

УДК 531.383-11

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.491.493

# ЦИФРОВАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСКОПА С КОЛЬЦЕВЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

## DEVELOPING DIGITAL CONTROL SYSTEM FOR MICROELECTROMECHANICAL GYROSCOPE WITH RING RESONATOR

ИВАНОВ СЕРГЕЙ ЮРЬЕВИЧ

ivanov.s.yu@yandex.ru

IVANOV SERGEY YU.

ivanov.s.yu@yandex.ru

ТУРКОВ ВЛАДИМИР ЕВГЕНЬЕВИЧ

TURKOV VLADIMIR E.

УЛЬЯНОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

ULYANOV SERGEY A.

ГНЦ РФ «ФГУП «ЦНИИХМ»

115487, г. Москва, ул. Нагатинская, 16а

FSUE "CNIИHM"

16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487

Рассмотрены принципы разработки системы управления для микроэлектромеханического (МЭМ) гироскопа с кольцевым резонатором с максимально широким применением цифровых технологий. Приведены описание предложенной системы управления и результаты численного моделирования ее работы. Показана возможность использования значения частоты первичных колебаний для высокоточного измерения температуры. Представлены результаты испытаний на автоматизированном испытательном стенде макетного образца гироскопа, полностью подтверждающие работоспособность разработанной цифровой системы управления.

**Ключевые слова:** микроэлектромеханический гироскоп; кольцевой резонатор; система управления; цифровая обработка сигналов; ПЛИС.

The paper highlights principles of control system development for a microelectromechanical gyroscope with ring resonator with unlimited usage of digital technologies. The description of the proposed control system and results of its numerical modeling have been provided. It has been shown that the frequency of drive mode motion can be used for precise temperature measurements. Results of gyroscope testing with automated test bench, which fully confirm the functionality of the developed control system, have been given.

**Keywords:** microelectromechanical gyroscope; ring resonator; control system; digital signal processing; FPGA.

По мере улучшения точностных параметров микроэлектромеханических (МЭМ) гироскопов, предназначенных для измерения угловой скорости, происходит значительное расширение области их применения. Одним из путей совершенствования их характеристик является разработка усовершенствованных электронных подсистем, в частности с использованием цифровых технологий.

Структурная схема разработанной цифровой системы управления МЭМ-гироскопа с кольцевым резонатором представлена на рис. 1. Отличительной особенностью данной системы является полностью цифровая петля фазовой автоподстройки частоты контура первичных колебаний.

Система управления с высокой точностью поддерживает амплитуду и частоту первичных колебаний кольцевого резонатора при изменении внешних условий (прежде всего температуры). Зависимость параметров чувствительного элемента от температуры может быть использована для температурной самокомпенсации выходного сигнала гироскопа. Данный подход позволяет добиться лучшей компенсации (например, с меньшим гистерезисом) по сравнению со случаем использования внешнего термодатчика. Кроме

того, определение точности измерения температуры по параметрам первичных колебаний позволяет оценить точность и стабильность самой цифровой системы управления.

Значение температуры может быть получено из температурной зависимости частоты первичных колебаний. Расчетное значение изменения частоты первичных колебаний от температуры

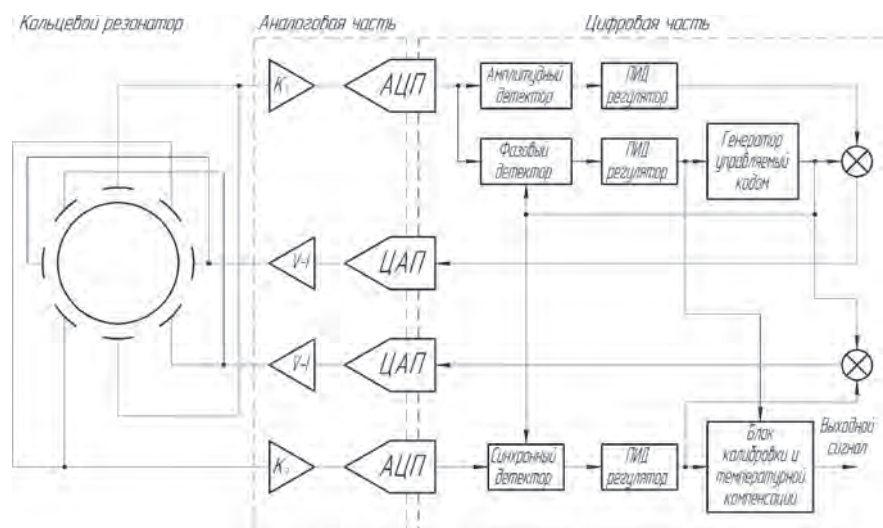


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы управления гироскопа

Fig. 1. Block diagram of digital control system for MEMS gyroscope

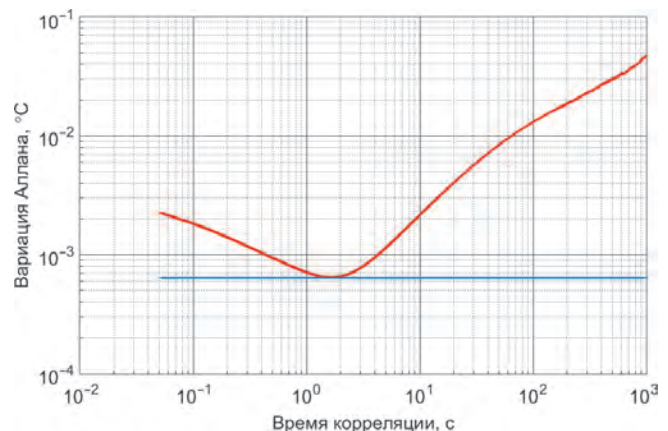
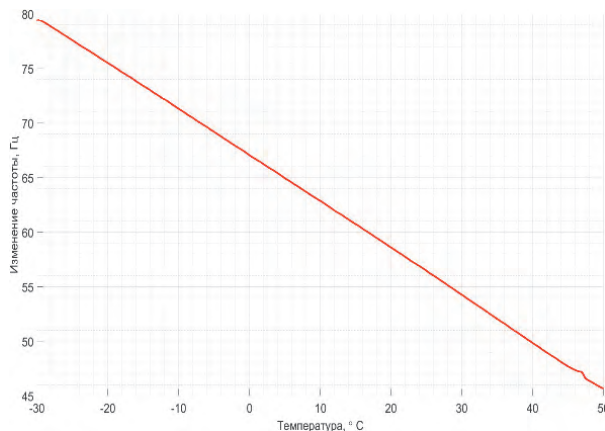


Рис. 2. Зависимость частоты первичных колебаний от времени и график вариации Аллана для измерения температуры по этой зависимости  
Fig. 2. Temperature dependence of primary oscillation frequency and Allan variance of temperature derived from this dependence

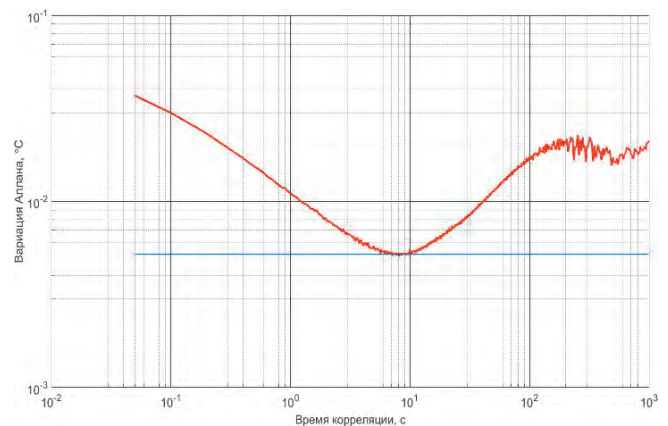
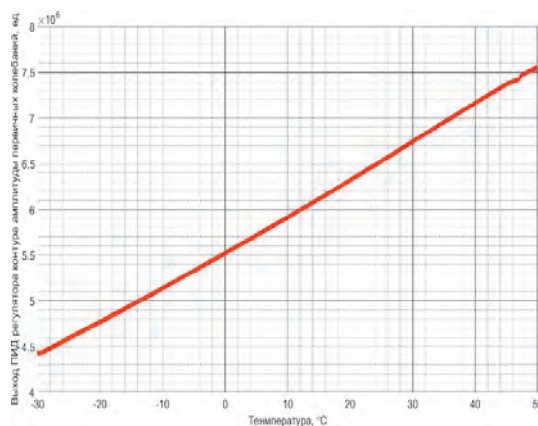


Рис. 3. Зависимость амплитуды возбуждающего сигнала контура первичных колебаний от времени и график вариации Аллана для измерения температуры по этой зависимости  
Fig. 3. Temperature dependence of primary oscillation exciting signal amplitude and Allan variance of temperature derived from this dependence

составляет для используемого чувствительного элемента  $0,44 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$ . Экспериментальные зависимости для этого способа определения температуры приведены на рис. 2. Угловой коэффициент зависимости частоты от температуры —  $0,426 \text{ Гц}/^\circ\text{C}$ .

Минимум вариации Аллана для значения температуры, вычисленного на основании изменения частоты первичных колебаний, —  $6,4 \cdot 10^{-4} ^\circ\text{C}$  при времени корреляции  $\approx 15$  секунд. Разрешающая способность при времени усреднения 1 секунда —  $0,002 ^\circ\text{C}$ .

As the accuracy of MEMS gyroscopes intended for measuring the angular velocity improves, the area of their application significantly expands. One way to improve their characteristics is to develop advanced electronic subsystems, in particular using digital technologies. The block diagram of the developed digital control system of the MEMS gyroscope with a ring resonator is presented in Fig. 1. A key feature of this system is a completely digital phase locked loop of the primary oscillation circuit.

The control system with high accuracy maintains the amplitude and frequency of primary oscillations of the ring resonator when the external conditions (for example, temperature) change. The dependence of parameters of the sensing element on the temperature

can be used for the temperature self-compensation for the output signal of the gyroscope. This approach allows better compensation (for example, with a smaller hysteresis) as compared with using an external temperature sensor. In addition, the determination of the accuracy of temperature measurement with respect to the parameters of the primary oscillations makes it possible to evaluate the accuracy and stability of the digital control system itself.

The temperature value can be obtained from the temperature dependence of the primary oscillations frequency. For the ring resonator used in the research the theoretical value of the change in the primary oscillations frequency with temperature is  $0.44 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ . The experimental dependences for this method

of determining the temperature are shown in Fig. 2. The frequency dependence coefficient is  $0.426 \text{ Hz}/^\circ\text{C}$ . The minimum of Allan variance for the temperature value calculated from frequency change is  $6.4 \cdot 10^{-4} ^\circ\text{C}$  with a correlation time of about 15 seconds. The resolution with 1 second averaging time is  $0.002 ^\circ\text{C}$ . The further growth of the variation is due to a change in the temperature in the room.

Another way to obtain temperature value is to measure the change in the quality factor of the ring resonator. In the steady state (with constant amplitude of oscillations), the excitation signal of the primary oscillation circuit is inversely proportional to the quality factor. Figure 3 shows experimental dependencies for this method of temperature determination. It can be seen from the first graph that when

Дальнейший рост вариации обусловлен изменением температуры в помещении.

Другим способом измерения температуры может быть изменение добротности чувствительного элемента. В установившемся режиме (при постоянной амплитуде колебаний) возбуждающий сигнал контура первичных колебаний обратно пропорционален добротности. На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости для данного способа определения температуры. Из первого графика видно, что при изменении температуры от  $-30$  до  $+50$  °C для поддержания постоянной амплитуды первичных колебаний потребовалось увеличение возбуждающего сигнала на 40%. Минимум вариации Аллана для значения температуры в случае ее вычисления по амплитуде возбуждающего сигнала первичных колебаний составляет  $5,2 \cdot 10^{-3}$  °C при времени усреднения  $\approx 9$  секунд. Разрешающая способность при времени усреднения 1 секунда —  $0,03$  °C.

На рис. 4 приведено сравнение значения температуры с внешнего температурного датчика со значением, полученным по изменению частоты первичных колебаний. Длительность эксперимента — около 12 часов, данные регистрировались с частотой 1 Гц. В качестве внешнего температурного датчика использован цифровой 12-битный датчик TMP112 с разрешением  $0,0625$  °C.

Полученная оценка точности измерения температуры близка к результатам, получаемым для специализированных МЭМ-термометров. Например, в работе [1] при использовании гироскопа другого типа минимум вариации Аллана для температуры составил  $4 \cdot 10^{-4}$  °C при времени корреляции 40 секунд. В работе [2] при использовании специально разработанного МЭМ-элемента на том же принципе изменения собственной частоты при изменении температуры получена разрешающая способность  $1,6 \cdot 10^{-4}$  °C (СКЗ при времени усреднения 1 секунда).

Полученные результаты подтверждают высокую точность поддержания частоты и амплитуды первичных колебаний гироскопа,

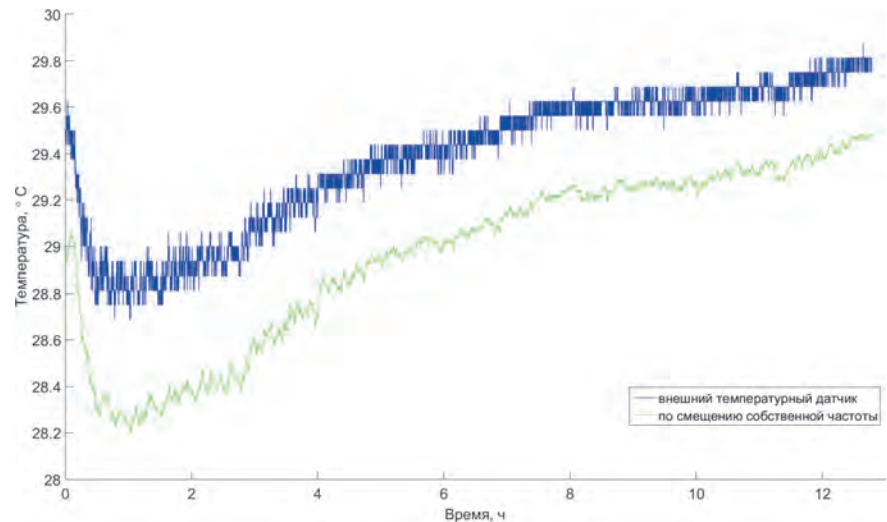


Рис. 4. Сравнение значения температуры с внешнего температурного датчика со значением, полученным по изменению частоты первичных колебаний

Fig. 4. Comparison of the temperature value from external temperature sensor and the value obtained from the change in the primary oscillations frequency

обеспечиваемую цифровой системой управления. Следует также отметить, что построение системы самотермокомпенсации не требует дополнительного усложнения управляющей схемы, т. к. необходимые для этого сигналы в цифровом виде в ней уже присутствуют. Разработанный макет цифровой системы управления также может быть использован при проектировании специализированной управляющей микросхемы, для экспериментальной проверки различных вариантов ее реализации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Prikhodko I. P., Trusov A. A., Shkel A. M. *Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing* // Sensors and Actuators A: Physical, 2013. V. 201. P. 517–524.
2. Ng E. J., Lee H. K., Ahn C. H., R. Melamud, Kenny T. W. *Stability measurements of silicon MEMS resonant thermometers*. Proceedings of the IEEE Sensors Conference, Limerick, Ireland, October 28–31, 2011. P. 1257–1260.

the temperature changes from  $-30$  to  $+50$  °C in order to maintain a constant amplitude of the primary oscillations, an increase in the exciting signal by 40% is required. The minimum of Allan variance for the temperature value in the case of its calculation by the amplitude of the exciting signal of the primary oscillations is  $5.2 \cdot 10^{-3}$  °C with averaging time of about 9 seconds. The resolution with 1 second averaging time is  $0.03$  °C.

Figure 4 compares the temperature value from the external temperature sensor with the value obtained from the change in the primary oscillations frequency. The duration of the experiment was about 12 hours, the data were recorded at a frequency of 1 Hz. The external temperature sensor is a digital 12-bit TMP112 sensor with a resolution of  $0.0625$  °C.

The accuracy of the temperature measurement is close to the results obtained for specialized MEMS thermometers. For example, in [1], when using another type of MEMS gyroscope, the minimum of Allan variance for temperature was  $4 \cdot 10^{-4}$  °C with a 40 seconds correlation time. In [2], using a specially developed MEMS element on the same principle of changing the natural frequency with a temperature change, a resolution of  $1.6 \cdot 10^{-4}$  °C (RMS at 1 second averaging time) was obtained.

The obtained results confirm the high accuracy of maintaining the frequency and amplitude of the primary oscillations provided by the digital control system. It should also be noted that the construction of such a compensation system does not require any

additional complication of the control circuit, because all necessary signals are already present in a digital form. The developed model of a digital control system can also be used in the design of an ASIC.

#### REFERENCES

1. Prikhodko I. P., Trusov A. A., Shkel A. M. *Compensation of drifts in high-Q MEMS gyroscopes using temperature self-sensing* // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. V. 201. P. 517–524.
2. Ng E. J., Lee H. K., Ahn C. H., Melamud R., Kenny T. W. *Stability Measurements of Silicon MEMS Resonant Thermometers*. Proceedings of the IEEE Sensors Conference, Limerick, Ireland, October 28–31, 2011, P. 1257–1260.