

УДК 531.7

**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ  
И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ДВУХКОМПОНЕНТНОГО  
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**Е.С. Барбин, П.Ф. Баранов, А.Н. Коледа, Т.Г. Нестеренко,  
М.В. Пересветов\*

Томский политехнический университет

E-mail: [ntg@tpu.ru](mailto:ntg@tpu.ru)

\*«ТомскГАЗПРОМгеофизика» –

Геофизическая сервисная компания, г. Томск

Рассмотрена методика создания компьютерной модели микро-механического гироскопа (ММГ). Проведен анализ конструкции и имитационное моделирование динамических характеристик разработанной конструкции гироскопа. Сделан вывод о свойствах конструкции и о влиянии внешних возмущений на ММГ.

**Ключевые слова:**

Микромеханический гироскоп, гребенчатый вибропривод, резонансная настройка, первичные колебания, вторичные информативные колебания.

Перспективы современного приборостроения связаны с разработкой приборов, обладающих малыми массой, габаритами, низкими себестоимостью и энергопотреблением, достаточно высокой надёжностью.

Наиболее динамично развивающимися микро-электромеханическими устройствами (МЭМС) в настоящее время являются акселерометры и гироскопы. В то же время микромеханические гироскопы (ММГ) являются наиболее сложными микроэлектромеханическими устройствами. МЭМС применяются как в промышленности, так и на транспортных средствах различного базирования (наземного, водного и воздушного). Расширяется круг задач, решаемых такими системами, возрастают требования к ним по расширению диапазона измерения, точности определения параметров, минимизации габаритов и энергопотребления.

Сфера применения миниатюрных микромеханических гироскопов чрезвычайно широка – от авионики и автомобильной электроники до цифровых фотоаппаратов. И в перспективе она будет только расти – в очень многих

задачах необходимо знать изменение пространственного положения объекта.

Микроэлектромеханические устройства представляют собой системы, в которых на поверхности или в объёме твёрдого тела интегрированы электрические и микромеханические структуры [1–3]. Задачи, возникающие при проектировании ММГ, требуют решения проблем механики, электроники, метрологии, технологии, материаловедения и погрешности гироскопа обусловлены рядом причин этих областей [4].

Проектирование микромеханических устройств требует выполнения нескольких итерационных циклов по изготовлению прототипов, что влечёт за собой большие финансовые затра-

**Барбин Евгений Сергеевич**, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: [ntg@tpu.ru](mailto:ntg@tpu.ru).

Область научных интересов: микромеханические системы.

**Баранов Павел Федорович**, аспирант кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: [ntg@tpu.ru](mailto:ntg@tpu.ru)

Область научных интересов: микромеханические системы.

**Коледа Алексей Николаевич**, аспирант кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: [ntg@tpu.ru](mailto:ntg@tpu.ru)

Область научных интересов: микромеханические системы.

**Нестеренко Тамара Георгиевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры точного приборостроения Института неразрушающего контроля ТПУ.

E-mail: [ntg@tpu.ru](mailto:ntg@tpu.ru)

Область научных интересов: микромеханические системы.

**Пересветов Михаил Владимирович**, инженер наклонно-направленного бурения, ООО «ТомскГАЗПРОМгеофизика» – Геофизическая сервисная компания, г. Томск.

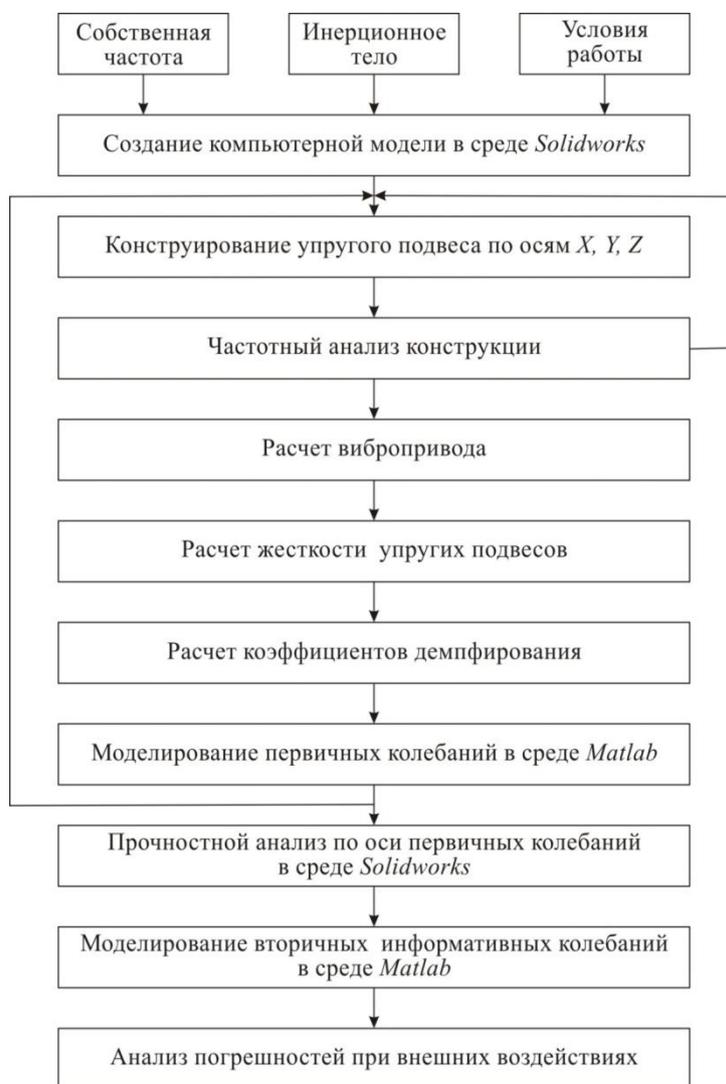
E-mail: [ntg@tpu.ru](mailto:ntg@tpu.ru)

Область научных интересов: микромеханические системы.

ты. Сокращение прототипирования до минимума и, как следствие, сокращение времени и стоимости разработки ММГ возможно при максимальном использовании компьютерного проектирования и моделирования, которому и посвящена данная статья.

Алгоритм расчёта динамической модели гироскопа представлен на рис. 1.

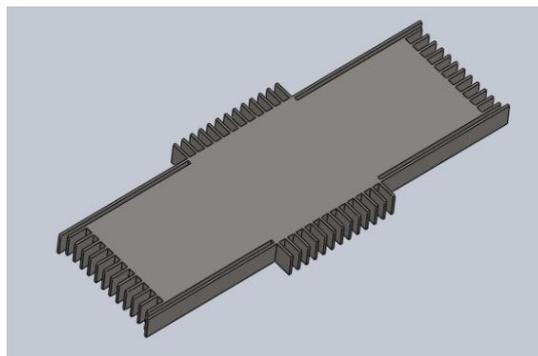
Первый этап состоит в создании компьютерной модели гироскопа в программной среде Solidworks. Выбирается резонансная частота и масса инерционного тела.



**Рис. 1.** Схема алгоритма расчёта динамической модели гироскопа

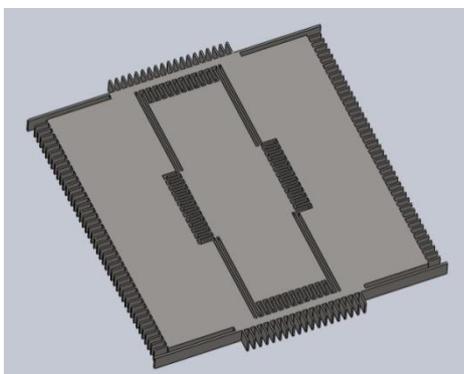
Исследуемый ММГ должен измерять две составляющие угловой скорости объекта, для этого создаются первичные поступательные гармонические колебания гироскопа вдоль оси, перпендикулярной измеряемым скоростям. В данной модели будет применяться два типа емкостных двигателей: гребенчатый и планарный, поэтому при проектировании необходимо максимально исключить все пустоты, чтобы получить большую полезную площадь планарного двигателя.

Чувствительным элементом для измерения угловой скорости вокруг одной из осей объекта является инерционное тело, которое представлено на рис. 2. Съём информации осуществляется при помощи емкостных гребенчатых датчиков перемещения.



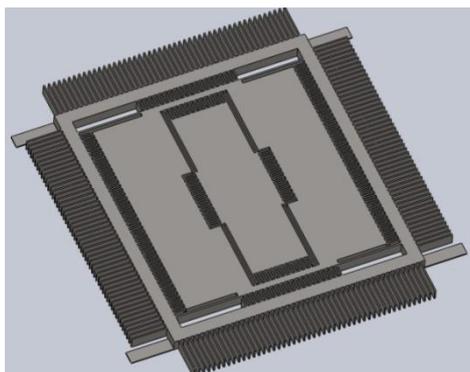
**Рис. 2.** Инерционное тело ММГ

Затем достраивается внутренняя рамка (рис. 3), которая является сенсором для получения данных об угловой скорости вокруг другой оси.



**Рис. 3.** Внутренняя рамка с массой

Достраивается наружная рамка с упругим подвесом, который обеспечивает первичные колебания гироскопа. На рис. 4 представлен чувствительный элемент микромеханического гироскопа без корпусных элементов.



**Рис. 4.** Чувствительный элемент гироскопа

Для наибольшей чувствительности гироскопа необходимо осуществить резонансную настройку, которая заключается в обеспечении равенства собственных частот гироскопа по осям  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ . Поэтому на каждом этапе конструирования проводится частотный анализ конструкции чувствительного элемента, чтобы определить характер деформации элементов гироскопа. Результаты частотного анализа представлены на рис. 5–7, из которых видно, что при частотах, близких к значению 5,5 кГц (при резонансной настройке), элементы гироскопа будут иметь перемещения только вдоль осей  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соответственно.

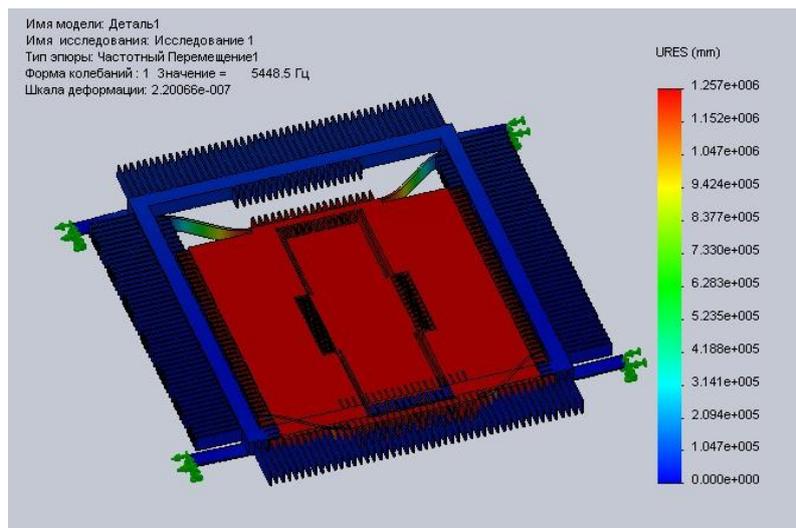


Рис. 5. Информативные колебания гироскопа вдоль оси Y

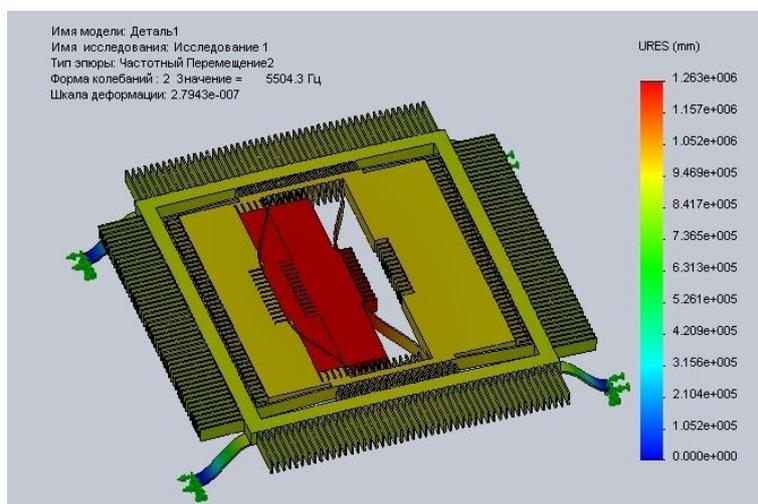


Рис. 6. Информативные колебания гироскопа вдоль оси X и первичные колебания вдоль оси Z

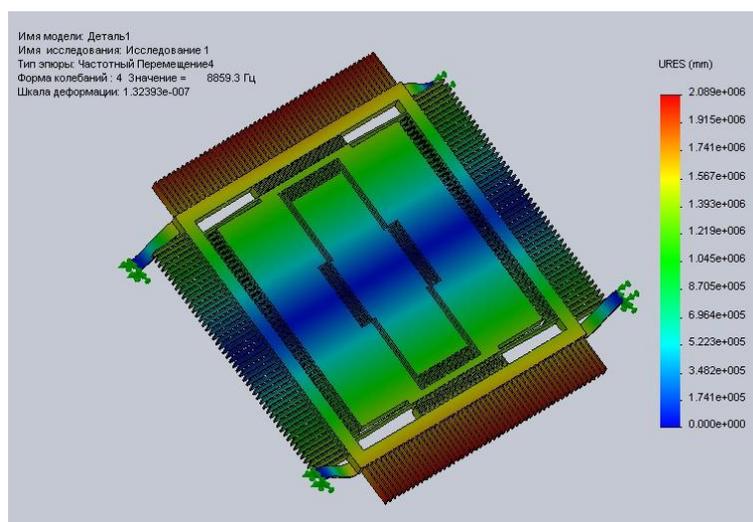


Рис. 7. Деформация конструкции при частоте 8,9 кГц

При частотах, больших собственной частоты гироскопа, возникают нежелательные деформации кручения (рис. 7). Шкала перемещения (рис. 5–7) не указывает величину перемеще-

ния, а даёт только возможность определить, как будет деформироваться тот или иной элемент конструкции. Это связано с тем, что в данном программном обеспечении не задаются граничные условия (такие как коэффициент демпфирования и среда). На данном этапе разработки подбираются только собственные частоты гироскопа и его массогабаритные характеристики.

Затем рассчитываются силы, создаваемые гребенчатым и планарным электростатическими виброприводами. Полезная площадь планарного привода (рис. 8) образована поверхностями инерционного тела, внутренней и внешней рамок.

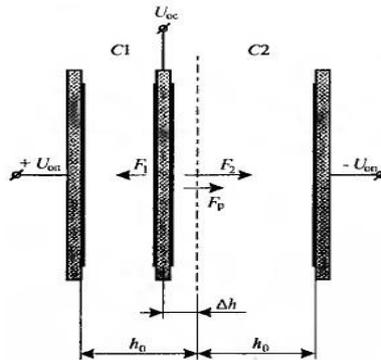


Рис. 8. Принцип работы планарного двигателя

Силы, создаваемые планарным виброприводом, определяются выражениями (1) и (2).

$$F_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S (U_{оп} - U_{oc})^2}{2(h_0 - \Delta h)^2}, \tag{1}$$

$$F_2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S (U_{оп} - U_{oc})^2}{2(h_0 + \Delta h)^2}, \tag{2}$$

где  $S$  – площадь электродов;  $U_{оп}$ ,  $U_{oc}$  – напряжения на электродах;  $h_0$ ,  $\Delta h$  – начальное расстояние между электродами и его изменение;  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая постоянная.

Гребенчатый привод (рис. 9) состоит из нескольких электродов, которые образуют гребёнку.

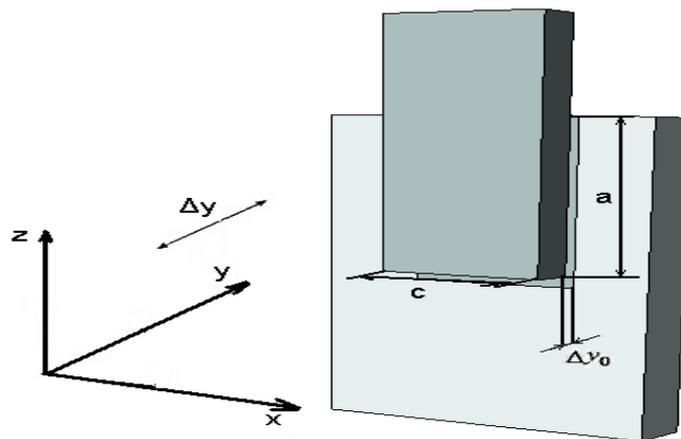


Рис. 9. Принцип работы гребенчатого двигателя

Силы, создаваемые гребенчатым приводом в направлении осей X, Y, Z при количестве  $n$  гребёнок, определяются как

$$F_x = 0;$$

$$F_y = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon n (a + \Delta z) U^2}{2(\Delta y_0 + \Delta y)^2};$$

$$F_y = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon n U^2}{2(\Delta y_0 + \Delta y)}.$$

Зная массогабаритные характеристики гироскопа, по формуле  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  собственной частоты ММГ рассчитываются жёсткости  $k_x, k_y, k_z$  подвесов вдоль осей X, Y и Z. Задаётся степень вакууммирования чувствительного элемента, рассчитываются коэффициенты демпфирования для этих условий и полученных габаритных размеров элементов гироскопа.

Следующим этапом имитационного моделирования является моделирование в среде Matlab первичных колебаний гироскопа, которые характеризуются уравнением

$$m_n \ddot{z} + \mu_z \dot{z} + zk_z = F_m \sin qt, \quad (3)$$

где  $m_n, \mu_z, k_z$  – масса, совершающая первичные колебания, коэффициент сил вязкого трения и жёсткость подвеса по оси первичных колебаний.

Строится компьютерная модель гироскопа на основании его математической модели (3) для полученных ранее (в Solidworks) массогабаритных характеристик и силовых характеристик вибропривода.

Запустив расчёт данной схемы, получаем график установившихся первичных колебаний гироскопа (рис. 10), амплитуда которых составляет 30 мкм, время переходного процесса 4 сек.

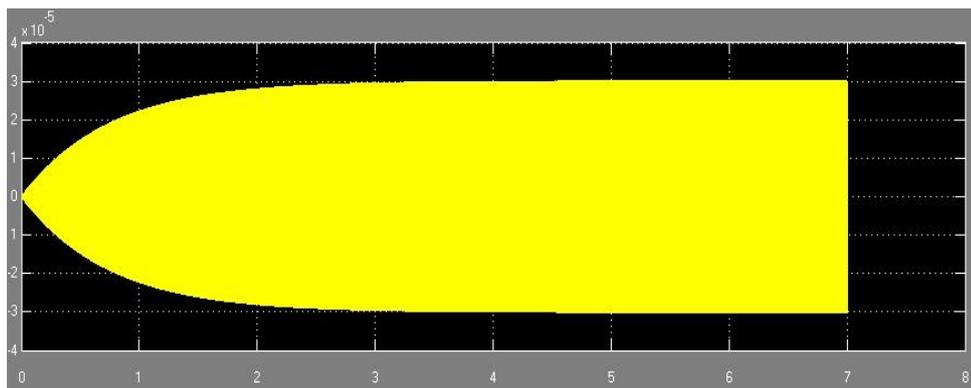


Рис. 10. Первичные колебания гироскопа

Для полученной амплитуды первичных колебаний необходимо проанализировать напряжения, возникающие в упругих элементах при колебаниях гироскопа с такой амплитудой. Для этого конструкция гироскопа в среде Solidworks нагружается такой силой, чтобы деформация упругих элементов под её действием была равна амплитуде первичных колебаний. Сила нагружения гироскопа вдоль оси Z (рис. 11, 12) показана в виде вертикальных стрелок (коричневый и сиреневый цвет).

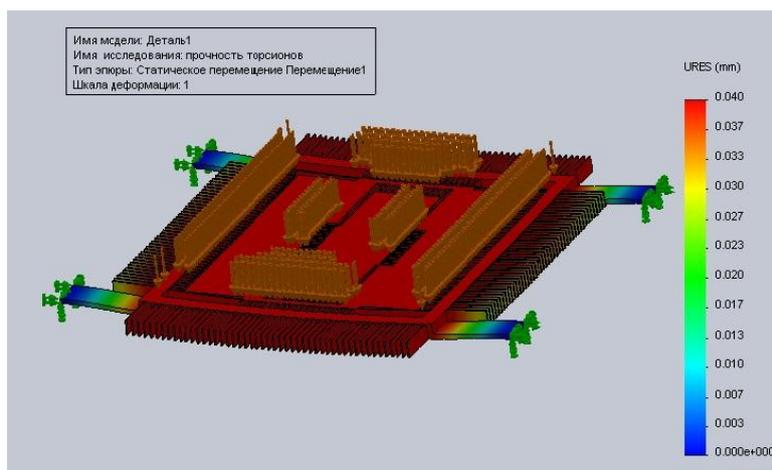


Рис. 11. Статическое перемещение вибрирующей системы

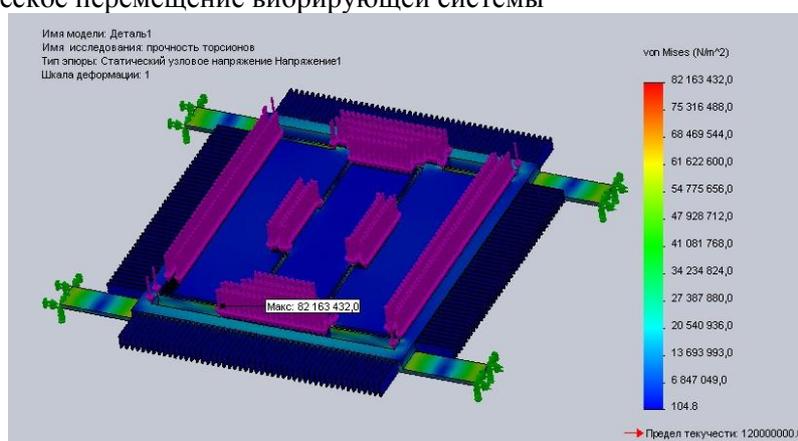


Рис. 12. Напряжения при деформации упругого подвеса

Заключение о вероятной статической прочности конструкции получено из анализа:

- перемещений, который показывает правильность приложения нагрузок (рис. 11);
- напряжений в конструкции (рис. 12).

Полученные величины напряжений сравниваются с допустимым напряжением для выбранного материала конструкции. При заданной амплитуде первичных колебаний возникающие в упругих элементах подвеса напряжения меньше допустимых. Следующий этап имитационного моделирования состоит в моделировании вторичных информативных колебаний гироскопа, которые характеризуются уравнениями

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y} + \mu_y \dot{y} + k_y y &= 2m_1 \dot{z} \Omega_x + m_1 a_1, \\
 (m_1 + m_2) \ddot{x} + \mu_x \dot{x} + k_x x &= -2(m_1 + m_2) \dot{z} \Omega_y + (m_1 + m_2) a_x.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

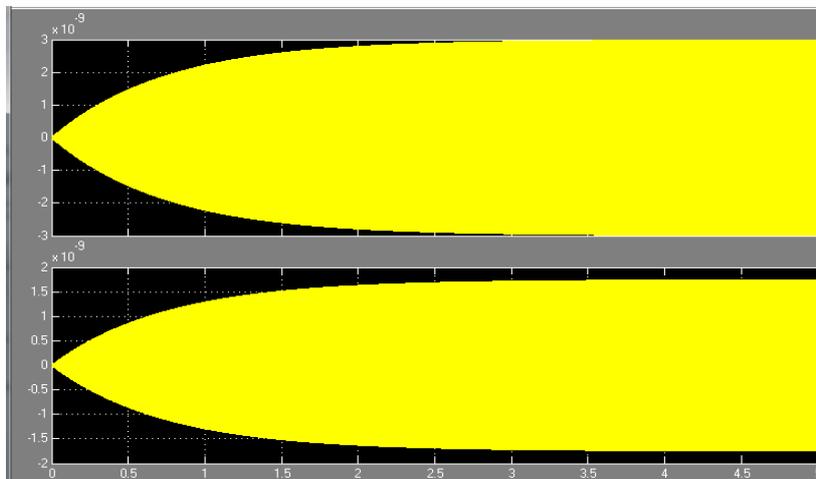
Ускорения изменяются по закону

$$\begin{aligned}
 a_y &= a_{ym} \sin vt + a_{y0}, \\
 a_x &= a_{xm} \sin vt + a_{x0}, \\
 a_{zm} \sin vt + a_{z0},
 \end{aligned}$$

где  $a_{xm} \sin vt, a_{ym} \sin vt, a_{zm} \sin vt$  – ускорения поступательной вибрации основания, причём частота  $v$  вибрации меньше частоты первичных и вторичных колебаний гироскопа;  $a_{x0}, a_{y0}, a_{z0}$  – медленно меняющиеся ускорения (для установившегося процесса считаем их постоянными);  $\Omega_x, \Omega_y$  – измеряемые угловые скорости.

Результаты моделирования вторичных информативных колебаний гироскопа при отсутствии ускорения представлены на рис. 13, откуда видно, что информативные колебания ги-

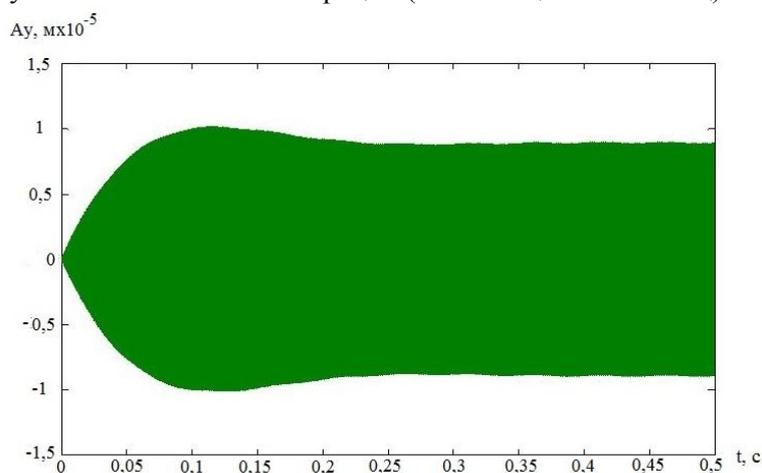
роскопа происходят с частотой, равной частоте первичных колебаний. Амплитуды этих колебаний пропорциональны измеряемым скоростям  $\Omega_x$  и  $\Omega_y$  поворота основания.



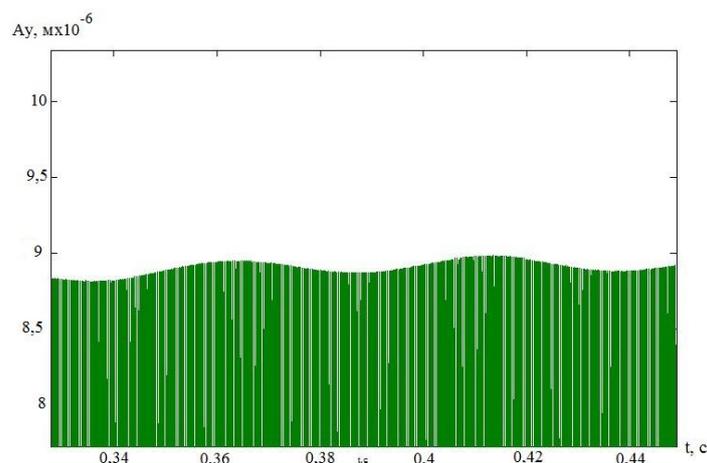
**Рис. 13.** Вторичные информативные колебания гироскопа

Управление виброприводом, который создаёт первичные гармонические колебания  $z(t) = z_m \sin \omega t$  гироскопа, осуществляется системой управления и стабилизации, что обеспечивает стабильность амплитуды  $z_m$  этих колебаний, поэтому в уравнении первичных колебаний не учитываются слагаемые, зависящие от поступательной вибрации.

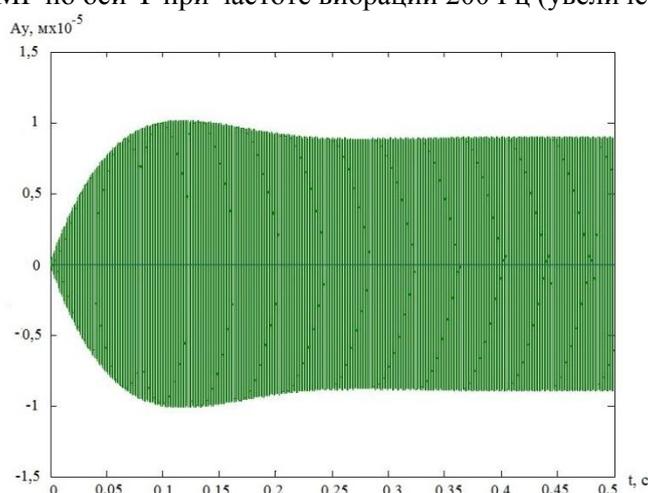
Частота поступательной вибрации изменяется в пределах от 20 до 2000 Гц, амплитуда виброускорения не более 5 g. На рис. 14–17 представлены информативные колебания гироскопа по оси Y для двух значений частоты вибрации ( $f = 200$  Гц и  $f = 2000$  Гц).



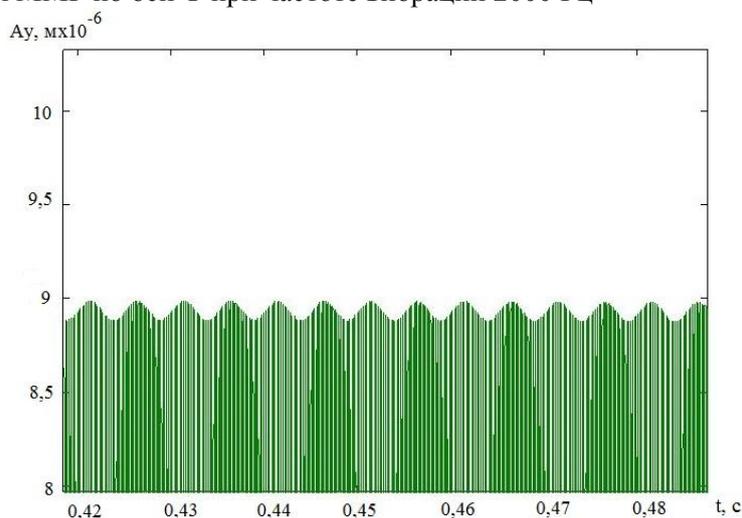
**Рис. 14.** Колебания ММГ по оси Y при частоте вибрации 200 Гц



**Рис. 15.** Колебания ММГ по оси Y при частоте вибрации 200 Гц (увеличенный фрагмент)



**Рис. 16.** Колебания ММГ по оси Y при частоте вибрации 2000 Гц



**Рис. 17.** Колебания ММГ по оси Y при частоте вибрации 2000 Гц (увеличенный фрагмент)

Из рисунков видно, что вторичные информативные колебания происходят с частотой первичных колебаний. На эти колебания накладываются колебания с частотой вибрации. Амплитуда этих возмущённых колебаний составляет не более 1 % от информативных колебаний.

Частота информативных колебаний гироскопа при конструировании выбирается за пределами частотного диапазона поступательной вибрации, следовательно, для уменьшения погрешностей имеется возможность фильтрации возмущённых колебаний.

Таким образом, представленная методика позволяет разработать конструкцию микро-механического гироскопа в соответствии с его динамическими характеристиками и провести анализ его работы на системном уровне.

*Работа выполнена в Томском политехническом университете при финансовой поддержке гранта № 14.В37.21.1951 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боронихин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В. Оптические и микромеханические инерциальные приборы. – СПб.: Техномедиа, Элмор, 2007. – 399 с.
2. Тузов А. Датчики для измерения параметров движения на основе MEMS-технологии // Электроника. Наука. Технология. Бизнес. – 2011. – № 1. – С. 45–53.
3. Сысоева С. Ключевые сегменты рынка МЭМС-компонентов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 5. – С. 35–42.
4. Нестеренко Т.Г., Пересветов М.В. Влияние типовых дефектов на динамические характеристики микромеханического гироскопа LL-типа // Авиакосмическое приборостроение. – 2012. – № 4. – С. 3–10.

Поступила 04.02.2013 г.