

УДК 531.383-11

*С. Ю. Иванов*

Московский физико-технический институт (государственный университет)  
Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева

## Разработка цифровой электронной подсистемы микромеханического гироскопа с кольцевым резонатором

Рассмотрены принципы разработки системы управления для микроэлектромеханического (МЭМ) гироскопа с кольцевым резонатором с максимально широким применением цифровых технологий. Приведено описание предложенной системы управления и результаты численного моделирования её 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 сигнала, ПЛИС.

*S. Yu. Ivanov*

Moscow Institute of the Physics and Technology (State University)  
Central Research and Development Institute of Chemistry and Mechanics

## Development of the digital control system for a microelectromechanical gyroscope with ring resonator

Principles of control system development for a microelectromechanical gyroscope with ring resonator with unboundedly wide usage of digital technologies are described. The description of the proposed control system and results of its numerical modeling are provided. It is 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, are given.

**Key words:** microelectromechanical gyroscope, ring resonator, control system, digital signal processing, FPGA.

### 1. Введение

Развитие микроэлектроники, и особенно цифровых технологий, позволяет реализовывать всё более сложные системы управления различными объектами. Применительно к МЭМ-гироскопам данная тенденция выражается в возможности повышения точности и стабильности параметров гироскопов за счет совершенствования электронной подсистемы с применением цифровых технологий. В совокупности с оптимизацией конструкции и технологии изготовления чувствительных элементов это позволяет существенно улучшить некоторые параметры МЭМ-гироскопов, что расширяет область их практического применения. Следовательно, работы в данном направлении являются актуальными.

## 2. Чувствительный элемент

Используемый в данной работе чувствительный элемент МЭМ-гироскопа представляет собой кольцевой резонатор из монокристаллического кремния с упругим подвесом, размещенный в магнитном поле постоянного магнита. Внешний вид чувствительного элемента приведен на рис. 1. Непосредственно чувствительный элемент расположен в герметичном корпусе, образованном основанием 7 и крышкой 1. Внутренний объем корпуса вакуумируется для повышения добротности кольцевого резонатора. На стеклянном основании 5 методом анодного срачивания закреплен кремниевый резонатор 4 и магнитная система, состоящая из постоянного магнита 3, верхнего и нижнего магнитопроводов 2 и 6 соответственно. Магнитная система обеспечивает однородное постоянное магнитное поле в зазоре между магнитопроводами, где и располагается кольцевой резонатор.

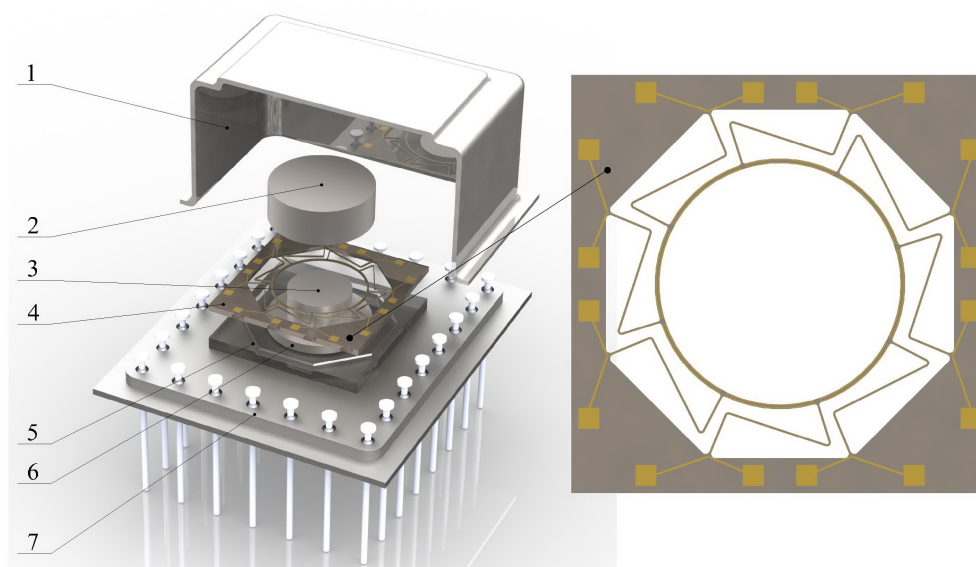


Рис. 1. Чувствительный элемент

На верхнюю поверхность кольца нанесены восемь проводников, формирующих при соответствующем подключении контуры первичных и вторичных колебаний. Первичные колебания резонатора возбуждаются силой Ампера, возникающей при пропускании тока через проводники контура в магнитном поле. Контроль амплитуды первичных и вторичных колебаний осуществляется по величине ЭДС, возникающей при движении проводника в постоянном магнитном поле. Гироскопы с рассматриваемым чувствительным элементом работают в режиме совмещенных мод, т.е. частоты контуров первичных и вторичных колебаний совмещаются максимально близко друг к другу, что требует специальной операции их подгонки для устранения технологического разброса при изготовлении резонатора.

Использование магнитоэлектрической системы возбуждения и регистрации колебаний приводит к относительно большим, по меркам современных МЭМ-гироскопов, габаритным размерам (для размещения магнитной системы) и повышенному энергопотреблению (т.к. требуется поддержание относительно больших токов возбуждения и компенсации колебаний). Однако именно такое исполнение позволяет достичь минимальной чувствительности к вибрационным и ударным воздействиям.

## 3. Цифровая электронная подсистема

Ключевой особенностью разрабатываемой системы управления является максимально широкое использование цифровых технологий. Структурная схема электронной подсистемы приведена на рис. 2. На структурной схеме условно показано соединение соответствующих проводников, расположенных на кольцевом резонаторе, образующее контуры первич-

ных и вторичных колебаний. Каждый из этих контуров содержит усилитель и аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) для получения информации о параметрах движения, а также цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с преобразователем напряжения в ток (V-I) для возбуждения первичных или компенсации вторичных колебаний. Контур первичных и вторичных колебаний отличаются друг от друга только различными коэффициентами усиления.

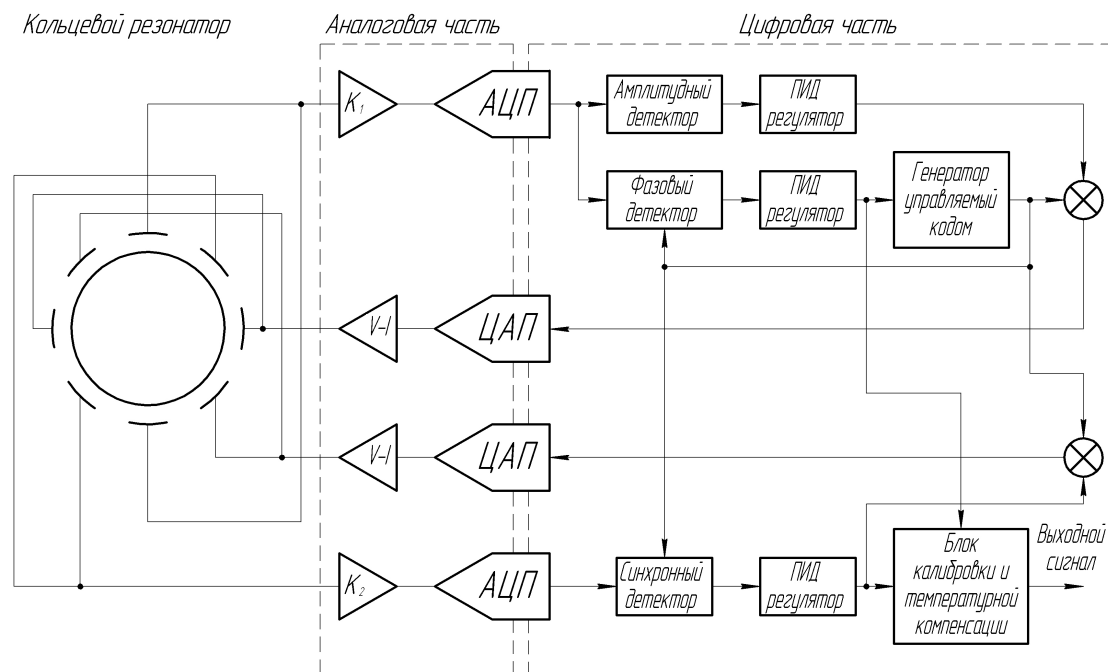


Рис. 2. Структурная схема МЭМ-гироскопа с кольцевым резонатором и цифровой электронной подсистемой

Весь остальной функционал электронной подсистемы выполнен полностью в цифровом формате. В данной работе реализуется метод управления колебаниями кольцевого резонатора, при котором в контуре первичных колебаний на резонансной частоте возбуждаются колебания с постоянной заданной амплитудой, а в контуре вторичных колебаний обеспечивается компенсация колебаний, вызванных проекцией угловой скорости на ось чувствительности гироскопа. Для этого в контуре первичных колебаний необходимо использовать фазовый и амплитудный детектор, формирующие сигнал ошибки по фазе и амплитуде первичных колебаний. Сигналы ошибки поступают на вход регуляторов, в качестве которых могут быть использованы пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. Сигнал ПИД-регулятора фазы колебаний поступает на генератор гармонических колебаний, управляемый кодом, формируя полностью цифровую петлю фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Сигнал с ПИД-регулятора амплитуды определяет амплитуду возбуждающего сигнала в контуре первичных колебаний. Таким образом, формируется замкнутый контур управления с обратной связью по амплитуде и частоте первичных колебаний, позволяющий с высокой точностью поддерживать резонансное возбуждение кольцевого резонатора с постоянной амплитудой, в том числе при воздействии внешних факторов (например, при изменении температуры, приводящей к сдвигу собственной частоты и изменению добротности колебательного контура). Определение амплитуды вторичных колебаний, вызванных проекцией угловой скорости на ось чувствительности и квадратурной помехой, реализовано с помощью синхронного детектора, где в качестве опорных используются сигналы генератора, управляемого кодом, контура первичных колебаний. Далее с помощью ПИД-регуляторов формируется управляющий сигнал контура вторичных колебаний, компенсирующий синфазные и квадратурные вторичные колебания.

#### 4. Математическая модель системы и численное моделирование

Для успешной разработки системы управления необходима математическая модель системы, позволяющая оценивать влияние отдельных факторов на систему в целом. Для комплексного численного моделирования работы гироскопа используется среда численного моделирования Simulink. В Simulink реализовано совместное моделирование поведения чувствительного элемента, описываемого системой дифференциальных уравнений, аналогово-цифровой части, описываемой передаточными функциями, и цифровой части, определяемой используемыми алгоритмами. Часть исходных параметров модели измерены непосредственно, остальные определены по результатам конечноэлементного моделирования в среде ANSYS.

Кольцевой чувствительный элемент МЭМ-гироскопа по принципу функционирования наиболее близок к твердотельным волновым гироскопам (ТВГ). Подробное теоретическое описание ТВГ, включая математическую модель движения чувствительного элемента, приведено в [1]. Адаптация данной теории для случая кольцевого резонатора в МЭМ исполнении с учетом особенностей магнитоэлектрической системы возбуждения и регистрации колебаний проведена в работе [2]. В случае использования второй моды колебаний кольцевого резонатора радиальное смещение элемента кольца  $w(\varphi, t)$  ищется в виде

$$w(\varphi, t) = p(t) \cos(2\varphi) + q(t) \sin(2\varphi).$$

Система уравнений, описывающая движение и первичные электрические сигналы кольцевого резонатора, при этом имеет вид

$$\begin{cases} \ddot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{p}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2p(t) - \frac{8}{5}\Omega\dot{q}(t) = \frac{1}{5}Hi_1(t), \\ \ddot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2\xi\dot{q}(t) + \frac{36}{5}\kappa^2q(t) + \frac{8}{5}\Omega\dot{p}(t) = \frac{1}{5}Hi_2(t), \\ E_1 = 2B(-\frac{\sqrt{2}}{2}R + \frac{\pi+2}{8}p(t))\dot{p}(t) + 2B\frac{\pi+2}{8}\dot{q}(t)q(t), \\ E_2 = 2B(-\frac{\sqrt{2}}{2}R + \frac{\pi+2}{8}q(t))\dot{q}(t) + 2B\frac{\pi+2}{8}\dot{p}(t)p(t), \end{cases}$$

где  $\kappa = \sqrt{EJ/\rho SR^4}$ ,  $\xi = 1/w_0Q$ ,  $H = 4B\sqrt{2}/\pi\rho S$ ,  $\Omega$  — проекция угловой скорости вращения основания кольцевого резонатора на нормаль к плоскости резонатора,  $B$  — напряженность магнитного поля в области расположения кольцевого резонатора,  $E_1, E_2$  — ЭДС в контуре первичных и вторичных колебаний,  $i_1, i_2$  — ток в контуре первичных и вторичных колебаний,  $R$  — радиус кольцевого резонатора,  $S$  — площадь поперечного сечения кольцевого резонатора,  $J$  — момент инерции поперечного сечения кольцевого резонатора,  $\rho$  — плотность материала кольцевого резонатора,  $E$  — модуль Юнга материала кольцевого резонатора,  $Q$  — добротность кольцевого резонатора.

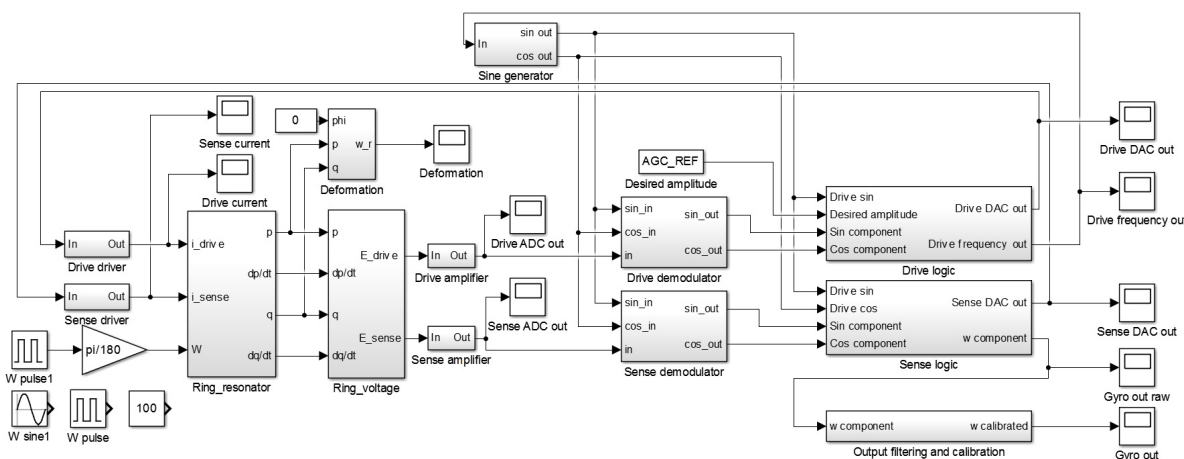


Рис. 3. Модель кольцевого резонатора с электронной подсистемой в Simulink

Модель, приведенная на рис. 3, требует задания в качестве входного параметра закона изменения во времени приложенной угловой скорости и позволяет наблюдать все основные характеристики работы системы управления гироскопа. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными приведено в разделе о практической реализации макетного образца гироскопа.

## 5. Практическая реализация и результаты испытаний

### 5.1. Описание макетного образца гироскопа

Для практической реализации предложенных алгоритмов управления и экспериментальной оценки их эффективности был разработан и изготовлен макетный образец гироскопа, внешний вид которого приведен на рис. 4. В макете использован кольцевой чувствительный элемент производства МИЭТ. Чувствительный элемент установлен на разработанную специализированную плату аналого-цифрового ввода/вывода, содержащую необходимые усилители, АЦП и ЦАП. Частота дискретизации  $f_d = 1$  МГц, разрядность АЦП – 16 бит, разрядность ЦАП – 14 бит. Опорное напряжение для ЦАП и АЦП – 4,096 В. Также на плату непосредственно под корпус чувствительного элемента гироскопа установлен интегральный датчик температуры с разрешением 12 бит. Интерфейс подключения ЦАП и АЦП – SPI, интерфейс подключения датчика температуры – I2C.

В качестве платы цифровой обработки была использована отладочная плата Nexys 4 производства компании Digilent с установленной ПЛИС XC7A100T современного семейства Artix-7 компании Xilinx. Данная ПЛИС обладает достаточными ресурсами для реализации всех требуемых алгоритмов управления гироскопом (15 850 эквивалентных логических ячеек и 240 DSP-ячеек).

Кроме реализации непосредственно алгоритмов управления чувствительным элементом создана вспомогательная система, позволяющая производить запись отладочной информации в процессе работы макета. Сохранение запрашиваемых данных производится в буфер, использующий микросхему Cellular RAM-памяти ёмкостью 16 Мбайт. Использование промежуточного буфера позволяет производить запись переменных с произвольной скоростью (вплоть до частоты дискретизации ЦАП и АЦП) для последующего анализа. Кроме того, реализован режим непрерывного сохранения набора параметров со сниженной частотой обновления для проведения длительных испытаний. Внутренние переменные, подлежащие сохранению, длительность и частота записи, событие, по которому начинается запись, задаются в специализированной программе на персональном компьютере. Эта же программа позволяет непосредственно в процессе работы гироскопа изменять коэффициенты электронной подсистемы без перепрограммирования ПЛИС.

### 5.2. Особенности реализации температурной компенсации

Зависимость выходного сигнала МЭМ-гироскопов от температуры является одним из существенных источников ошибки в определении угловой скорости. Для её уменьшения в приложениях с повышенными требованиями к точности широко используется термокомпенсация данной погрешности по результатам калибровки, проведенной при различных температурах из требуемого температурного диапазона. В случае использования внешнего датчика температуры, особенно при её резком изменении, возникающий температурный градиент приводит к существенному ограничению точности термокомпенсации. Возникает своеобразный гистерезис: разница выходного сигнала гироскопа при его нагревании и остывании. Возможным решением данной проблемы является использование непосредственно чувствительного элемента гироскопа в качестве датчика температуры. Успешные результаты применения данного подхода с чувствительным элементом другого типа приведены в [3]. Собственные частоты кремниевых МЭМ-изделий зависят от их температуры. Определяющим фактором является температурная зависимость упругих свойств кремния.



Рис. 4. Изготовленный макетный образец МЭМ-гироскопа с кольцевым резонатором и цифровой электронной подсистемой

Разрабатываемая цифровая система управления с высокой точностью отслеживает резонансную частоту в контуре первичных колебаний. Таким образом, управляющий сигнал полностью цифровой петли ФАПЧ контура первичных колебаний может быть использован для определения изменения температуры чувствительного элемента гироскопа.

Для моделирования этого эффекта одновременно с анизотропными механическими свойствами монокристаллического кремния использованы параметры кремния из работы [4]. Матрица коэффициентов упругости для кремния при комнатной температуре имеет вид

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{bmatrix},$$

где  $C_{11} = 1,6564 \cdot 10^{11}$  Па,  $C_{12} = 0,6394 \cdot 10^{11}$  Па,  $C_{44} = 0,7951 \cdot 10^{11}$  Па. Температурная зависимость коэффициентов матрицы упругости в интересующем температурном диапазоне близка к линейной и описывается следующими соотношениями:

$$\frac{1}{dC_{11}} \cdot \frac{dC_{11}}{dT} = -73.3 \cdot 10^{-6} K^{-1}, \quad \frac{1}{dC_{12}} \cdot \frac{dC_{12}}{dT} = -91.6 \cdot 10^{-6} K^{-1}, \quad \frac{1}{dC_{44}} \cdot \frac{dC_{44}}{dT} = -60.1 \cdot 10^{-6} K^{-1}.$$

Используя приведенные параметры в среде конечноэлементного моделирования ANSYS был проведен анализ зависимости собственной частоты кольцевого резонатора для рабочей моды колебаний от температуры. Температурная зависимость по результатам моделирования — линейная с коэффициентом  $-0,447$  Гц/°С, что при номинальной собственной частоте  $14\,260$  Гц соответствует  $-31.3 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Экспериментальный график изменения собственной частоты от температуры в диапазоне от  $-30$  до  $+50$  °С приведен на рис. 5. Данные об изменении собственной частоты получены на основе выходного значения ПИД-регулятора фазы первичных колебаний. Зависимость близка к линейной, коэффициент пропорциональности  $-0,41$  Гц/°С, что соответствует  $-28.8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ . Расхождение результата моделирования и экспериментального значения составляет менее 10% и может быть вызвано влиянием температурной деформации основания кольцевого резонатора и зависимостью

температурных коэффициентов от степени легирования кремния. Среднеквадратичное значение шума при измерении температуры с временем усреднения 1 с составляет  $0.002\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что показывает высокую разрешающую способность данного метода. Сравнение показаний внешнего интегрального датчика температуры с разрешением 12 бит и значений, полученных по изменению частоты первичных колебаний, приведено на рис. 6. Проведенный эксперимент подтверждает высокую точность метода и возможность использования управляющего сигнала фазы первичных колебаний для построения системы температурной компенсации.

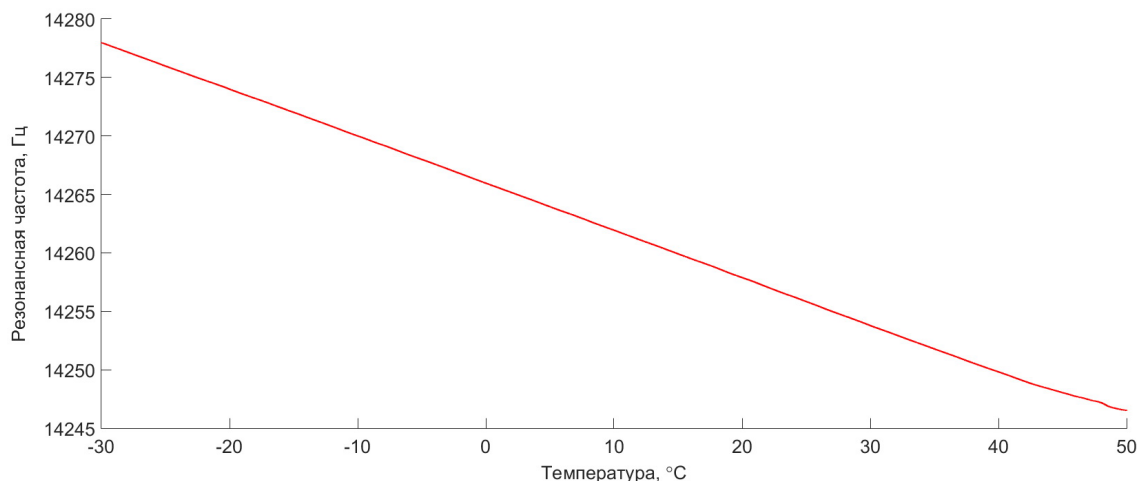


Рис. 5. Экспериментальная зависимость частоты первичных колебаний от температуры

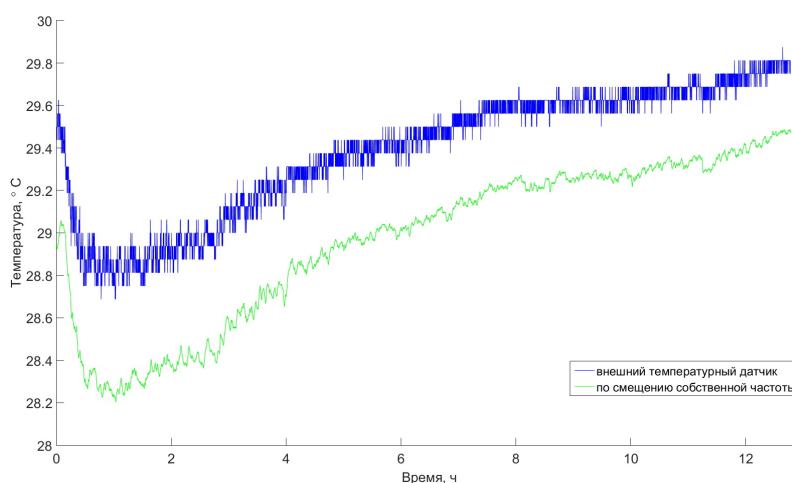


Рис. 6. Сравнение показаний внешнего температурного датчика со значениями, полученными по изменению частоты первичных колебаний

### 5.3. Описание испытательного стенда

Для проведения калибровки и определения характеристик макетного образца гироскопа использовался созданный автоматизированный испытательный стенд, структурная схема которого приведена на рис. 7. Основой автоматизированного испытательного стенда является двухосевой имитатор движения Actidyn ST 2523C, подвижная платформа которого расположена внутри термокамеры, обеспечивая возможность задания произвольных значений угловой скорости по обеим осям вращения при требуемой температуре. Для проведения испытаний было разработано специализированное программное обеспечение, которое позволяет одновременно управлять заданием температурных и механических воздействий



(вращение/позиционирование), а также производить регистрацию сигналов с испытываемого изделия. Это позволяет в автоматизированном режиме без вмешательства оператора определять основные параметры испытываемого изделия (в том числе и трехосевых блоков) и их температурные зависимости. Автоматизация процесса измерений позволяет производить калибровку при большем наборе воздействующих параметров, что в конечном счете позволяет увеличить её точность.

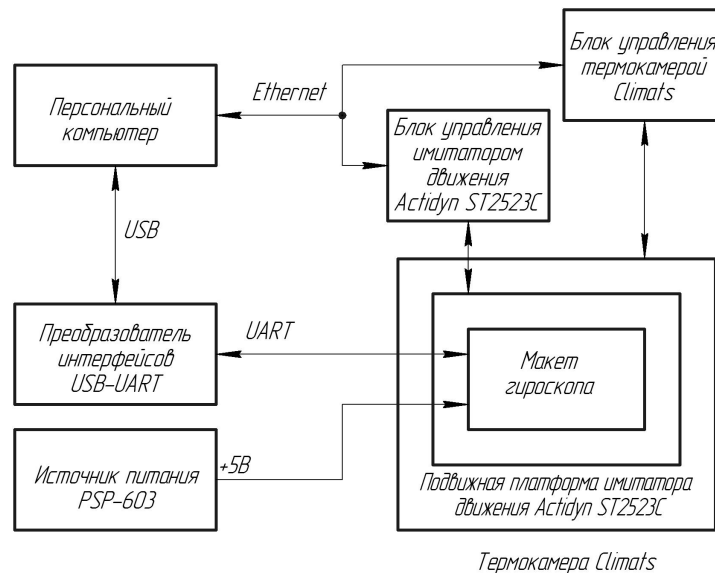


Рис. 7. Автоматизированный измерительный стенд

#### 5.4. Результаты испытаний

Переходя к результатам практических испытаний макетного образца гироскопа, следует отметить хорошее согласование результатов моделирования в Simulink с экспериментально полученными зависимостями. Например, на рис. 8 представлено сравнение процесса возбуждения первичных колебаний кольцевого резонатора после включения питания по результатам численного моделирования и анализа экспериментальных данных. Время установления первичных колебаний после включения макета гироскопа не превосходит 300 мс. Среднеквадратичное значение отклонения амплитуды первичных колебаний от заданного значения в установившемся режиме не превосходит 0.01%.

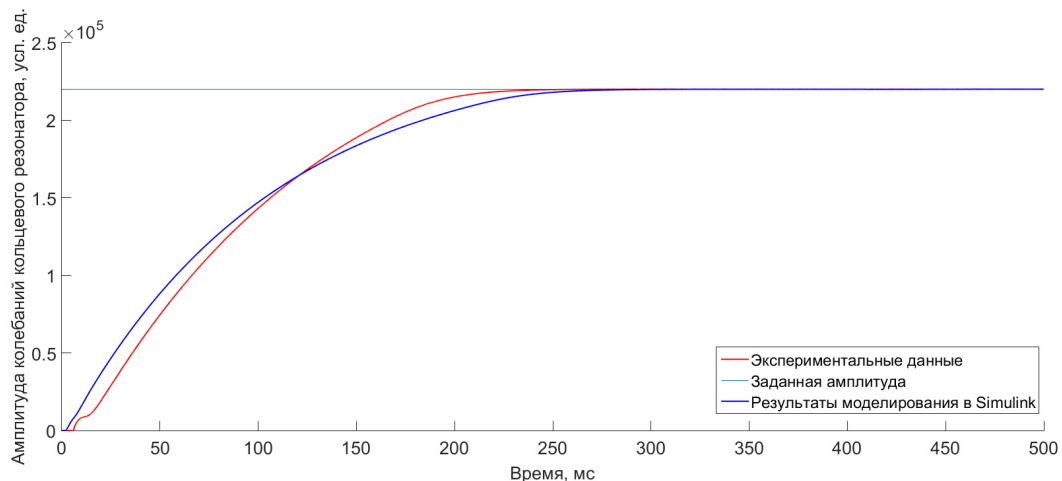


Рис. 8. Процесс возбуждения и стабилизации первичных колебаний



Диапазон измеряемых угловых скоростей макетного образца составил от  $-400$  до  $400$  град./с. Выходной сигнал гироскопа при последовательном воздействии угловых скоростей от  $-400$  до  $400$  град./с с шагом  $20$  град./с приведен на рис. 9. Красным отмечены участки воздействия постоянной угловой скорости, по которым в автоматизированном режиме производится определение характеристик гироскопа. По этим данным программа обработки может построить выходную характеристику гироскопа, приведенную на рис. 9. Нелинейность полученной выходной характеристики макетного образца гироскопа не превышает  $0.15\%$ .

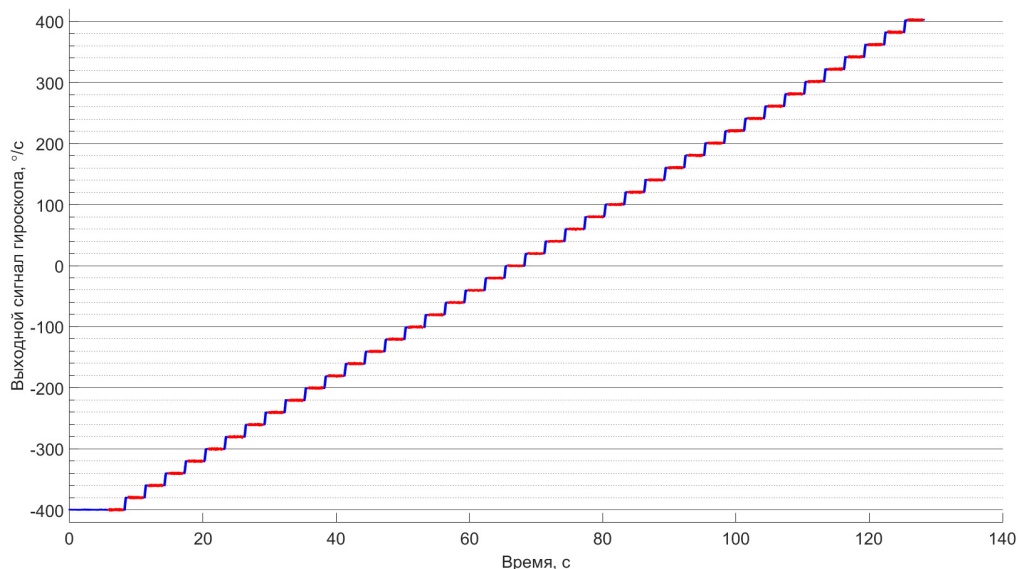


Рис. 9. Выходной сигнал макетного образца гироскопа при испытаниях

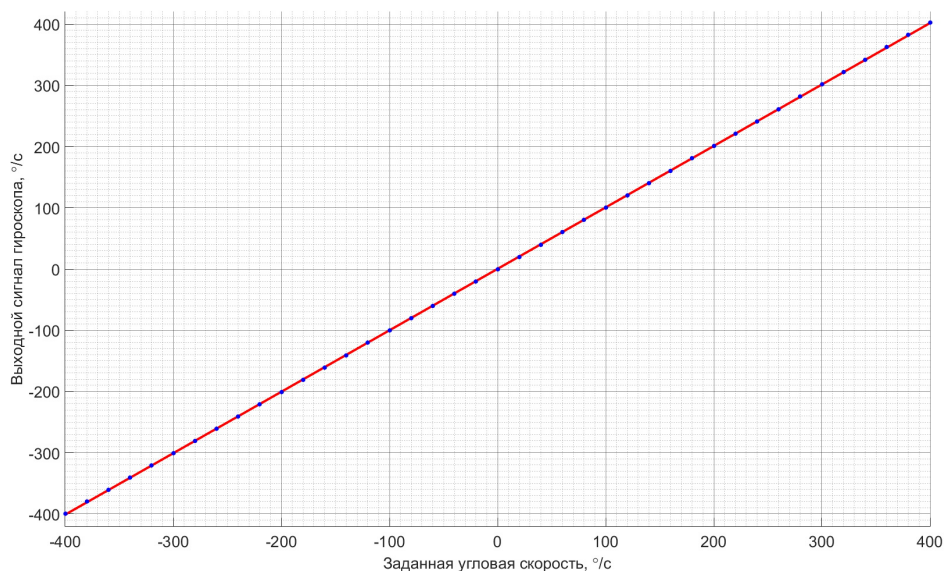


Рис. 10. Выходная характеристика макетного образца гироскопа

Нестабильность нулевого сигнала гироскопа определялась с использованием вариации Аллана. Для этого записывается длительная (несколько часов) выборка выходного сигнала гироскопа при нулевой заданной угловой скорости, которая затем обрабатывается программой анализа характеристик, входящей в состав автоматизированного испытательного комплекса. Зависимость вариации Аллана от времени корреляции приведена на рис. 11. Минимум достигается при времени корреляции около  $100$  с и составляет  $18$  град./ч.

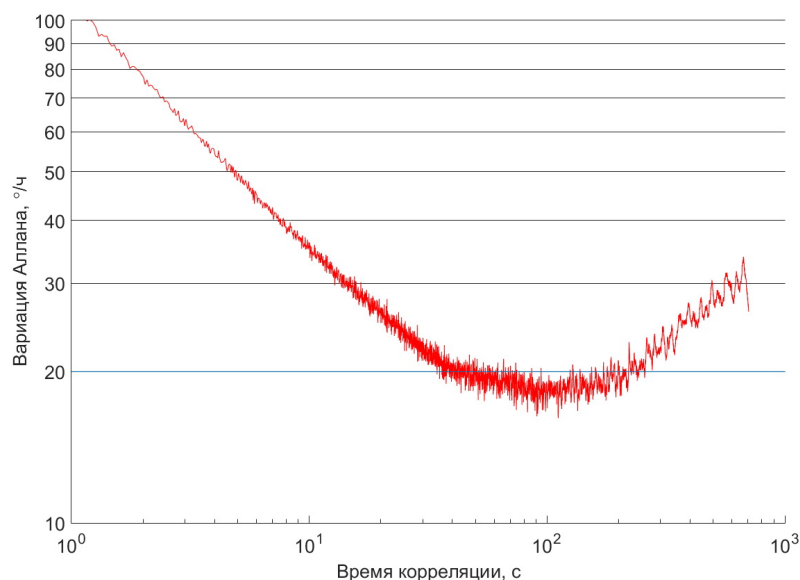


Рис. 11. Вариация Аллана выходного сигнала макетного образца гироскопа

Полученные характеристики полностью подтверждают работоспособность макетного образца, однако для дальнейшего их улучшения требуется устранение выявленных в процессе испытаний недостатков.

## 6. Заключение

Разработан действующий макетный образец гироскопа с кольцевым МЭМ-чувствительным элементом и цифровой системой управления. В программной среде Simulink создана комплексная модель гироскопа с системой управления, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными. Реализован программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить испытания как одноосевых гироскопов, так и трехосевых блоков в требуемом диапазоне температур в автоматизированном режиме. Проведен основной набор испытаний макетного образца с определением его характеристик, подтверждающий работоспособность предложенной системы. Определены необходимые дальнейшие шаги по повышению точности макета гироскопа.

## Литература

1. *Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В.* Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
2. *Тимошенко С.П., Анчутин С.А., Плеханов В.Е., Кочурина Е.С., Тимошенко А.С., Зуев Е.В.* Разработка математического описания кольцевого микрогироскопа // *Нано- и микросистемная техника*. 2014. Т. 5. С. 18–25.
3. *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.
4. *Hopcroft M.A., Nix W.D., Kenny T.W.* What is the Young's Modulus of Silicon? // *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2010. V. 19, N 2. P. 229–238.

## References

1. *Matveev V.A., Lipatnikov V.I., Alehin A.V.* Development of solid-wave gyroscope. M.: Bauman BMSTU, 1997. (in Russian).

2. *Timoshenkov S.P., Anchutin S.A., Plehanov V.E., Kochurina E.S., Timoshenkov A.S., Zuev E.V.* Development of Mathematical Descriptions of the Micromechanical Ring Gyroscope. *Journal of Nano and Microsystem Technique*. 2014. N 5. P. 18–25. (in Russian).
3. *Prihodko 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.
4. *Hopcroft M.A., Nix W.D., Kenny T.W.* What is the Young's Modulus of Silicon? *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2010. V. 19, N 2. P. 229–238.

*Поступила в редакцию 22.04.2016*