

## АНАЛИЗ ПЛАНАРНЫХ МОДЕЛЕЙ ВИБРАЦИОННЫХ ГИРОСКОПОВ

Матвеев Е.В., А.Н. Виноградов

ГНУ «НИИ ПМТ»

(115054 г. Москва, ул. М. Пионерская, 12; e-mail: info@niipmt.ru)

В настоящее время большой интерес в науке и технике представляет создание и массовое производство миниатюрных недорогих инерциальных датчиков вращения – гироскопов вибрационного типа. Сфера их применения довольно широкая – от бытовых приборов до устройств специального назначения, включая космическую технику, где решаются задачи стабилизации положения или движения объектов в пространстве.

Вибрационные гироскопы существенно отличаются от роторных и лазерных наличием чувствительного элемента, способного совершать механические колебания в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Первичные колебания возбуждаются в исходной плоскости. При вращении вибрирующего элемента возникают боковые силы Кориолиса (как и в роторных гироскопах), вызывающие вторичных колебаний в плоскости, перпендикулярной исходной. Амплитуда вторичных колебаний пропорциональна угловой скорости вращения. Отношение измеренной каким-либо способом амплитуды вторичных колебаний к величине измеряемой угловой скорости характеризует чувствительность гироскопа. В подобных устройствах отсутствуют вращающиеся детали, а чувствительность, в основном, определяется добротностью резонатора и частотой первичных колебаний. Кроме того, вибрационный принцип функционирования позволяет существенно снизить массогабаритные характеристики датчиков, их энергопотребление и стоимость. Наиболее перспективными и технологичными представляются планарные конструкции (длина и ширина которых много больше их толщины), выполненные на базе обработки пластин кремния (МЭМС – технологии), кварца, пьезокерамики и других материалов.

В данной работе представлены результаты исследования трех различных конструкций планарных вибрационных гироскопов, использующих пьезоэффект для возбуждения первичных колебаний и регистрации параметров вторичных колебаний. На рис. 1 показана модель крестообразного кварцевого резонатора с инерционными массами, приведенная в [1].

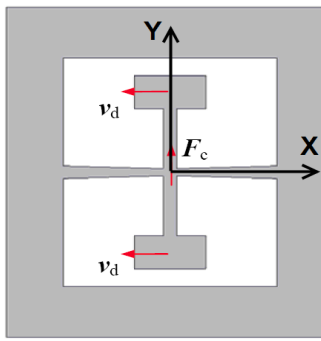


Рис. 1. Кварцевая модель

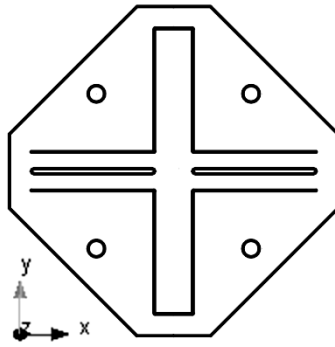


Рис. 2. Пьезокерамическая модель «крест»

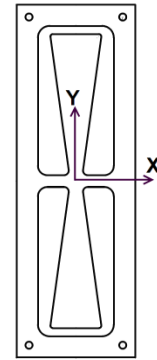


Рис. 3. Пьезокерамическая модель «бабочка»

Цель исследования заключается в определении собственных частот, соответствующих оптимальным формам колебаний в режимах возбуждения и отклика, и в оценке чувствительности для каждой модели гироскопа.

Моделирование производилось методом конечных элементов (МКЭ) в программе APM Structure 3D. При этом каждая из конструкций была рассчитана двумя различными способами. В первом случае модели создавались из конечных элементов (КЭ) в форме четырехузловых пластин, во втором – из восьмиузловых объемных элементов (солидов). Результаты расчетов по двум способам сравнивались. После создания модели и расчета на собственные колебания из спектра собственных частот выбирались те, которые отвечают рабочим формам колебаний.

#### Модель кварцевого планарного гироскопа

В работе [1] представлены результаты исследований конструкции кварцевого микромеханического гироскопа. В основе чувствительного элемента (ЧЭ) датчика лежит маятниковая структура, вырезанная из кварцевой пластинки (рис. 1) с нанесенными на ее поверхность электродами для возбуждения первичных и измерения вторичных колебаний.

При первичных колебаниях происходит изгиб приводной ветви в плоскости  $XU$  (рис. 4), а при вторичных колебаниях – перемещение приводной ветви с инерционной массой вдоль оси  $Y$  за счет действия сил инерции Кориолиса, вызывающих изгибные колебания измерительной ветви (рис. 5).

Найденные частоты возбуждения и отклика соответственно составляют:  $f_b = 13286$  Гц  $f_o = 13538$  Гц для модели, приведенной в [1], где также определен коэффициент преобразования, равный  $1,45$  мВ/°с.

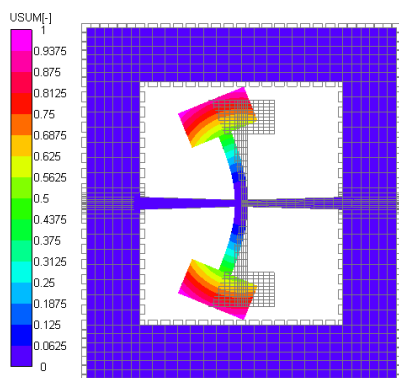


Рис. 4. Режим возбуждения

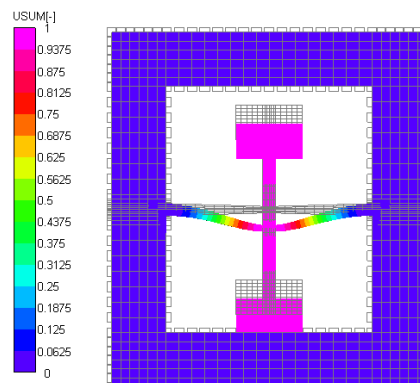


Рис. 5. Режим отклика

Нами разработана оптимизированная модель, имеющая более низкие частоты колебаний:  $f_b = 6624,3$  Гц и  $f_o = 6630,2$  Гц и более высокий коэффициент преобразования  $6,3$  мВ/°/с. Модель имеет размеры в плане  $23,6 \times 26,7$  мм, толщину  $0,5$  мм. Параметры материала (кварца) приняты следующими [4]: модуль Юнга  $E = 76500$  МПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,17$ ; плотность  $\rho = 2660$  кг/м<sup>3</sup>. Оценка чувствительности проведена по методике, изложенной в [2]

Потенциальным недостатком данной конструкции являются высокие требования к точности изготовления, поскольку даже при малых погрешностях возможно возникновение шумов и ложных сигналов, связанных с депланацией при колебаниях чувствительного элемента. Кроме того, кристаллический кварц имеет сравнительно низкие значения пьезомодулей.

Альтернативными конструкциями, исследованными в рамках данной работы, являются крестообразная модель и модель в форме «бабочки», выполненные из пьезокерамики.

#### Модель крестообразной конструкции

Модель выполнена из квадратной пьезопластины размерами  $52 \times 52$  мм. В пластине. С помощью нескольких прорезей в ней образован равноконечный крест, расположенный вдоль диагоналей. Одна из планок креста играет роль подвески, в которой выполнены прорези для разделения пьезоэлементов отклика. Перпендикулярная к ней планка играет роль инерционной массы. Характеристики пьезокерамики (ЦТБС) следующие:  $E = 74300$  МПа;  $\nu = 0,33$ ;  $\rho = 7460$  кг/м<sup>3</sup>. Внешний вид модели показан на рис. 2.

В режиме возбуждения происходят вращательные колебания планки вокруг оси подвески  $X$ . В режиме отклика планка креста перемещается вдоль оси  $Y$  под действием сил Кориолиса. В результате подвеска испытывает изгибные колебания. Характерные собственные формы показаны на рис. 6, 7.

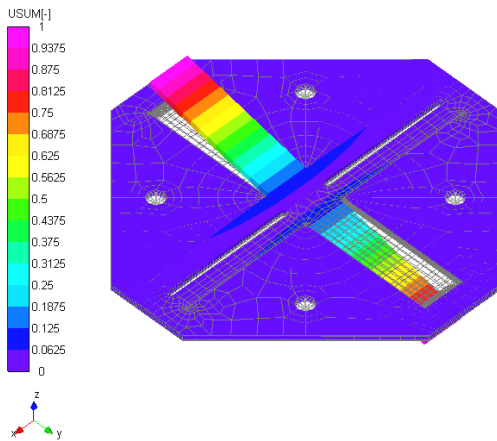


Рис. 6. Режим возбуждения

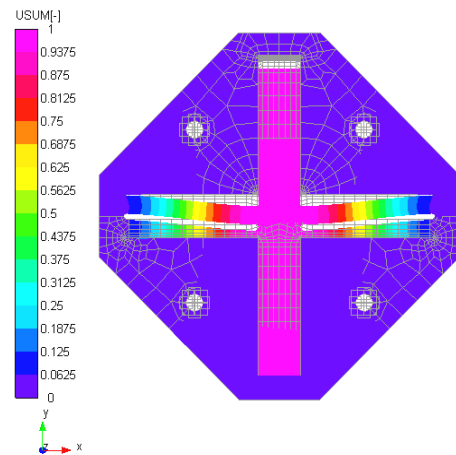


Рис. 7. Режим отклика

Графики зависимостей рабочих частот (возбуждения и отклика) от толщины модели  $h$  приведены на рис. 8. Зависимостям 1 и 2 соответствуют значения частот возбуждения и отклика для моделей, выполненных из четырехугольных пластин. Зависимостям 3 и 4 соответствуют частоты возбуждения и отклика для моделей, выполненных из объемных элементов.

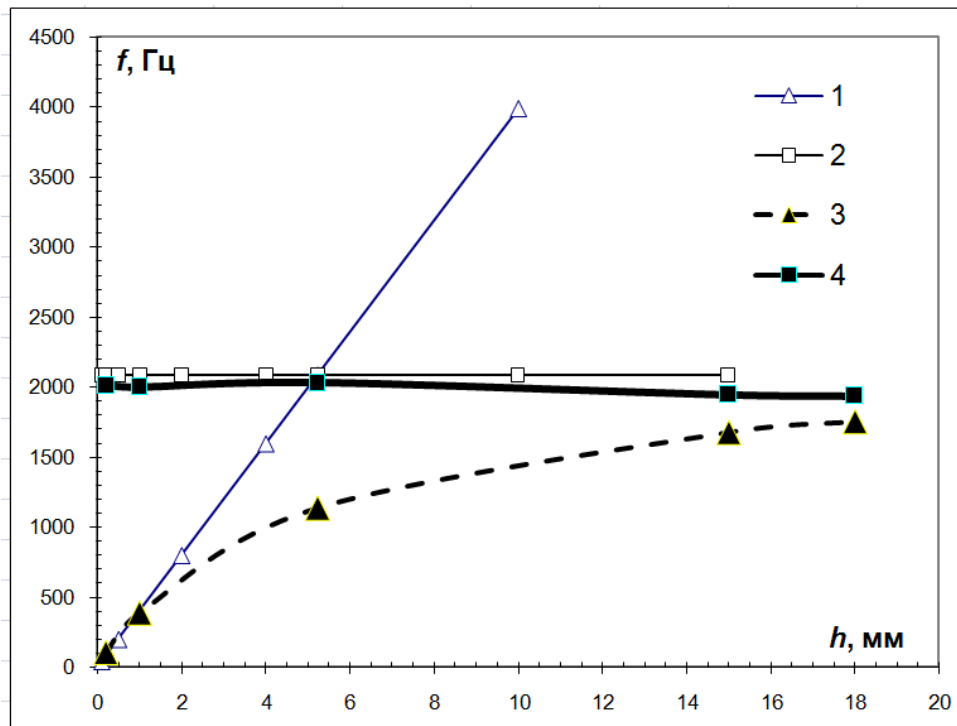


Рис. 8. Зависимости рабочих частот от толщины пластины-подложки крестообразной модели

Расчет, проведенный с использованием пластинчатых КЭ показал корректность только в пределах малых толщин – до 1 мм. При больших толщинах наблюдается значительное расхождение, поскольку график измене-

ния частот возбуждения для пластинчатых КЭ меняется по прямолинейной зависимости (кривая 1), а для солидов – по нелинейной (кривая 3).

Из приведенных на рис. 8 графиков 2 и 4 следует, что при изменении толщины частоты отклика практически не изменяются в обоих случаях.

Равенство частот возбуждения и отклика возможно при толщинах, превышающих 20 мм. Это свидетельствует о технологической сложности производства подобных резонаторов и о необходимости существенных изменений геометрических параметров исходной модели.

#### Модель в форме «бабочки»

Модель по рис. 3 отличается тем, что в режиме возбуждения и отклика чувствительный элемент клиновидной формы совершает вращательные колебания. В обоих случаях элемент перемещается как жесткое целое.

На рис. 9 представлены графики зависимостей рабочих частот от толщины подложки для модели (50x16,7 мм), рассчитанной с помощью МКЭ из плоских и объемных конечных элементов.

Как и для крестообразной конструкции, корректность расчета частот возбуждения и отклика плоскими элементами (графики 1 и 2) ограничена толщиной 1 мм. Поэтому в дальнейшем будем ориентироваться на результаты, полученные для модели, построенной из твердотельных элементов.

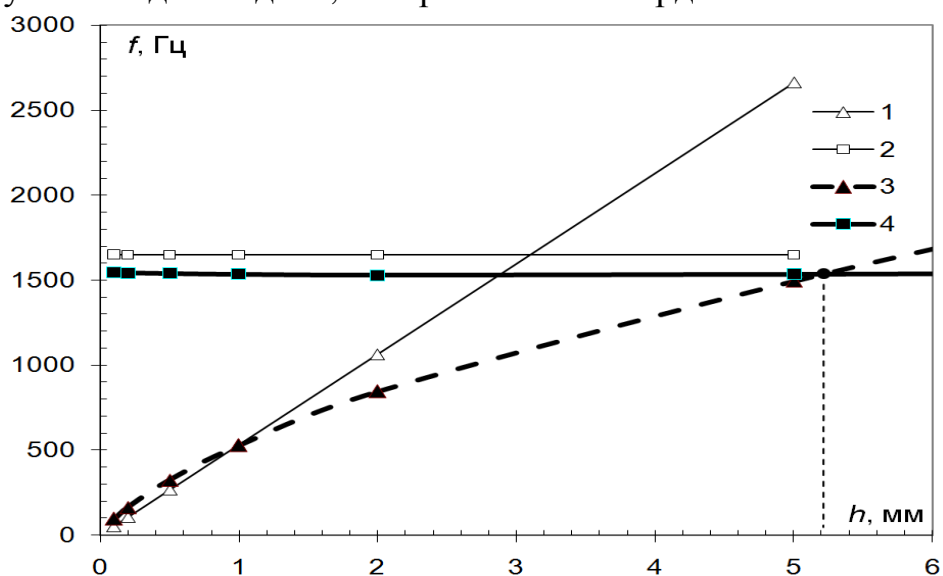


Рис. 9. Зависимости рабочих частот от толщины пластины-подложки модели в форме «бабочки»

Из зависимости 4 (рис. 9) следует, что частота отклика не изменяется при изменении толщины чувствительного элемента, в то время как частота возбуждения меняется по нелинейному закону (кривая 3). Равенство частот возбуждения и отклика происходит при толщине около 5,2 мм.

Поскольку конструкция обладает достаточной толщиной, то для возбуждения и измерения первичных колебаний соответствующие элементы возможно закрепить на боковой поверхности перемычек.

Коэффициент преобразования, согласно оценке, проведенной по методике [2], составляет для данной модели около 50 мВ/°/с.

#### Выводы

1. Определены рабочие частоты и формы колебаний, а также проведена оценка коэффициента преобразования для конструкции кварцевого гироскопа, аналогичного представленному в работе [1]. Разработана оптимизированная модель с более низкими рабочими частотами колебаний и повышенной чувствительностью.

2. Для моделей крестообразного гироскопа оценена возможность методом варьирования толщины добиться равенства частот возбуждения и отклика. Так для модели с постоянной шириной креста невозможно сравнить частоты возбуждения и отклика. Для модели в форме бабочки такая возможность имеется.

3. Определены границы использования в МКЭ плоских конечных элементов. Удовлетворительные результаты получаются только при малых толщинах ЧЭ. В остальных случаях рекомендовано использование твердотельных элементов.

4. Для каждой из трех моделей дана оценка коэффициента преобразования.

#### Список литературы:

1. Xie L., Wu X., Li S., Wang H., Su J., Dong P. A Z-axis Quartz Cross-fork Micromachined Gyroscope Based on Shear Stress Detection // *Sensors* 2010; 10(3), pp. 1573-1588.

2. Матвеев Е.В. Анализ двух перспективных моделей вибрационных гироскопов // Тез. докл. НТК студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ. – М.: МИЭМ, 2010. – С. 339-340.

3. Виноградов А.Н., Рентеев В.А. Моделирование резонаторов для вибрационных гироскопов. // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления “Датчик-00”. Сб. материалов XII НТК. – М.: МГИЭМ, 2000. – С. 35–36.

4. <http://www.almazoptics.com/Quartz.htm>