

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ НА РЕЖИМЫ РАБОТЫ РЕЗОНАТОРА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

**Н. В. Недопекин**

Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия  
inercial@niifi.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Изменение температуры окружающей среды оказывает значительное влияние на выходной сигнал волнового твердотельного гироскопа – датчика угловой скорости (ВТГ-ДУС), поэтому обязательным является контроль и компенсация этого влияния. *Материалы и методы.* Описаны экспериментальные результаты определения зависимости частоты собственных колебаний резонатора ВТГ-ДУС с пьезоэлектрическим управлением от значений температуры окружающей среды. *Результаты и выводы.* Показано, что каждой температуре соответствует только одно значение частоты собственных колебаний. Это позволяет осуществлять компенсацию температурного влияния с помощью отслеживания значений собственной частоты и использования их для формирования поправочных коэффициентов функции преобразования. При этом исключается необходимость использования дополнительного датчика температуры для компенсации систематической погрешности ВТГ-ДУС.

**Ключевые слова:** волновой твердотельный гироскоп, частота колебаний резонатора, температурная компенсация, металлический резонатор, датчик температуры

**Для цитирования:** Недопекин Н. В. Оценка влияния температуры окружающей среды на режимы работы резонатора волнового твердотельного гироскопа // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 1. С. 126–132. doi:10.21685/2307-4205-2023-1-15

## EVALUATION OF THE EFFECT OF AMBIENT TEMPERATURE ON THE OPERATION MODES OF THE CAVITY OF A WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE

**N.V. Nedopekin**

Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia  
inercial@niifi.ru

**Abstract.** *Background.* A change in ambient temperature has a significant impact on the output signal of a wave solid-state gyroscope – an angular velocity sensor (WSSG-AVS), so it is mandatory to control and compensate for this effect. *Materials and methods.* The experimental results of determining the dependence of the frequency of natural oscillations of the WSSG-AVS resonator with piezoelectric control on the values of the ambient temperature are described. *Results and conclusions.* The experimental results show that each temperature corresponds to only one value of the frequency of natural oscillations. This allows compensation for temperature effects by tracking natural frequency values and using them to form conversion function correction factors. This eliminates the need to use an additional temperature sensor to compensate for the systematic error of the WSSG-AVS.

**Keywords:** wave solid-state gyroscope, resonator oscillation frequency, temperature compensation, metal resonator, temperature sensor

**For citation:** Nedopekin N.V. Evaluation of the effect of ambient temperature on the operation modes of the cavity of a wave solid-state gyroscope. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(1):126–132. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2023-1-15

### Введение

Гироскоп с цилиндрическим резонатором представляет собой волновой твердотельный гироскоп, работа которого основана на использовании вместо вращающихся масс условно вращающейся стоячей волны. Работа ВТГ-ДУС основана на взаимодействии эффектов Брайана и Кориолиса, в ре-

зультате которого в кромке осесимметричного резонатора ВТГ формируется стоячая волна, пространственное положение которой относительно заданной системы координат пропорционально измеряемым параметрам.

Чувствительный элемент (ЧЭ) ВТГ-ДУС состоит из трех основных компонентов: металлического резонатора, закрепленных на нем пьезоэлементов, выполняющих функции измерения перемещений и приводов возбуждения колебаний. Корпус обеспечивает вакуумирование внутренней полости с высокой степенью ( $\sim 10^{-6}$  мм рт. ст.) [1].

Изменение температуры резонатора в общем случае вызывается: колебаниями температуры окружающей среды, нагревом электронных узлов, выполняющих функции возбуждения резонатора, измерения и обработки выходного сигнала, и нагревом за счет выделяемого посредством вибрации резонатора тепла. Кроме того, из-за неравномерной теплопроводности в вакуумированном корпусе ЧЭ будет существовать температурный градиент. Поскольку такие факторы, как изменения температуры резонатора и температурный градиент, оказывают существенное влияние на дрейфовые характеристики и статические погрешности измерения ВТГ, выполнение требований к которым является первостепенным при использовании ВТГ-ДУС в коммерческих, военных и космических областях, крайне важно устранить или компенсировать влияние этих факторов.

### **Методы уменьшения влияния температуры на метрологические характеристики**

В настоящее время основными методами подавления влияния температуры на колебательный процесс ЧЭ ВТГ являются [2]:

1. Метод стабилизации температуры окружающей среды: ВТГ в составе платформенной инерциальной навигационной системы (ИНС) устанавливается в камере с регулируемой температурой, что позволяет поддерживать постоянную температуру окружающей среды и обеспечивать наилучшие условия для работы гироскопа, обеспечивая уменьшение дрейфа выходного сигнала, возникающего в результате колебаний температуры.

2. Метод температурной компенсации, основанный на математической модели дрейфа ВТГ: определяется кривая зависимости между выходным сигналом ВТГ и температурой, а в программное обеспечение ИНС вводятся поправочные температурные коэффициенты.

Недостатком первого метода является то, что резонатор гироскопа заключен в вакуум, поэтому теплообмен между окружающей средой и самим резонатором может осуществляться только посредством теплового излучения и теплопроводности через установочную плоскость резонатора на основание, что приводит к медленному изменению температуры самого резонатора и пьезопроводов. В результате системе термостатирования потребуется большой промежуток времени для того, чтобы сравнять температуру ЧЭ ВТГ с температурой окружающей среды, что не удовлетворяет требованиям по быстродействию системы. Кроме того, система контроля температуры значительно увеличит габариты, массу и стоимость ИНС, что существенно ограничивает сферу применения навигационной системы.

По сравнению с первым методом, метод температурной компенсации с использованием программного обеспечения гораздо проще внедрить, поскольку это не приведет к увеличению массы, габаритов и стоимости ИНС. Однако установка датчика температуры на резонатор невозможна, поскольку это приведет к критическому нарушению режима колебаний и сделает ВТГ неработоспособным. При установке датчика температуры внутри корпуса ЧЭ на его корпус стоит учитывать фактор, справедливый и для первого метода, а именно, малая скорость теплопередачи через среду с высоким вакуумом. Таким образом, датчик температуры не сможет отображать фактическую температуру резонатора в режиме реального времени. Одним словом, непосредственно измерить температуру резонатора весьма затруднительно.

Согласно работам [3–5], частота колебаний резонатора ВТГ зависит от его температуры из-за температурного коэффициента модуля Юнга гироскопического сплава. Поскольку резонатор ВТГ непосредственно включен в основной контур возбуждения, построенный на основе генератора с ФАПЧ, выдаваемая им частота обеспечивает прямое измерение температуры резонатора и может быть использована для проведения температурной компенсации. В связи с чем резонатор может служить высокоточным датчиком температуры и может быть использован для температурной компенсации ВТГ.

В работе [6] отмечено, что изменение частоты колебаний резонатора является прекрасной мерой изменения его температуры с зависимостью, близкой к линейной, но не представлен подробный анализ взаимосвязи между температурой и частотой колебаний ВТГ.

В работе [7] интеллектуальный датчик температуры, использующий изменение собственной частоты колебаний кварца, осуществляет измерение температуры с точностью до  $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, можно использовать изменение частоты колебаний резонатора ВТГ для измерения его собственной температуры. Этот метод позволит не только улучшить дрейфовые и другие метрологические характеристики ВТГ во всем диапазоне температур, но также является недорогим и простым в применении, поскольку не требует дополнительного оборудования.

### Результаты экспериментального подтверждения возможности использования частоты колебаний резонатора в качестве датчика температуры

Для определения влияния изменения температуры окружающей среды в качестве испытуемых образцов использовались два ЧЭ ВТГ-ДУС с цилиндрическим резонатором из гироскопического сплава с пьезоэлектрическими измерением и управлением.

ЧЭ устанавливались на изоляционное основание в камеру тепла и холода. При этом их подключение к измерительному оборудованию осуществлялось по схеме, представленной на рис. 1.

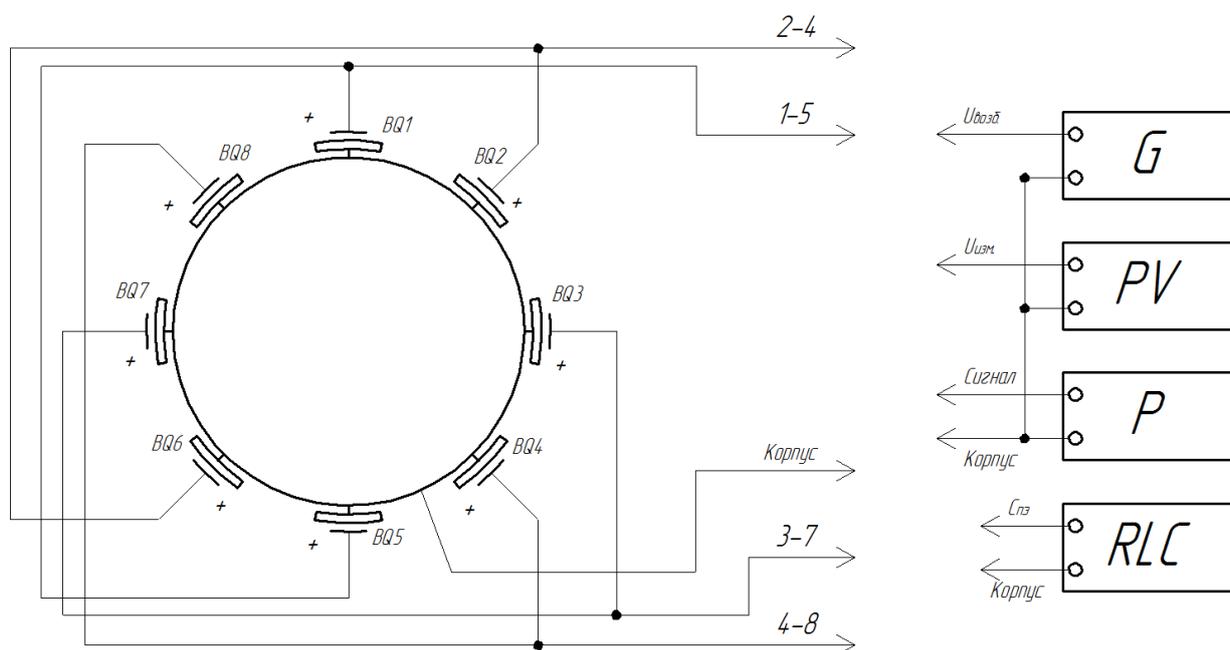


Рис. 1. Схема подключения ЧЭ ВТГ

Для увеличения чувствительности ЧЭ к напряжению возбуждения  $U_{\text{возб}}$ , подаваемого на ЧЭ с генератора  $G$ , пьезоэлементы  $BQ1-BQ8$  объединены попарно по направлениям осей симметрии. Для измерения эффективного значения напряжения, генерируемого пьезоэлементами,  $U_{\text{изм}}$  и определения формы выходного сигнала используются цифровой мультиметр  $P$  и цифровой осциллограф  $PV$  соответственно.

Дополнительно при проведении эксперимента определяются значения электрической емкости пар пьезоэлементов с помощью измерителя иммитанса  $RLC$ . При этом определена паразитная емкость соединительных проводов, не превышающая  $50\text{ пФ}$ .

Для формирования стоячей волны в резонаторе на генераторе  $G$  подбирается такая частота выходного сигнала, при которой измеряемое мультиметром  $P$  напряжение максимально. Из-за явления разночастотности эта частота несколько различна на разных направлениях. Поэтому в дальнейшем представлены усредненные результаты определения частоты колебаний резонатора при различных температурах.

Эксперимент проводился в камере тепла и холода, обеспечивающей точность установки и поддержания температуры окружающей среды не более  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Были выбраны следующие температурные точки: минус  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , минус  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для обеспечения равенства температур резонатора и окружающей среды после достижения камерой требуемой температуры ЧЭ выдерживался не менее  $1\text{ ч}$ .

Ниже, в табл. 1, 2, представлены результаты определения частоты колебаний резонатора при различной температуре окружающей среды.

Таблица 1

Параметры ЧЭ ВТГ № 1

Температура, $T$ , °C	Частота колебаний, $f$ , Гц
-60	6160,95
-30	6156,47
0	6148,37
30	6139,45
60	6129,08
90	6116,37

Таблица 2

Параметры ЧЭ ВТГ № 2

Температура, $T$ , °C	Частота колебаний, $f$ , Гц
-60	6238,56
-30	6231,13
0	6221,70
30	6212,31
60	6201,23
90	6188,30

Для удобства оценки характера влияния температуры на параметры ЧЭ ВТГ представим полученные данные в графическом исполнении (рис. 2, 3).

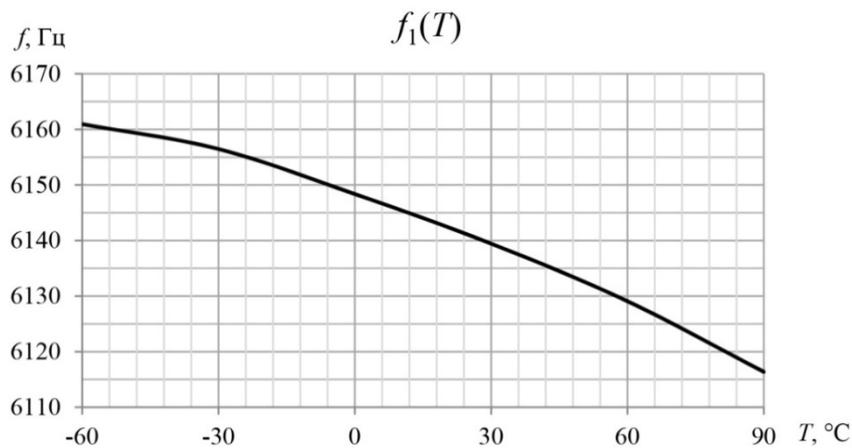


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний резонатора ЧЭ № 1 от температуры

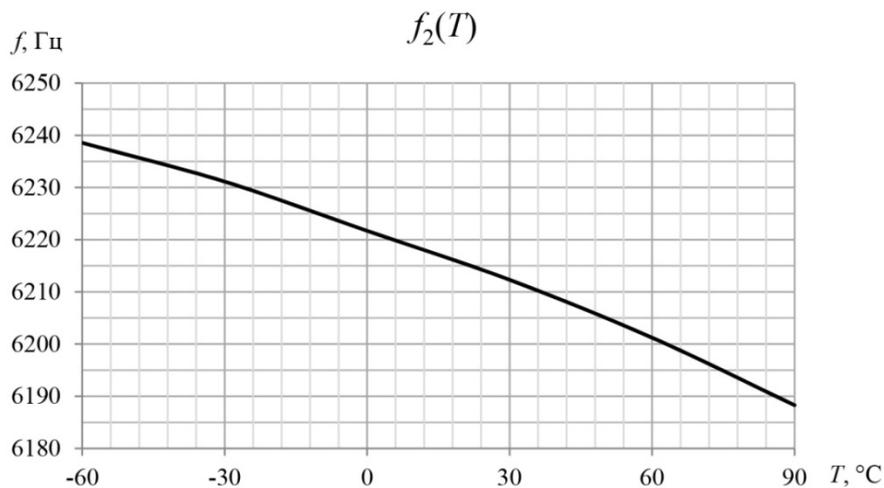


Рис. 3. Зависимость частоты колебаний резонатора ЧЭ № 2 от температуры

Изменение температуры окружающей среды оказывает влияние как на механические параметры резонатора – модуль Юнга, плотность материала, коэффициент Пуассона, так и на его геометрические размеры – толщина стенки, радиус, высота. При этом изменяются и параметры пьезоэлементов – пьезомодуль и электрическая емкость.

С учетом всех этих параметров крайне сложно получить однозначную зависимость между температурой и частотой колебаний резонатора. Поэтому для простоты анализа температурного коэффициента используется метод разложения Тейлора. Функция зависимости частоты  $f(T)$  от температуры при эталонной температуре может быть описана в виде ряда Тейлора:

$$f(T) = f(T_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \frac{\partial^2 f}{2! \partial T^2} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^2 + \dots + \frac{\partial^n f}{n! \partial T^n} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^n + \dots \quad (1)$$

В соответствии с теорией термодинамики материалов собственная частота колебаний металлического резонатора и емкость пьезоэлементов может быть выражена полиномом третьего порядка, поэтому членами более высокого порядка можно пренебречь:

$$f(T) = f(T_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{T=T_0} (T - T_0) + \frac{\partial^2 f}{2! \partial T^2} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^2 + \frac{\partial^3 f}{3! \partial T^3} \Big|_{T=T_0} (T - T_0)^3. \quad (2)$$

Коэффициенты уравнения (2) могут быть получены с помощью аппроксимации по методу наименьших квадратов на основе данных табл. 1, 2:

$$f_1 = 1,55 \cdot 10^{-6} T^3 - 10^{-4} T^2 - 0,269T + 6148,76; \quad (3)$$

$$f_2 = 1,52 \cdot 10^{-6} T^3 - 6 \cdot 10^{-4} T^2 - 0,308T + 6222,07. \quad (4)$$

Как видно, коэффициенты третьего порядка не превышают  $10^{-5}$ , а коэффициенты второго порядка не превышают  $10^{-3}$ , из чего можно сделать вывод о крайне малом их влиянии на частоту колебаний резонатора. При этом ошибка аппроксимации не превышает 0,04 %.

Используя уравнения (3) и (4), можно определить температуру резонатора обратно пропорциональную частоте его колебаний. Ниже, на рис. 4, 5, представлены результаты расчета ошибки определения температуры указанным методом.

Как видно из графиков, максимальное отклонение расчетного значения температуры от температуры, поддерживаемой в камере, не превышает 2 °С, что соответствует точности установки и поддержания температуры окружающей среды в используемой камере [8].

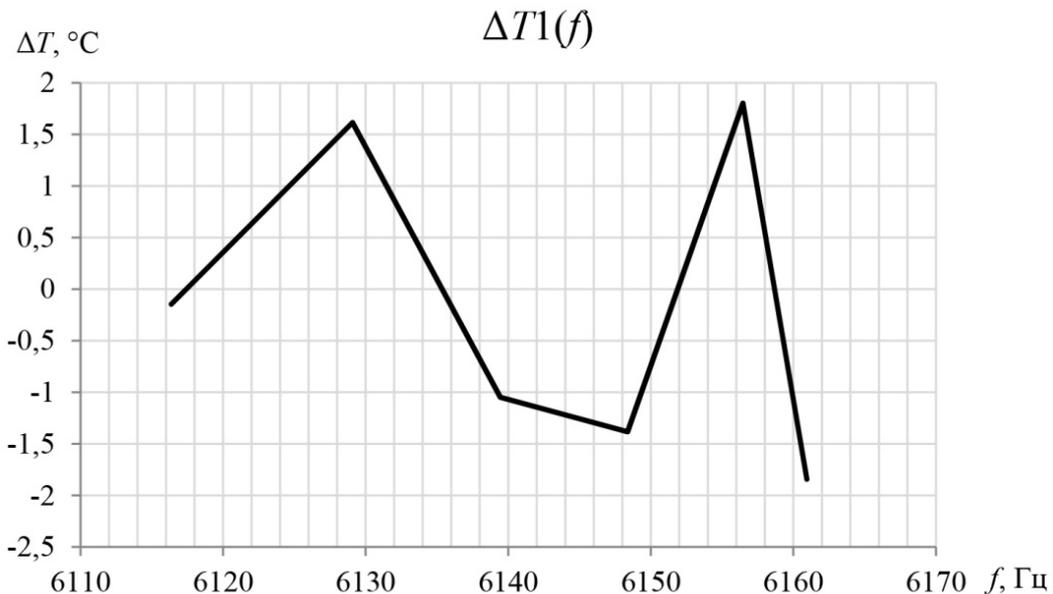


Рис. 4. Ошибка расчета температуры резонатора ЧЭ № 1

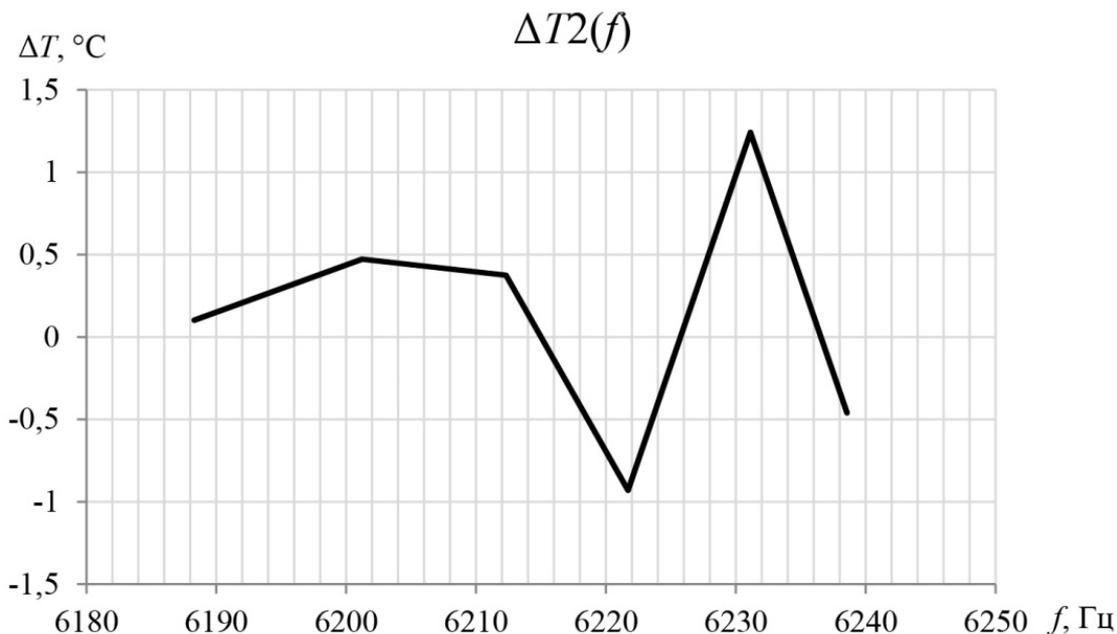


Рис. 5. Ошибка расчета температуры резонатора ЧЭ № 2

Основываясь на результатах эксперимента и их анализе, можно сделать вывод о том, что собственная частота колебаний резонатора ВТГ зависит от температуры, и каждому значению температуры соответствует только одна частота колебаний. Следовательно, собственную частоту ВТГ, находящуюся в процессе эксплуатации под постоянным мониторингом и контролем, можно рассматривать как высокоточный показатель температуры резонатора. В результате частота, контролируемая цифровой системой управления режимами работы ВТГ, может быть использована для температурной компенсации в режиме реального времени.

При этом с целью увеличения быстродействия контура ФАПЧ и, как следствие, уменьшения времени вхождения ВТГ в режим при эксплуатации в условиях предельных значений температуры окружающей среды возможно использование полученных температурно-частотных коэффициентов совместно с интегрированным в ВТГ датчиком температуры для определения начальной зоны захвата частоты в момент включения ВТГ. Таким образом, можно сократить полосу захвата частоты генератором ФАПЧ, что оптимизирует его работу и позволит улучшить конечную линейность градуировочной характеристики ВТГ-ДУС [9].

### Заключение

Колебания температуры окружающей среды оказывают значительное воздействие на функционирование ВТГ-ДУС с металлическим резонатором. Изменяются такие параметры, как модуль Юнга, геометрические размеры резонатора, пьезомодуль приводов и т.д., что приводит к дрейфу нулевого сигнала, снижающему конечную точность ВТГ. В связи с этим крайне необходимо определить степень и характер влияния температуры на выходной сигнал ВТГ и скомпенсировать его. Представлены результаты экспериментального подтверждения возможности использования частоты колебаний резонатора в качестве датчика температуры. С помощью аппроксимации полученных данных рассчитаны температурно-частотные коэффициенты, позволяющие однозначно определить температуру резонатора по его собственной частоте в режиме реального времени. Использование полученных зависимостей обеспечит проведение температурной компенсации выходного сигнала ВТГ в режиме реального времени, а также уменьшит время вхождения ВТГ в режим.

### Список литературы

1. Яценко Ю. А., Петренко С. Ф., Чиковани В. В. Принцип построения датчика угловой скорости на основе твердотельного волнового гироскопа с использованием цилиндрического резонатора и возбуждения положения // III Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : сб. тр. СПб. : Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 1996. Ч. I. С. 172–176.

2. Яценко А. Ю., Чиковани В. В., Янчук А. Н. Исследование модели теплового дрейфа металлического цилиндрического кориолисова вибрационного гироскопа // X Санкт-Петербургская конференция по интегрированным навигационным системам : сб. тр. СПб. : Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2003. С. 92–94.
3. Patent 5712427 US. Vibratory Rotation Sensor with Scanning-Tunneling-Transducer Readout / Matthews A. 1998.
4. Patent 4951508 US. Vibratory Rotation Sensor / Loper E. J., Lynch D. D. 1990.
5. Lynch D. D. Projected system performance based on recent HRG test results // IEEE/AIAA 5<sup>th</sup> Digital Avionics Systems Conference (Seattle, WA, October 31 – November 3, 1983). 1983. P. 18.1.1–18.1.6.
6. Loper E. J., Lynch D. D. Hemispherical Resonator Gyro: Status Report and Test Results. San Diego, CA, 1984. P. 105–107.
7. Jun Xu, Bo You, Xin Li et al. Fully digital smart temperature sensor with quartz tuning fork resonator // 9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology. 2008.
8. Бастрыгин К. И. К вопросу исследования и проектирования высокотемпературного датчика динамического давления // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 2. С. 85–91.
9. Батищева О. М., Папшев В. А., Родимов Г. А. Теоретическое исследование температуры в зоне изнашивания при ультразвуковой сборке // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 1. С. 30–41.

### References

1. Yatsenko Yu.A., Petrenko S.F., Chikovani V.V. The principle of constructing an angular velocity sensor based on a solid-state wave gyroscope using a cylindrical resonator and position excitation. *III Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: sb. tr. = III St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems : proceedings*. Saint Petersburg: Izd-vo TsNII «Elektropribor», 1996;(part I.):172–176. (In Russ.)
2. Yatsenko A.Yu., Chikovani V.V., Yanchuk A.N. Investigation of the thermal drift model of a metallic cylindrical coriolis vibrating gyroscope. *X Sankt-Peterburgskaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam: sb. tr. = X St. Petersburg Conference on Integrated Navigation Systems : proceedings*. Saint Petersburg: Izd-vo TsNII «Elektropribor», 2003:92–94. (In Russ.)
3. Patent 5712427 US. *Vibratory Rotation Sensor with Scanning-Tunneling-Transducer Readout*. Matthews A. 1998.
4. Patent 4951508 US. *Vibratory Rotation Sensor*. Loper E.J., Lynch D.D. 1990.
5. Lynch D.D. Projected system performance based on recent HRG test results. *IEEE/AIAA 5th Digital Avionics Systems Conference (Seattle, WA, October 31 – November 3, 1983)*. 1983:18.1.1–18.1.6.
6. Loper E.J., Lynch D.D. *Hemispherical Resonator Gyro: Status Report and Test Results*. San Diego, CA, 1984:105–107.
7. Jun Xu, Bo You, Xin Li et al. Fully digital smart temperature sensor with quartz tuning fork resonator. *9th International Conference on Solid-State and Integrated-Circuit Technology*. 2008.
8. Bastrygin K.I. On the issue of research and design of a high-temperature dynamic pressure sensor. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(2):85–91. (In Russ.)
9. Batishcheva O.M., Papshev V.A., Rodimov G.A. Theoretical study of temperature in the wear zone during ultrasonic assembly. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(1):30–41. (In Russ.)

### Информация об авторах / Information about the authors

**Никита Вячеславович Недопекин**  
 начальник отделения № 14 центра 1,  
 Научно-исследовательский  
 институт физических измерений  
 (Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
 E-mail: inercial@niifi.ru

**Nikita V. Nedopekin**  
 Head of department no. 14 of center 1,  
 Research Institute of Physical Measurements  
 (8/10, Volodarskogo street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
 The authors declare no conflicts of interests.**

**Поступила в редакцию/Received 17.12.2022**  
**Поступила после рецензирования/Revised 22.01.2023**  
**Принята к публикации/Accepted 18.02.2023**