuracy of the gyroscope. In the first case, the proposed structure for constructing the VTG allows us to significantly reduce the dynamic errors caused by the difference in the scale coefficient of the VTG at different frequencies of the measured angular velocity in the bandwidth. Such a structure for constructing a VTG can be recommended when solving a measurement problem in which it is necessary to accurately measure the angular velocity, and the phase lag of the output signal in relation to the measured angular velocity is of secondary importance. In the second case, the proposed structure of the VTG construction corresponds to the transfer function of the relative measurement error with second-order astatism, and the absolute measurement error in the frequency band of 10 Hz does not exceed 0.1 %.

Keywords: wave solid-state gyroscope, structural solutions, dynamic accuracy.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Адрес для переписки:

Мalyutin Д.М.
Тульский государственный университет,
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Address for correspondence:

Malyutin D.M.
Tula State University,
Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Для цитирования:

Д.М. Мalyutin.
Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 146–155.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

For citation:

D.M. Malyutin.
[Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 145–155 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Введение

Разработка волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) является одним из перспективных направлений развития гироскопических датчиков угловой скорости. В ВТГ, функционирующим в режиме датчика угловой скорости, реализуется удержание стоячей волны относительно корпуса гироскопа, а вторичная волна, возникающая при вращении основания, компенсируется. Сила компенсации содержит информацию об угловой скорости вращения основания. При этом обеспечивается широкая полоса пропускания гироскопа и высокая чувствительность. ВТГ с позиций технологии изготовления, системы настройки и управления, а также точностных характеристик имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами гироскопов: полностью отсутствуют вращающиеся части, малое количество компонентов конструкции, поэтому рабочий ресурс прибора оказывается очень большим (от 15000 часов и более); способность переносить большие перегрузки; компактность; небольшая масса и габариты; сохранение инерциальной информации при кратковременном отключении электропитания; низкая энергоёмкость; малое время готовности; слабая зависимость от температуры окружающей среды при выполнении определенных конструктивных и технологических условий; стойкость к ионизирующему излучению с высокой энергией [1].

За рубежом [2–7] и в России [8–13] ведутся исследования и разработки ВТГ с различными формами резонаторов. ВТГ с объёмным резонатором (полусферическим или цилиндрическим) имеют характеристики точности (дрейф, нестабильность масштабного коэффициента и др.), достаточные для использования их в информационно-измерительных системах и инерциальных навигационных системах различных классов точности [2–4]. У резонаторов из металла уровень внутреннего трения больше, чем у резонаторов из кварцевого стекла. Характеристики резонаторов из металла хуже, чем у резонаторов из кварцевого стекла. Однако у ВТГ с металлическими резонаторами к настоящему времени уже достигнут уровень нестабильности смещения нуля 0,1–15 град/ч и они имеют значительно меньшую себестоимость, чем ВТГ с резонатором из кварцевого стекла, что обуславливает дальнейшую перспективу улучшения их характеристик и применения.

При совершенствовании ВТГ большое внимание уделяется вопросам разработки конструкции чувствительного элемента, технологии его изготовления и балансировки. Перспективные конструкции чувствительных элементов ВТГ с металлическим резонатором [6, 9] имеют чаще всего цилиндрическую форму, на донную поверхность которой наклеены пьезоэлементы, используемые для возбуждения и измерения колебаний. Конструкция, позволяющая уменьшить габаритные размеры ВТГ без уменьшения размеров резонатора, приведена в работе [6]. В работе [9] показано, что для изготовления высокодобротного металлического резонатора ВТГ с заданными свойствами хорошим выбором является прецизионный сплав 21НКМТ-ВИ. Устранение дефектов изготовления резонатора, которые приводят к разночастотности и разнодобротности, достигается балансировкой. Базовым методом является балансировка по 4-й форме распределения дефектов масс, а последним этапом является калибровка, в результате которой производится окончательное определение параметров системы управления.

При разработке ВТГ стремятся, уменьшить собственный дрейф гироскопа [10], смещения нулевого сигнала, нелинейность масштабного коэффициента в рабочем интервале температур [11]. Однако при создании прибора [12] зачастую не используются существующие потенциальные возможности повышения динамической точности гироскопа за счёт разработки перспективных структурных решений построения контуров регулирования и обработки информации.

Целью статьи являлась разработка структурных решений построения контуров регулирования и обработки информации ВТГ, установление соотношений для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих повышение динамической точности гироскопа.

Динамика волновых твердотельных гироскопов

В работе [13] рассмотрена динамика ВТГ в режиме замкнутого контура компенсации кориолисова ускорения. Структурная схема ВТГ представлена на рисунке 1.

Для определения параметров контуров регулирования ВТГ в режиме датчика угловой скорости (ДУС) использовалась передаточная функция разомкнутой системы ВТГ

с пропорционально-интегральным регулятором по огибающей выходного сигнала [13]:

$$W_{raz}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx} k_{pz} T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3} \left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{(T_{wtg} p + 1) p} \quad (1)$$

Для определения полосы пропускания и динамической точности использована передаточная

функция замкнутой схемы ВТГ в режиме ДУС с пропорционально-интегральным регулятором по огибающей выходного сигнала:

$$W_{zam1}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx} \left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^2 + \frac{(T_{wtg} k_{wtg1} k_{wtg3} + 1)}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} p + 1} \quad (2)$$

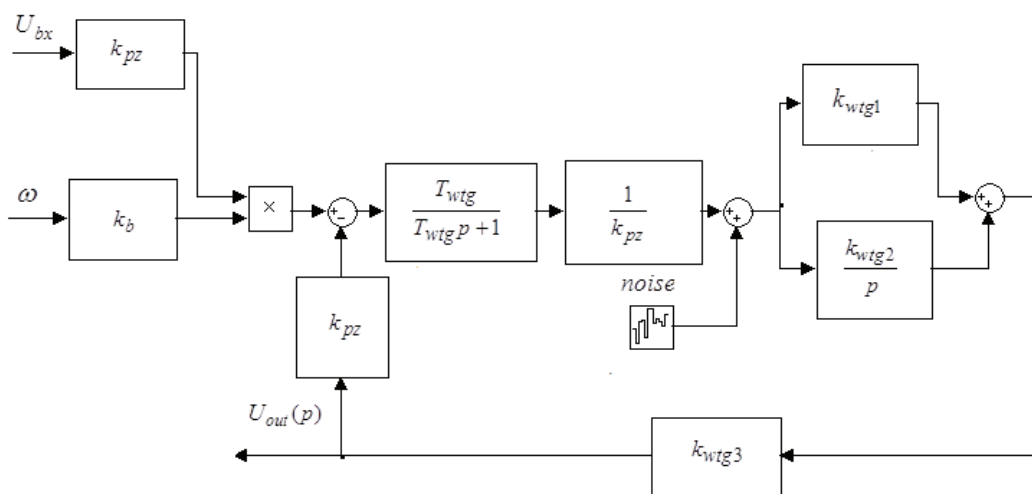


Рисунок 1 – Структурная схема волнового твердотельного гироскопа: k_b – коэффициент Брайана; U_{bx} – входное напряжение; k_{wtg1} , k_{wtg2} , k_{wtg3} – коэффициенты передачи в контурах регулирования волнового твердотельного гироскопа; T_{wtg} – постоянная времени чувствительного элемента волнового твердотельного гироскопа; k_{pz} – коэффициент передачи пьезоэлементов; ω – измеряемая угловая скорость; U_{out} – напряжение на выходе волнового твердотельного гироскопа

Figure 1 – Wave solid-state gyroscope block diagram: k_b – coefficient Brian; U_{bx} – input voltage; k_{wtg1} , k_{wtg2} , k_{wtg3} – transfer coefficients in the loop wave solid-state gyroscope; T_{wtg} – the time constant of the sensing element wave solid-state gyroscope; k_{pz} – the transmission coefficient of the piezoelectric elements; ω – the measured angular velocity; U_{out} – the output voltage wave solid-state gyroscope

Введём обозначение ω_{izm} – измеренная угловая скорость, тогда:

$$W_{zam2}(p) = \frac{\omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{\left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^2 + \frac{(T_{wtg} k_{wtg1} k_{wtg3} + 1)}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} p + 1}; \quad (3)$$

$$W_{zam3}(p) = \frac{\omega(p) - \omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{\left(\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p + \frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} \right) p}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^2 + \frac{(T_{wtg} k_{wtg1} k_{wtg3} + 1)}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} p + 1} \quad (4)$$

На основании передаточных функций (1), (2) построены логарифмические амплитудно-

фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) разомкнутой (рисунок 2) и замкнутой (рисунок 3) систем ВТГ в режиме ДУС с пропорционально-интегральным регулятором при следующих параметрах прибора [13]: $k_b = 0,4$; $U_{bx} = 1$ В; $k_{wtg1} = 1$; $k_{wtg2} = 100$; $k_{wtg3} = 800$; $T_{wtg} = 1,6$ с.

Согласно рисунку 2 система устойчива, запас по фазе в разомкнутой системе составляет $73,4^\circ$.

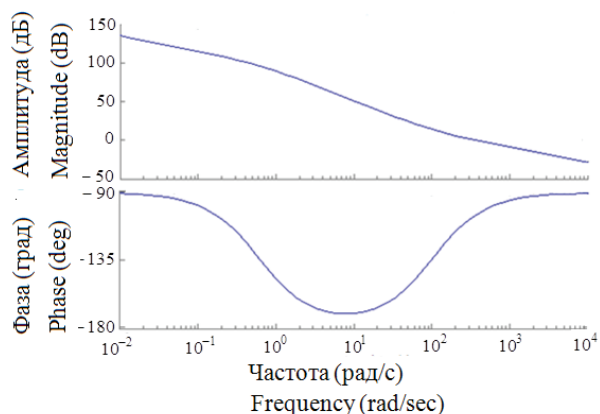


Рисунок 2 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы волнового твердотельного гироскопа с пропорционально-интегральным регулятором

Figure 2 – Logarithmic amplitude phase frequency response of an open-loop wave solid-state gyroscope system with a proportional-integral controller

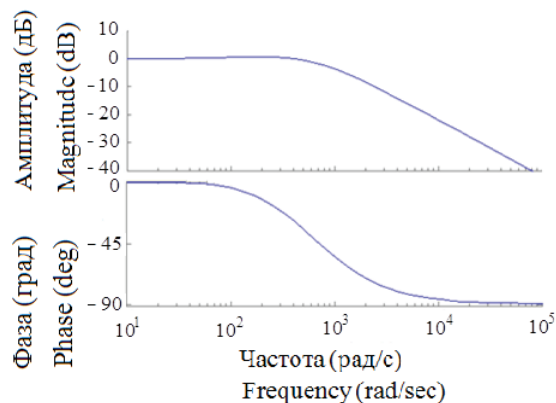


Рисунок 3 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика замкнутой системы волнового твердотельного гироскопа с пропорционально-интегральным регулятором

Figure 3 – Logarithmic amplitude phase frequency response of the closed wave solid-state gyroscope system with a proportional-integral controller

С целью уменьшения динамической погрешности гироскопа выходной сигнал подадим на вход корректирующего звена с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{U_{out1}(p)}{U_{out}(p)} = \frac{1}{T_{kz}p + 1}, \quad \text{где } T_{kz} = \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}}.$$

Структурная схема ВТГ в этом случае представлена на рисунке 4.

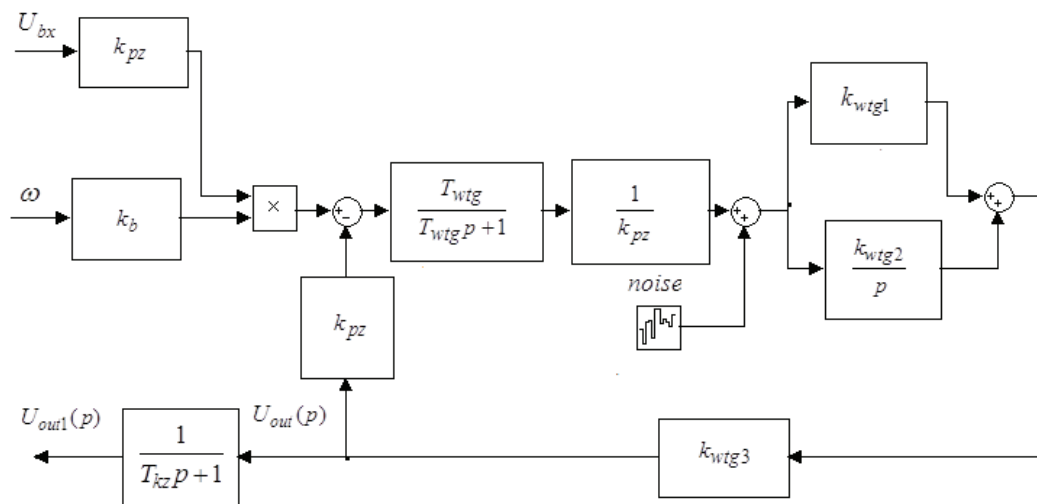


Рисунок 4 – Структурная схема волнового твердотельного гироскопа: U_{out1} – напряжение на выходе волнового твердотельного гироскопа после коррекции; T_{kz} – постоянная времени корректирующего звена, остальные обозначения приведены в подписи к рисунку 1

Figure 4 – Wave solid-state gyroscope block diagram: U_{out1} – output voltage of the wave solid-state gyroscope after correction; T_{kz} – the time constant of the correction link, the remaining designations are given in the caption to Figure 1

Кроме того, потребуем выполнения условия:

$$2\xi \sqrt{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}}} = \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} + \frac{1}{T_{wtg}k_{wtg1}k_{wtg3}}.$$

Отсюда:

$$k_{wtg3} \approx 4\xi^2 k_{wtg2} / k_{wtg1}^2, \quad \text{где } \xi = 0,707. \quad (5)$$

Передаточные функции ВТГ принимают вид:

$$W_{zam4}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx}}{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}} p^2 + 2\xi \sqrt{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}}} p + 1}; \quad (6)$$

$$W_{zam5}(p) = \frac{\omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{1}{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}} p^2 + 2\xi \sqrt{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}}} p + 1}. \quad (7)$$

В этом случае передаточная функция ВТГ (6) эквивалентна передаточной функции фильтра Баттерворта второго порядка и имеет максимально плоскую ЛАЧХ в полосе пропускания гироскопа. Кроме того удаётся уменьшить амплитуду шумовой составляющей выходного сигнала в полосе частот выше частоты $\omega_1 = \frac{k_{wtg2}}{k_{wtg1}}$.

Рассмотренная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Такая структура построения ВТГ может быть рекомендована при решении измерительной задачи, в которой необходимо точно измерить величину угловой скорости, а фазовое отставание выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости имеет второстепенное значение. На рисунке 5 представлены ЛАЧХ, построенные на основании (3) и (7), а на рисунке 6 – графики переходных процессов, построенные на основании (3) и (7) как реакция на ступенчатое воздействие с амплитудой 1 рад/с. В случае (7) параметры системы определены с учётом соотношения (5) и равны: $k_b = 0,4$; $U_{bx} = 1$ В, $k_{wtg1} = 1$, $k_{wtg2} = 500$, $k_{wtg3} = 980$, $T_{wtg} = 1,6$ с.

Эффективность предложенной схемы построения ВТГ можно проиллюстрировать следующим примером. В случае (3) масштабный коэффициент ВТГ при измерении угловой скорости, изменяющейся по гармоническому закону с частотой 200 рад/с, отличается от масштабного коэффициента ВТГ при измерении постоянной угловой скорости на 8,5 %. В случае (7) масштабный коэффициент ВТГ при измерении угловой скорости, изменяющейся по гармоническому закону с частотой 200 рад/с, отличается от масштабного коэффициента ВТГ при измерении постоянной угловой скорости всего лишь на 0,2 %.

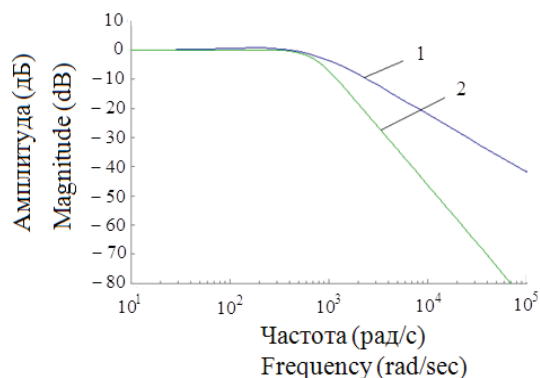


Рисунок 5 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы: 1 – в соответствии с передаточной функцией (3); 2 – в соответствии с передаточной функцией (7)

Figure 5 – Logarithmic amplitude-frequency response of a closed system: 1 – in accordance with the transfer function (3); 2 – in accordance with the transfer function (7)

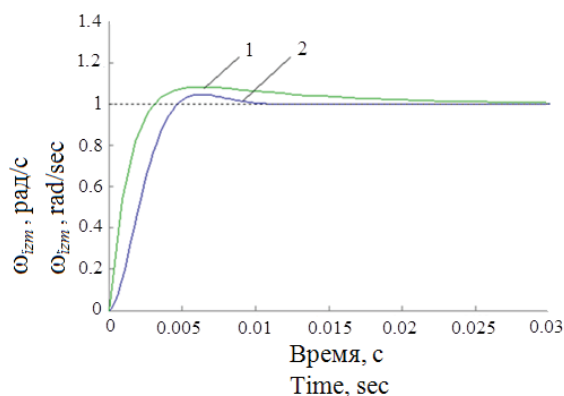


Рисунок 6 – Графики переходных процессов: 1 – в соответствии с передаточной функцией (3); 2 – в соответствии с передаточной функцией (7)

Figure 6 – Transition graphs: 1 – in accordance with the transfer function (3); 2 – in accordance with the transfer function (7)

В том случае, когда нельзя пренебречь фазовым отставанием выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости и в тоже время необходимо минимизировать по-

грешность измерения угловой скорости в полосе пропускания, может быть рекомендована структура построения ВТГ, приведённая на рисунке 7.

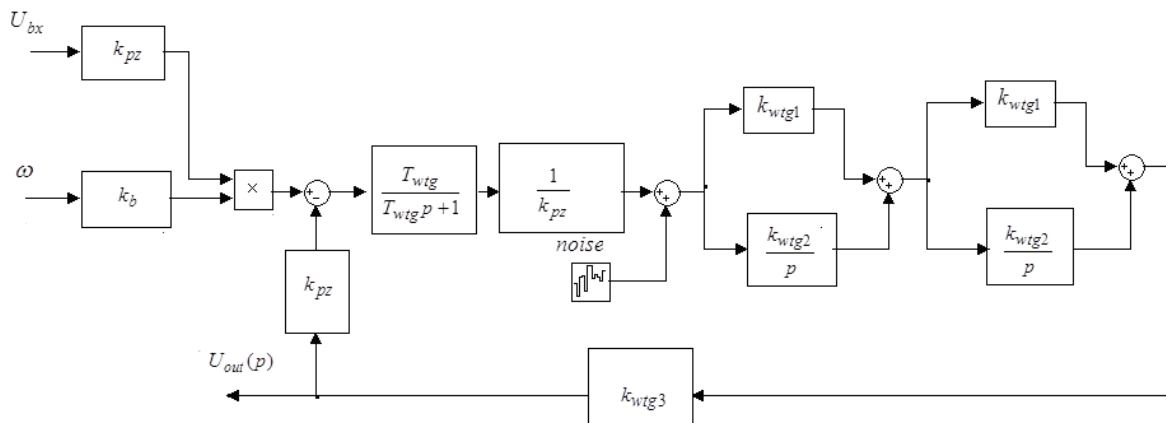


Рисунок 7 – Структурная схема волнового твердотельного гироскопа: в отличие от рисунка 1 применено последовательное включение двух изодромных звеньев с параметрами k_{wtg1} , k_{wtg2} , остальные обозначения приведены в подписи к рисунку 1

Figure 7 – Wave solid-state gyroscope block diagram: in contrast to Figure 1 the sequential inclusion of two isodromic links with the parameters k_{wtg1} , k_{wtg2} is applied, the remaining designations are given in the caption to Figure 1

При этом справедливы передаточные функции (8), (9), (10):

$$W_{zam6}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx} \left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1}; \quad (8)$$

$$W_{zam7}(p) = \frac{\omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{\left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1}; \quad (9)$$

$$W_{zam8}(p) = \frac{\omega(p) - \omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{p^2 \left(\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p + \frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} + \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1}. \quad (10)$$

Передаточная функция относительной погрешности измерения (10) имеет нуль второго порядка в точке $p = 0$, что соответствует астатизму второго порядка. ЛАФЧХ передаточной функции (4) и (10) представлены на рисунке 8.

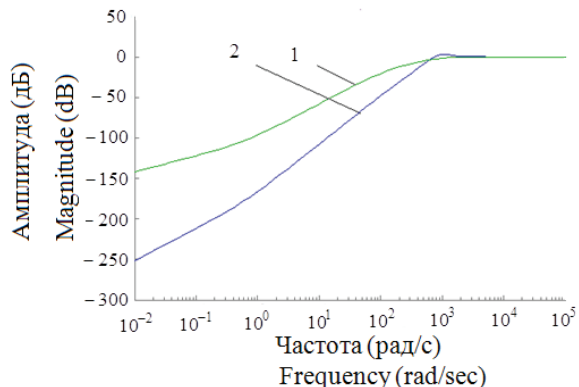


Рисунок 8 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика передаточной функции относительной погрешности измеряемой величины: 1 – в соответствии с передаточной функцией (4); 2 – в соответствии с передаточной функцией (10)

Figure 8 – Logarithmic amplitude-frequency response of the transfer function of the relative error of the measured value: 1 – in accordance with the transfer function (4); 2 – in accordance with the transfer function (10)

Графики измеряемой угловой скорости с амплитудой 1 рад/с и частотой 62,8 рад/с и абсолютной погрешности измерения для структурных схем на рисунке 1 и рисунке 7 представлены соответственно на рисунке 9 и рисунке 10.

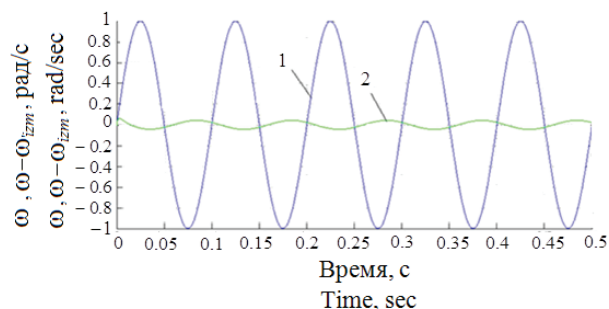


Рисунок 9 – Графики временных зависимостей измеряемой угловой скорости (1) и абсолютной погрешности измерения (2) для структурной схемы на рисунке 1

Figure 9 – Graphs of the time dependences of the measured angular velocity (1) and the absolute measurement error (2) for the block diagram in Figure 1

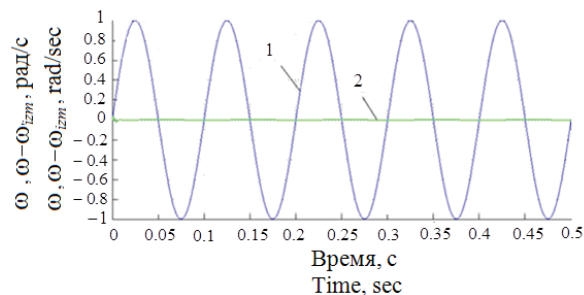


Рисунок 10 – Графики временных зависимостей измеряемой угловой скорости (1) и абсолютной погрешности измерения (2) для структурной схемы на рисунке 7

Figure 10 – Graphs of the time dependences of the measured angular velocity (1) and the absolute measurement error (2) for the block diagram in Figure 7

Если на рисунке 9 абсолютная погрешность измерения угловой скорости составляет 4,3 %, то на рисунке 10 абсолютная погрешность измерения угловой скорости составляет всего лишь 0,1 %.

Заключение

Предложены и рассмотрены два перспективных структурных решения построения контуров регулирования и обработки информации волновых твердотельных гироскопов (ВТГ). Установлены соотношения для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих увеличение динамической точности гироскопа.

В первом случае предложенная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Такая структура построения ВТГ может быть рекомендована при решении измерительной задачи, в которой необходимо точно измерить величину угловой скорости, а фазовое отставание выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости имеет второстепенное значение. Масштабный коэффициент ВТГ при измерении угловой скорости, изменяющейся по гармоническому закону с частотой 200 рад/с отличается от масштабного коэффициента ВТГ при измерении постоянной угловой скорости всего лишь на 0,2 %.

Во втором случае предложенной структуре построения ВТГ соответствует передаточная функция относительной погрешности измерения,

которая имеет нуль второго порядка в точке $p = 0$, что соответствует астатизму второго порядка, а абсолютная погрешность измерения в полосе частот 10 Гц не превышает 0,1 %.

Список использованных источников

1. Волчихин И.А. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) / И.А. Волчихин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9–2. – С. 59–78.

2. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат Spasenaute для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа / Ф. Делэйе // Гироскопия и навигация – 2018. – № 4 (103). – С. 3–13.

DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013

3. Мейер Д. Измерительная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа / Д. Мейер, Д. Розелле // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 3 (78). – С. 45–54.

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

5. Asadian M.H., Wang Y., Shkel A.M., Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, pp. 1380–1383.

6. United States Patent № US009322655B2, 26.04.2016. Axially symmetrical coriolis force gyroscope (varlants) / Valery Valerianovich Chikovani, Kiev (UA); Yurii Alekseevich Yatzenko, Kiev (UA)

7. United States Patent № USOO6474,161B1, 5.11.2002. Gyroscopic sensor and rotation measurement apparatus constituting an application thereof / Alain Jeanroy (FR), Pierre Leger, (FR).

8. Raspopov V.Ya. Tuning and calibration of a coriolis vibratory gyroscope with a metal resonator to operate in angular rate sensor mode / V.Ya. Raspopov [et al.] // *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, pp. 34–40.

DOI: 10.1134/S2075108720010113

9. Распопов В.Я. Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов, А.В. Ладонкин, В.В. Лихошерст // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 4. – С. 777–787.

DOI: 10.17587/mau.ig.777-787

10. Трутнев Г.А. Компенсация дрейфа твердотельного волнового гироскопа / Г.А. Трутнев [и др.] // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2018. – Том 21, № 3. – С. 198–204.

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-198-204

11. Трутнев Г.А. Нелинейность масштабного коэффициента волнового твердотельного гироскопа / А.Г. Трутнев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 138–134.

DOI: 10.22213/2410-9304-2018-4-138-144

12. Распопов В.Я. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов [и др.]. – Тула, 2018. – 189 с.

13. Королев М.Н. Исследование динамических характеристик гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе / М.Н. Королев, Д.М. Малютин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 8. – С. 129–135.

References

1. Volcihin I.A., Volcihin A.I., Malyutin D.M., Matveev V.V., Raspopov V.Ja., Teluhin S.V., Svedov A.P. [Wave solid-state gyroscopes (analytical review)]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical], 2017, no. 9–2, pp. 59–78 (in Russian).

2. Delaye F. [On-board inertial coordinate system Spasenaute for the European launch vehicle "Ariane-6" based on a wave solid-state gyroscope]. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and navigation], 2018, no. 4 (103), pp. 3–13 (in Russian).

DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013

3. Meier D., Rozelle D. [Measuring navigation system based on a miniature wave solid-state gyroscope]. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and navigation], 2012, no. 3 (78), pp. 45–54 (in Russian).

4. Janrua A., Buve A., Remille G. [Wave solid-state gyroscope and its application in marine instrumentation]. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and navigation], 2013, no. 4 (83), pp. 24–34 (in Russian).

5. Asadian M.H., Wang Y., Shkel A.M. Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, pp. 1380–1383.

6. United States Patent № US009322655B2, 26.04.2016. Axially symmetrical coriolis force gyroscope (varlants) / Valery Valerianovich Chikovani, Kiev (UA); Yurii Alekseevich Yatzenko, Kiev (UA).

7. United States Patent № USOO6474,161B1, 5.11.2002. Gyroscopic sensor and rotation measurement apparatus constituting an application thereof / Alain Jeanroy (FR), Pierre Leger, (FR).

8. Raspopov V.Ya., Alaluev R.V., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V., Shepilov S.I. [Tuning and calibration of a coriolis vibratory gyroscope with a metal resonator to operate in angular rate sensor mode]. *Giroskopiya i*

navigaciya [Gyroscopy and navigation], 2020, vol. 11, pp. 34–40 (in Russian).

DOI: 10.1134/S2075108720010113

9. Raspopov V.Ya., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V. [Competitive wave solid-state gyroscope with a metal resonator]. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2018, no. 4, pp. 777–787 (in Russian). **DOI:** 10.17587/mau.ig.777-787

10. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Perevozchikov K.K., Shenyatsky A.V. [Compensation of the drift of a solid-state wave gyroscope]. *Vestnik IZHGTU im. M.T. Kalashnikova* [Vestnik IGTU], 2018, vol. 21, no. 3, pp. 198–204 (in Russian).

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-198-204

11. Trutnev G.A. [Nonlinearity of the scale coefficient of a wave solid-state gyroscope]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2018, vol. 16, no. 4, pp. 138–134 (in Russian).

DOI: 10.22213/2410-9304-2018-4-138-144

12. Raspopov V.Ya., Volchikhin I.A., Volchikhin A.I. Wave solid-state gyroscope with a metal resonator. Tula, 2018, 189 p.

13. Korolev M.N. Malyutin D.M. [Research of dynamic characteristics of a gyroscopic stabilizer in a wave solid-state gyroscope]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical], 2019, no. 8, pp. 129–135 (in Russian).