

УДК 531.383-11:531.714.7

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСПОЛОЖЕНИЯ УПОРОВ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

Д.П. Елисеев, Д.В. Розенцвейн

Разработана методика оптимизации расположения упоров, ограничивающих перемещения в микромеханическом гироскопе. Предложены критерии оптимизации, сформулирован перечень варьируемых параметров для системы упоров. Выполнены расчеты для моделей микромеханических гироскопов с различными упругими подвесами методом конечно-элементного анализа, подтвердившие возможность использования разработанной методики для оптимизации числа и расположения упоров.

**Ключевые слова:** микромеханический гироскоп, упругий подвес, динамическая нагрузка.

### Введение

В конструкциях микромеханических гироскопов (ММГ) для исключения замыкания электродов электростатических датчиков и уменьшения напряжений при расширенном динамическом диапазоне используют ограничители перемещения – упоры.

В настоящей работе рассматривается микромеханический гироскоп RR-типа, разработанный в ЦНИИ «Электроприбор» [1]. Его конструкция представляет собой инерционное тело (ИТ) в виде диска, закрепленного на основании посредством упругих элементов (рис. 1). ИТ в автоколебательном режиме совершает первичные угловые колебания в плоскости диска вокруг оси X, возбуждаемые гребенчатым электростатическим двигателем. При наличии угловой скорости основания  $\Omega$  возникают вторичные угловые колебания вокруг оси Y с выходом из плоскости ИТ, амплитуда которых является мерой угловой скорости [2]. Эти колебания измеряются емкостными датчиками системы съема, расположенной под ИТ.

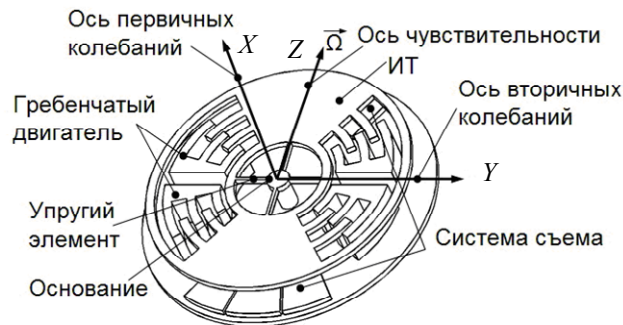


Рис. 1. Конструктивная схема ММГ

Расположение упоров в действующей конструкции осуществлено методом подбора. Их введением достигнуты показатели ударопрочности конструкции  $10^5 g$  при наличии трех пар упоров [3]. Чтобы имеющимися средствами достичь максимальных динамических диапазонов для ММГ, необходимо провести оптимизацию расположения упоров. Целью работы является разработка методики оптимального расположения ограничителей перемещения ИТ ММГ. Ниже приводятся критерии, методика и численные расчеты оптимизации расположения упоров в ММГ RR-типа с подвесами трех типов (рис. 2) при нагружении перпендикулярно плоскости диска. Предложенные расчеты справедливы и для других типов ММГ.

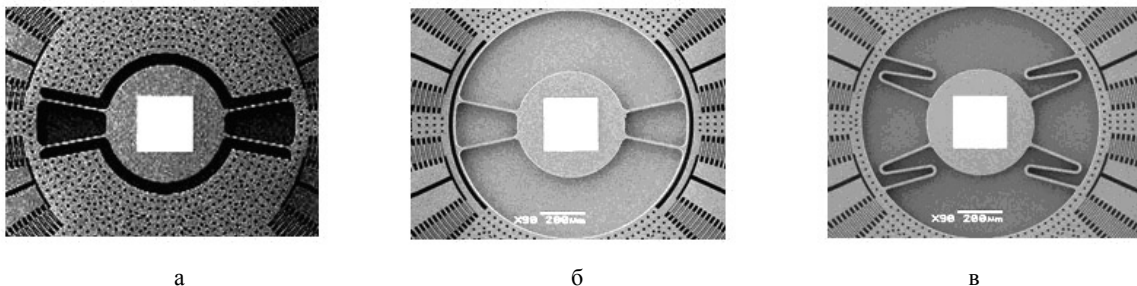


Рис. 2. Схемы упругих подвесов ММГ (центральная часть датчика): типа А (а); типа Б (б); типа В (в)

### Критерии оптимизации ограничителей перемещения

Для определения оптимального расположения упоров использовались следующие критерии, определяющие качество ММГ:

- минимизация напряжений, возникающих во всей зоне упругого подвеса при воздействии динамической нагрузки;
- минимизация количества упоров для повышения технологичности изделия.

Наличие упоров не должно мешать свободному перемещению ИТ ММГ по оси вторичных колебаний (рис. 1) в том диапазоне измерений, для которого он рассчитан, поэтому высота упоров оговаривается из условия расстояния между ИТ и обкладкой электростатического датчика на основании. Необходимо проводить расчеты как для нулевого положения ИТ, так и для рабочего положения. В настоящей работе рабочее положение характеризуется поворотом ИТ относительно оси первичных колебаний на  $1^\circ$  (максимальная амплитуда колебания), вследствие чего возникают дополнительные напряжения в упругом подвесе.

На основании изложенных критериев определяются параметры оптимизации системы упоров в ММГ, для которых проводится оптимизация (рис. 3):

- количество упоров;
- угол расположения упоров относительно оси OZ;
- диаметр установки упоров относительно центра ММГ.

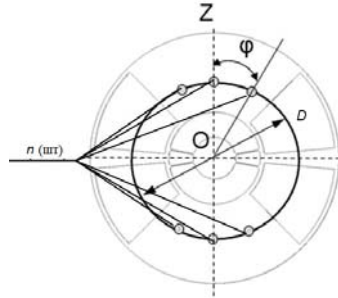


Рис. 3. Параметры оптимизации:  $\varphi$  – угол между осью OZ и упором;  $D$  – диаметр расположения упоров;  $n$  – количество упоров

#### Методика оптимизации ограничителей перемещения и результаты расчета с различными упругими подвесами

Разработанная методика оптимизации параметров расположения упоров в ММГ представляет собой последовательность расчетов и анализа полученных результатов. Расчеты проводились в приложении Pro/MECHANICA программного пакета Pro/ENGINEER. Начальные условия по задаваемым нагрузкам получены из анализа расчетных данных для критичных напряжений в моделях ММГ с предложенными упругими подвесами без упоров и с учетом поворота ИТ относительно оси первичных колебаний на угол  $1^\circ$  (рис. 4). Затем в конструкцию вводятся два упора (по одному упору под каждую обкладку электростатического датчика). Далее расчет ведется согласно алгоритму, представленному на рис. 5.

На каждом этапе расчета проводится анализ зависимостей напряжений  $\sigma$ , возникающих в конструкции, от исследуемого параметра. Окончательный выбор параметра производится по критерию наименьшего напряжения, и дальнейший расчет проводится с учетом изменения параметров. При этом за допустимый уровень напряжений в поликристаллическом кремнии принято значение  $\sigma_{\text{доп.}} = 500 \text{ МПа}$ . После этого осуществляется расчет возникающих напряжений от действующей нагрузки для рассчитанных параметров. Методика предусматривает многопроходный анализ, с учетом изменения количества упоров. Результаты для каждого прохода фиксируются и анализируются для максимальных нагрузок при заданном количестве упоров. На рис. 6 представлены графики изменения напряжений от задаваемой нагрузки в конструкциях ММГ с тремя различными подвесами, с варьируемым числом упоров.

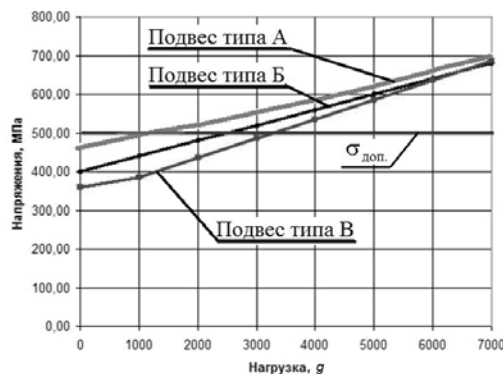


Рис. 4. Зависимость напряжений в упругом подвесе ММГ от действующей нагрузки без наличия упоров;  $\sigma_{\text{доп.}}$  – допустимые напряжения для кремния

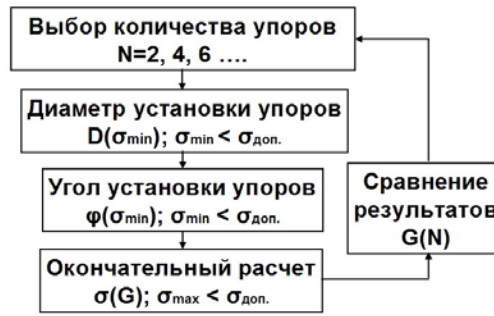


Рис. 5. Методика оптимизации упоров в ММГ

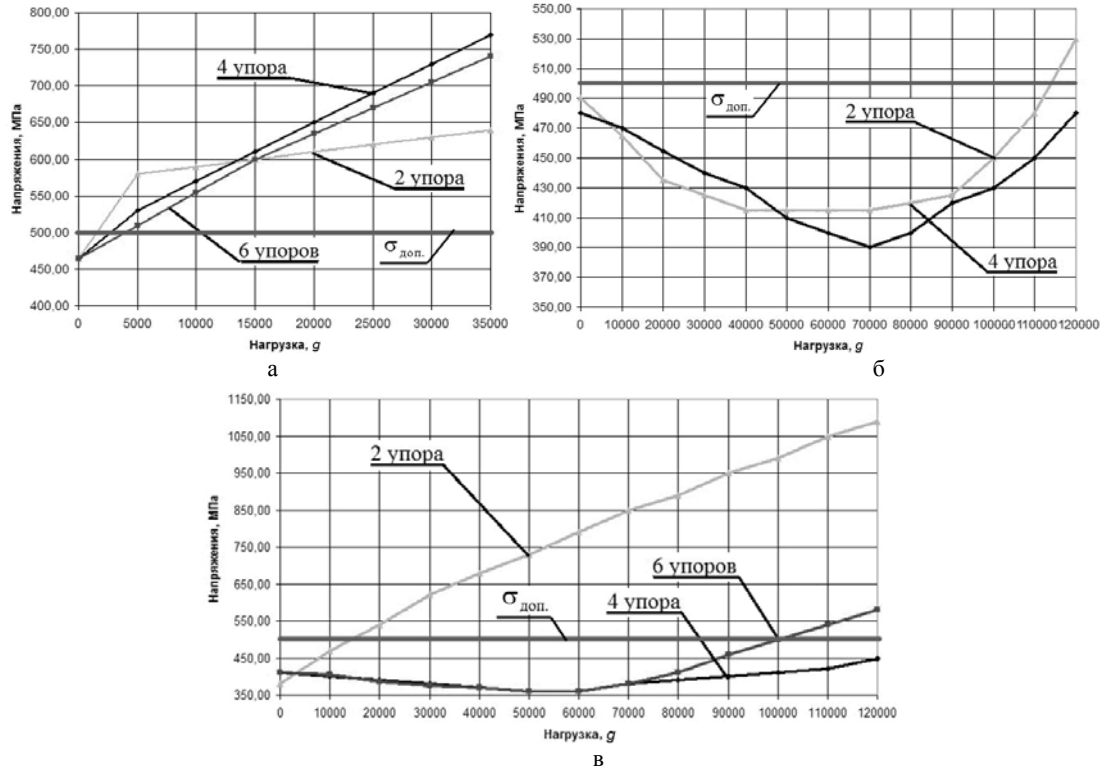


Рис. 6. Изменение напряжений от нагрузки для ММГ: с подвесом типа А и наличием 2, 4 или 6 упоров (а); б) с подвесом типа Б и наличием 2-х или 4-х упоров (б); с подвесом типа В и наличием 2, 4 или 6 упоров (в);  $\sigma_{\text{доп.}}$  – допустимые напряжения для кремния

По графикам видно, что подвес типа А (рис. 2) наиболее чувствителен к нагрузкам, перпендикулярным плоскости диска. Применение упоров для данной конструкции не дает значительного увеличения ударопрочности из-за высокой жесткости подвеса.

Для подвеса типа Б (рис. 2) применение двух упоров уже дает значительный прирост ударостойкости – ММГ способен выдержать удары до  $10^5$  g.

По результатам оптимизации подвес типа В (рис. 2) можно признать компромиссным решением по жесткости. Он достаточно мягкий, чтобы при использовании упоров ММГ выдерживал удары до  $10^5$  g, и при этом относительно жесткий и имеет высокую добротность [4].

Падение напряжений в конструкции при росте нагрузки объясняется тем, что сила, действующая перпендикулярно плоскости диска, разгружает подвес ММГ от напряжений, вызванных рабочим режимом – поворотом ИТ на  $1^\circ$ . На рис. 7 представлены напряжения в подвеса типа Б (рис. 2) при использовании двух упоров. По этим данным можно судить о характере излома и изгиба торсионов. При меньшей нагрузке ротор гироскопа проседает, «садится» на упоры и тянет за собой торсионы, изгибая их вниз, в сторону установки упоров. Напряжения, созданные таким образом, «разгружают» подвес ротора от напряжений, создаваемых при рабочем режиме гироскопа – повороте ротора на угол  $1^\circ$ . При увеличении нагрузки перемещение ротора увеличивается, при этом он не просто «садится» на упоры, а выгибается на них, что приводит к выгибанию и торсионов, т.е. они деформируются в сторону, противоположную установке упоров.

Стоит отметить, что при отсутствии рабочей деформации подвеса зависимость напряжений от внешней нагрузки становится линейной.

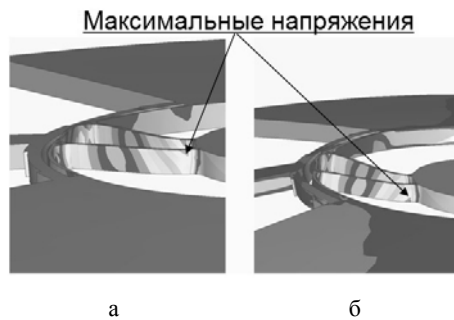


Рис. 7. Напряжения в подвесе ММГ типа Б: при нагрузке 25000 g (а); при нагрузке 90000 g (б)

### **Заключение**

Предложена методика оптимизации расположения упоров по критерию минимизации напряжения в упругом подвесе микромеханического гироскопа и области контактных взаимодействий инерционного тела с упорами. Для гироскопа RR-типа упоры располагаются радиально под обкладками электростатических датчиков вторичных колебаний. Оптимизация в таком случае представляет собой автоматизированный подбор параметров топологии упоров: количество, диаметр расположения упоров и угол между ними. При оптимизации получены параметры, снижающие напряжения в упругом подвесе при нагрузках, перпендикулярных плоскости диска микромеханического гироскопа, и позволяющие повысить ударопрочность до  $10^5$  g при использовании одной пары упоров.

На основе разработанной методики возможно создание программы автоматического определения оптимального расположения упоров в конструкции микромеханического гироскопа, которая дополнит используемые компьютерные средства проектирования микромеханических гироскопов [5].

Авторы выражают благодарность научному руководителю М.И. Евстифееву за помощь в подготовке статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №10-08-00153а.

### **Литература**

1. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
2. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
3. Евстифеев М.И., Розенцвейн Д.В. Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 4 (68). – С. 46–50.
4. Евстифеев М.И. Результаты экспериментального исследования влияния линейных перегрузок на характеристики ММГ RR-типа // Гироскопия и навигация. – 2010. – № 2. – С. 100.
5. Евстифеев М.И. Анализ компьютерных средств проектирования микромеханических гироскопов с позиций мехатроники // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 2. – С. 31–36.

*Елисеев Даниил Павлович* – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор, eliseev.dp@gmail.com  
*Розенцвейн Дмитрий Владимирович* – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», научный сотрудник, Rosenzwein@mail.ru