

Моделирование зубчатого резонатора микроэлектромеханического гироскопа

В.А. Зеленский¹, М.В. Капалин¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Объектом исследования является зубчатый резонатор вибрационного кольцевого микроэлектромеханического гироскопа. Предложена и реализована в программной среде математическая модель устройства. Представлены основные этапы разработки модели, описаны модельные эксперименты с использованием метода конечных сеток. При выполнении балансировки, зубчатый резонатор позволяет получать меньшие значения расщепления частоты, что доказывает преимущество предложенной конструкции по сравнению с известными решениями. Результаты работы могут быть использованы при разработке микромеханических инерционных датчиков беспилотных летательных аппаратов.

1. Введение

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) в настоящее время стали неотъемлемой частью множества устройств. С развитием робототехники, беспилотных летательных аппаратов все больший интерес вызывают инерциальные МЭМС–датчики угловых и линейных ускорений (гироскопы и акселерометры), которые могут обеспечить достаточную точность для автономной навигации [1].

В то время как МЭМС–акселерометры приемлемой точности уже существуют, проблема повышения точности МЭМС–гироскопа до сих пор является сложной научно-технической задачей. Объектом исследования в данной работе является запатентованная авторами конструкция зубчатого резонатора [2] – чувствительного элемента вибрационного кольцевого гироскопа (ВКГ). Данная конструкция обладает рядом преимуществ по сравнению с известными решениями, поэтому тема исследования представляется актуальной.

Предметом исследования является математическая модель зубчатого резонатора.

Цель работы – определить разницу значений расщепления частоты резонатора до и после балансировки методом удаления материала.

Для выполнения поставленной в работе цели необходимо рассмотреть принцип работы зубчатого резонатора, разработать математическую модель устройства, выполнить имитационные эксперименты, сравнить полученные результаты с известными данными.

2. Принцип работы ВКГ

Вибрационный кольцевой гироскоп (ВКГ) является вибрационным гироскопом осцилляторного типа и используется в качестве чувствительного элемента в инерциальном МЭМС-датчике. Упрощённая функциональная схема датчика представлена на рисунке 1.

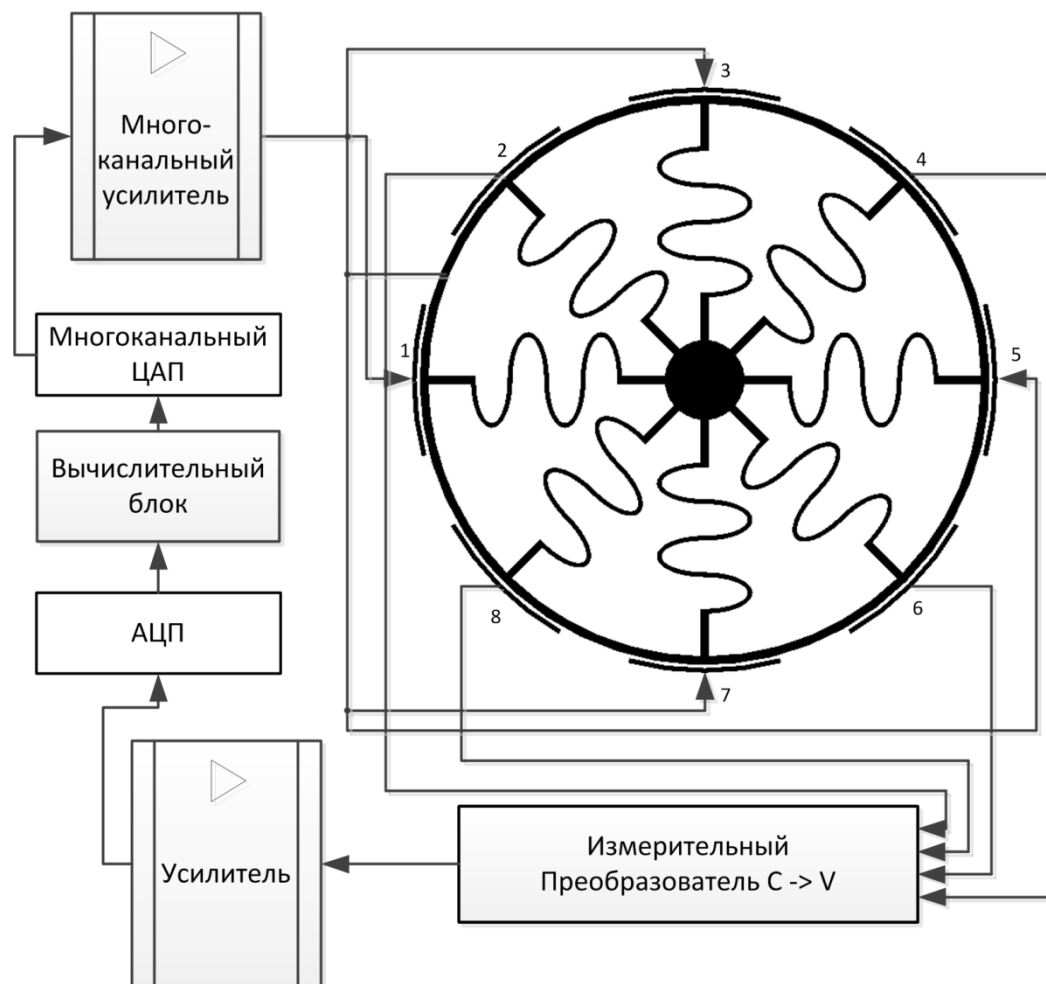


Рисунок 1. Упрощенная функциональная схема ВКГ.

Вычислительный блок генерирует управляющие последовательности цифровых кодов для четырех электродов, возбуждающих колебания и одну кодовую последовательность для резонатора. Последовательности преобразуются в аналоговый сигнал в ЦАП, усиливаются и подаются на механическую часть. Этот сигнал, в общем случае, представляет собой обычную синусоиду с частотой, равной второй собственной частоте резонатора. Сигналы, подаваемые на электроды 1, 5 и резонатор находятся в противофазе к сигналам, подаваемым на электроды 3, 7. При работе устройства изменяются ёмкости между резонатором и чувствительными электродами 2, 4, 6, 8, что приводит к подаче разностного сигнала в измерительный преобразователь. Разностный сигнал усиливается, переводится в цифровую форму и подается на вычислительный блок, где из него извлекается информация о текущей угловой скорости.

Отличительная особенность ВКГ – наличие колебательного движения чувствительного элемента (резонатора). Основная проблема ВКГ, не позволяющая этим приборам достичь навигационного класса точности, это наличие квадратурной волны, которая приводит к появлению погрешностей измерения угловой скорости.

3. Математическое описание работы зубчатого резонатора

Общее уравнение для нормального прогиба кольца в работе [3] представлено в следующей форме:

$$\ddot{w} - \ddot{w} - \dot{w} \quad (w \quad) \quad \xi(\dot{w} \quad w \quad \cdot \quad) \quad \frac{\sum_i \vec{P} + \sum_i \vec{P}}{\quad} \quad (1)$$

где:

$w(t, \gamma)$ – радиальное перемещение точек средней линии резонатора, положительно в направлении центра кольца;

γ – окружной угол с положительным отсчетом в системе координат ОХУ корпуса против часовой стрелки;

$1/(\rho S R^4)$ – приведенный коэффициент упругих сил резонатора;

E – модуль Юнга материала кольца;

I – момент инерции относительно оси изгиба;

S – площадь поперечного сечения кольца;

R – радиус средней линии недеформированного кольцевого резонатора;

ρ – плотность материала кольца;

ξ – приведенный коэффициент диссипативных сил резонатора (коэффициент характеризующий время затухания свободных колебаний резонатора);

$\sum_i \vec{P}_{\text{норм } i}$ – сумма всех внешних воздействий на нормаль к недеформированному кольцу;

$\sum_i \vec{P}_{\text{касат } i}$ – сумма всех внешних воздействий на касательную к недеформированному кольцу;

\dot{w} – производная по времени t ;

w' – производная по углу φ .

Из формулы (1) следуют зависимость угла поворота ϑ прецессирующей волны от угловой скорости Ω (2) и угол сдвига фазы волны φ от времени t (3):

$$\vartheta = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau = \left(\frac{(n-1)^4}{(n-1)^2} \right) \left(1 - \frac{1}{Q} \right) \quad (2)$$

$$\varphi = \left(\frac{(n-1)}{640(n-1)^2} \right) a_3 \left(\frac{1}{Q} \right) \quad (3)$$

где:

n – номер моды колебаний;

ϑ – угол прецессии волны;

ϑ_0 – начальный угол прецессии;

r_0 – амплитуда колебаний основной волны;

k_0 – амплитуда колебаний квадратурной волны;

ω_n – собственная частота колебаний для n -ой моды;

φ – угол сдвига фазы волны;

φ_0 – начальный сдвиг фазы;

– поправка к масштабному коэффициенту;

h – толщина кольца;

– поправочный коэффициент, определяемый экспериментально;

c – коэффициент, характеризующий жесткость упругих подвесов (торсионов);

Q – добротность колебательной системы;

t – время, отсчитываемое от момента запуска работы устройства;

τ – временной интервал, на котором присутствует угловая скорость в рабочей плоскости гироскопа.

В формуле (2) необходимо различать t и τ , так как уход гироскопа происходит постоянно в рабочем режиме, а угловая скорость может воздействовать лишь определенные временные интервалы.

Собственная частота колебаний ω_n для n -ой моды в свою очередь:

$$\omega_n = \frac{n\sqrt{(n-1)^2}}{\pi\sqrt{12}\sqrt{n}} \sqrt{\dots} \quad (4)$$

Таким образом, зависимость дрейфа смещения нуля гироскопа ϑ_* от времени t , вызванного нелинейными упругими свойствами материала резонатора для второй моды и кольца с прямоугольным сечением [4]:

$$\dot{\vartheta}_* = \frac{\alpha_3}{\omega_0} \left(1 - \frac{1}{\zeta} \right) \quad (5)$$

Как видно из формулы (5) угловая скорость гироскопа от времени является функцией большого числа переменных, кроме того, в уравнении присутствует коэффициент α_3 , который определяется экспериментально, что не позволяет полностью аналитически определить параметры, при которых гироскоп будет иметь наименьшую угловую скорость, вызванную наличием квадратурной волны.

Поэтому для решения задачи поиска параметров чувствительного элемента, при которых гироскоп будет обладать лучшими метрологическими характеристиками, целесообразно использование численных методов, в частности, метода конечных элементов.

4. Конструкция зубчатого резонатора

Для уменьшения расщепления частоты можно изменять массу устройства, например путем удаления части материала [5]. Однако удаление части материала с основной части резонатора (кольца) приводит к потере прочности элемента и изменению характера его деформации.

Этих недостатков лишена предложенная конструкция зубчатого резонатора, представленная на рисунке 2, где 1 - жестко закреплённый элемент, 2 – упругие подвесы, 3 – инерциальный элемент кольцевой формы, 4 – зубцы.

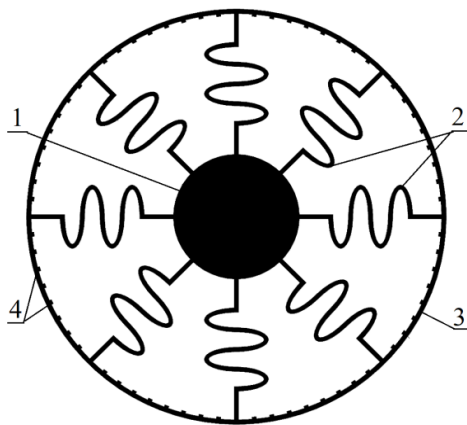


Рисунок 2. Конструкция зубчатого резонатора.

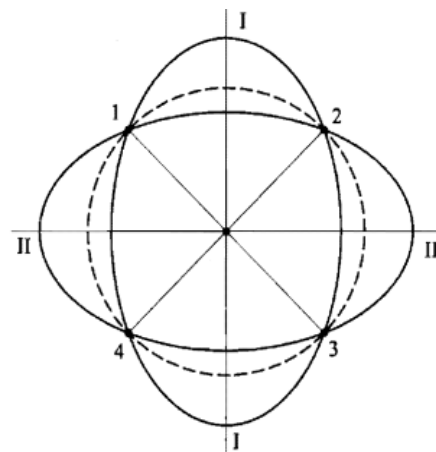


Рисунок 3. Диаграмма вибраций зубчатого резонатора.

При удалении материала с зубцов не уменьшается поперечное сечение основной части кольца, и поэтому не будет снижаться прочность этой части. Зубцы можно подвергнуть более грубым методам обработки, так как они выступают от основной части резонатора. Кроме того, зубцы практически не испытывают деформаций в рабочем режиме, и, следовательно, отклонение фактической формы деформации от теоретической после удаления части материала с зубцов будет значительно меньше, чем при удалении материала с основной части резонатора.

Зубчатый резонатор функционирует следующим образом. В элементе кольцевой формы возбуждаются и поддерживаются вынужденные колебания на второй собственной частоте кольца электростатическим или другим методом, причем воздействие происходит, например, в направлении осей I-I, II-II (рисунок 3).

В таком случае, информационные колебания будут распространяться вдоль осей 1-3, 2-4. При отсутствии угловой скорости в плоскости кольца деформация резонатора в точках 1, 2, 3, 4 является периодической функцией времени. При наличии угловой скорости, действующей в плоскости кольца, данная функция будет зависеть не только от времени, но и от значения угловой скорости. Выделив составляющую, зависящую от угловой скорости, можно определить угловую скорость, что и является выходной информацией инерциального датчика (гироскопа).

5. Имитационное моделирование работы зубчатого резонатора

Исследуемые 3-х мерные модели представлены на рисунках 4, 5. На рисунке 4 представлена модель известного резонатора (прототип), на рисунке 5 – модель предлагаемого зубчатого резонатора.

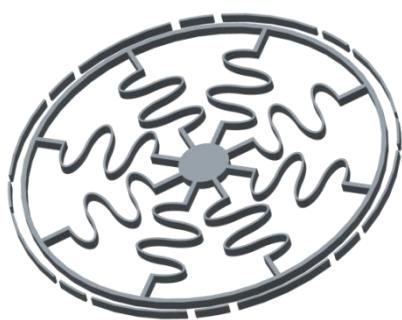


Рисунок 4. Модель известного резонатора.

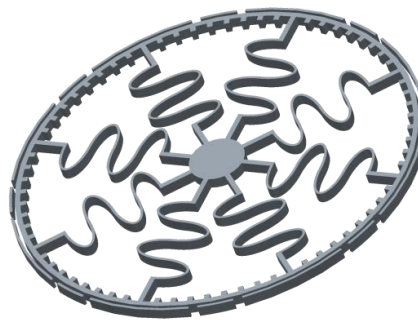


Рисунок 5. Модель зубчатого резонатора.

Для имитационного моделирования работы зубчатого резонатора использовалась программная среда COMSOL Multiphysics. Основные этапы моделирования представлены на рисунке 6.

В результате модельного эксперимента были получены данные, содержащие информацию о расщепления частоты для итераций с различными геометрическими параметрами дефектов и количеством удаленного материала. После выбора наилучших значений для каждой конструкции были получены данные, сведенные в таблицу 1.

Таблица 1. Результаты исследования расщепления частоты, j – индекс, определяющий конструкцию, i – индекс, определяющий этап исследования.

	Частоты по осям, Гц		Расщепление частоты, Гц
	ω_{ji}	ν_{ji}	
	Удаление материала с зубцов		
Без дефектов	$\omega_{11} = 4758,80$	$\nu_{11} = 4758,85$	0,05 (100%)
С дефектами	$\omega_{12} = 4749,77$	$\nu_{12} = 4749,99$	0,22 (440%)
После коррекции	$\omega_{13} = 4761,32$	$\nu_{13} = 4761,38$	0,06 (120%)
	Удаление материала с основной части резонатора		
Без дефектов	$\omega_{21} = 5172,34$	$\nu_{21} = 5172,40$	0,06 (100%)
С дефектами	$\omega_{22} = 5161,16$	$\nu_{22} = 5161,48$	0,32 (533%)
После коррекции	$\omega_{23} = 5165,95$	$\nu_{23} = 5166,11$	0,16 (267%)



Рисунок 6. Этапы моделирования.

Для оценки результатов удобнее рассматривать значения расщепления частоты, рассчитанные из таблицы 1 и представленные в таблице 2.

Таблица 2. Результаты вычисления расщепления частоты, i – индекс, определяющий этап исследования.

Удаление материала с	$\Delta\omega= \omega_{i2} - \omega_{i1} $, Гц	$\Delta\nu= \nu_{i2} - \nu_{i1} $, Гц	—— 100, %
зубцов, $i = 2$	9,03	8,86	0,19
основной части резонатора, $i = 2$	11,18	10,92	0,21
зубцов, $i = 3$	2,52	2,53	0,05
основной части резонатора, $i = 3$	6,39	6,29	0,12

Анализируя данные таблиц 1 и 2 можно сделать следующие выводы.

Наличие дефектов приводит к изменению собственных частот колебаний резонатора и их разности. Причем резонатор с зубцами более устойчив к дефектам (частоты изменились на 0,19%, а расщепление частоты составило 440% от первоначального, в то время как для обычной конструкции эти значения больше и составляют 0,21% и 533% соответственно).

Балансировка методом удаления материала позволяет значительно снизить влияние дефектов на характеристики резонатора. После балансировки изменение значений рабочих частот составило 0,05%, а расщепление частоты 120% от значений, полученных до добавления дефектов, для обычной конструкции эти значения составили 0,12% и 267% соответственно.

Учитывая квадратичную зависимость значения дрейфа смещения нуля гироскопа от значения расщепления частоты [6], можно теоретически оценить его значение для гироскопа в каждом случае (таблица 3).

Таблица 3. Теоретическая оценка дрейфа смещения нуля гироскопа.

	ϑ_0 (без дефекта), град/с	(с дефектами), град/с	ϑ_{*2} (после коррекции), град/с
Зубчатый резонатор	0,0025	0,048 (↑ в 19 раз)	0,0036 (↓ 13 раз)
Обычный резонатор	0,0036	0,102 (↑ в 28 раз)	0,026 (↓ 4 раз)

Из таблицы 3 можно сделать следующие выводы. Во-первых, при добавлении дефектов, расщепление частоты увеличилось для конструкции с зубцами в 19 раз, а для обычной конструкции в 28 раз. Во-вторых, после коррекции это значение для зубчатого резонатора уменьшилось в 13 раз, а для обычного всего в 4 раза. В итоге, предполагаемый дрейф смещения нуля гироскопа после коррекции ϑ_{*2} для конструкции с зубцами составил $1,44\vartheta_{*0}$, а для обычной конструкции $7,22\vartheta_{*0}$. Соответственно, балансировка методом удаления материала для зубчатого резонатора оказалась в 5 раз эффективнее.

6. Заключение

Предложена новая конструкция резонатора для МЭМС-гироскопа, разработана обладающая признаками научной новизны математическая модель устройства, выполнены имитационные эксперименты, позволяющие сравнить полученные результаты с известными данными. Характеристики зубчатого резонатора более инвариантны к дефектам, которые неизбежны при изготовлении микроэлектромеханических элементов. Конструкция зубчатого резонатора позволяет путём удаления материала зубцов корректировать значение расщепления частоты резонатора в 5 раз эффективнее. Результаты работы позволят разрабатывать инерционные МЭМС-датчики для беспилотных летательных аппаратов и мобильных роботов с лучшими метрологическими характеристиками.

7. Литература

- [1] Сысоева, С.С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения / С.С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2014. – № 6. – С. 40-46.
- [2] Зеленский, В.А. Патент на полезную модель РФ №193215. Зубчатый резонатор инерциального микромеханического датчика / В.А. Зеленский, М.В. Капалин // Заявитель и патентообладатель «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» – зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 16.10.2019.
- [3] Тимошенко, С.П. Разработка математического описания кольцевого микрогироскопа / С.П. Тимошенко, С.А. Анчутин, В.Е. Плеханов, Е.С. Кочурина, А.С. Тимошенко, Е.В. Зуев // Нано- и микросистемная техника. – 2014. – Т. 166, № 5. – С. 18-25.
- [4] Меркурьев, И.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов / И.В. Меркурьев, В.В. Подалков – М.: Физматлит, 2009. – 228 с.
- [5] Зеленский, В.А. Исследование эффективности коррекции расщепления частоты вибрационного МЭМС-гироскопа путем удаления части материала резонатора / В.А. Зеленский, М.В. Капалин // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций: тр. Всероссийской научно-технической конференции – Самара: ООО «АРТЕЛЬ», 2019. – С. 78-80.
- [6] Нарайкин, О.С. Численное моделирование прецессии упругой волны в цилиндрическом резонаторе волнового твердотельного гироскопа с неоднородным распределением плотности / О.С. Нарайкин, Ф.Д. Сорокин, С.А. Козубняк, Д.С. Вахлярский // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2017. – № 5. – С. 41-51. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-5-41-51.

Modelling of the microelectromechanical system gyroscope's toothed resonator

V.A. Zelenskiy¹, M.V. Kapalin¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia 443086

Abstract. The object of the research is the toothed resonator of a vibration ring microelectromechanical system gyroscope. The mathematical model of the device is suggested and implemented in the simulation software. The main development stages of the model are produced, simulation experiments with the usage of a finite element method are described. At balancing accomplishment, the toothed resonator allows receiving smaller values of frequency splitting that proves the benefit of the suggested construction in comparison with the known decisions. The results of the work can be used when developing micromechanical inertial sensors of unmanned aerial vehicles.