

УДК 531.383-11:531.714.7

**АНАЛИЗ КОНТАКТНЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ГИРОСКОПАХ**

М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн

Рассмотрены вопросы использования микромеханических гироскопов на высокодинамичных объектах при значительных инерционных ударных нагрузках. Показано, что такие удары приводят к контактным взаимодействиям элементов конструкции. Приведены оценки деформаций и прочности упругого подвеса как наиболее ответственного узла прибора при контакте инерционного тела с ограничительными упорами. Определена конфигурация расположения упоров из условий прочности подвеса.

Ключевые слова: микромеханический гироскоп, упругий подвес, удар, контакт, упор.

Введение

Микромеханические гироскопы (ММГ) используются в различных областях навигации и управления движением. Известно о намерениях использовать микромеханические датчики в системах автоматического управления движением высокодинамичных объектов, таких как ракетное и артиллерийское вооружение. Условия эксплуатации подобных систем предполагают наличие интенсивных ударов с уровнями свыше $(2-10) \cdot 10^4 g$ [1,2]. Для использования ММГ на подвижных объектах со сверхвысокими инерционными нагрузками требуется анализ прочности конструкции прибора, что представляется весьма актуальной задачей. Приведенные ниже оценки прочности справедливы для различных типов микромеханических гироскопов, имеющих упругий подвес и гребенчатый электростатический двигатель [3].

Оценка прочности подвеса при ударных воздействиях

В качестве объекта исследования выбран ММГ RR-типа разработки ЦНИИ «Электроприбор» [4], чувствительный элемент которого содержит инерционное тело (ИТ) в виде диска, закрепленного на упругом подвесе (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 Ω возникают вторичные угловые колебания вокруг оси Y, амплитуда которых является мерой угловой скорости. Эти колебания измеряются емкостными датчиками системы съема, расположенной под ИТ.

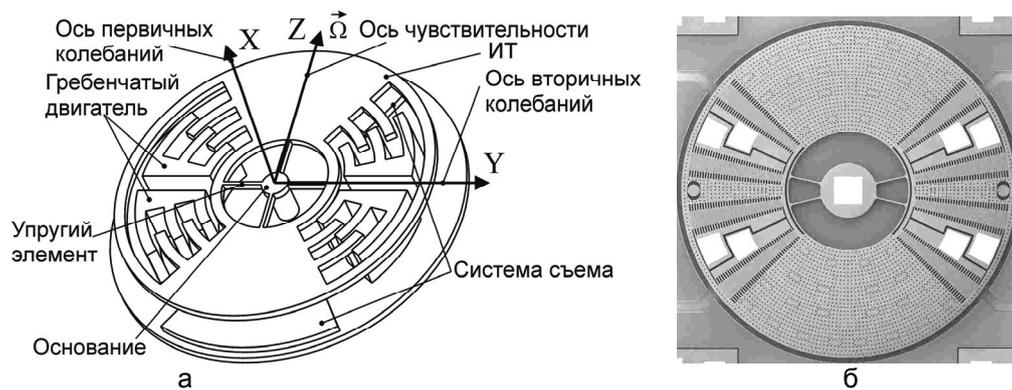


Рис. 1. Конструктивная схема (а) и SEM-фотография (б) ММГ

Касание упруго подвешенного ИТ и неподвижных частей конструкции, приводящее к временному отказу, не допускается в случае требований ударостойкости и обеспечения непрерывной работы ММГ на протяжении всего времени измерения. В случае требований ударопрочности требуется сохранение характеристик прибора после окончания ударного воздействия [5, 6]. Ударное импульсное воздействие на основание ММГ задается законом изменения ускорения $W(t)$, который для объектов различных классов оценивается по экспериментальным данным. Для оценочных расчетов ударопрочности и ударостойкости ММГ может быть достаточным знание только максимального значения ускорения W_{\max} и длительности импульса τ .

Свойства системы «ИТ – упругий подвес» определяются ее собственными частотами. При этом критерием характера относительного движения ИТ при ударе и после него является произведение $\omega_0\tau$, где ω_0 – собственная частота системы (для системы с несколькими собственными частотами обычно это низшая частота поступательных колебаний в направлении действия удара). При $\omega_0\tau < 1$ удар является коротким, форма импульса ускорения не существенна, относительное перемещение достигает максимума после окончания импульса и имеет порядок $u = W_{\max}\tau\omega_0^{-1}$. При $\omega_0\tau > 1$ удар является длинным, перемещение при действии ускорения в первом приближении можно считать квазистатическим, $u = W_{\max}\omega_0^{-2}$.

Для ММГ значения собственных частот обычно превышают 3 кГц, а длительность импульса не менее 0,5 мс. Таким образом, значение $\omega_0\tau = 2\pi \cdot 3000 \cdot 0,0005 > 1$, и при анализе ударных воздействий допустимо использование квазистатического анализа. Перемещение ИТ при ударе с амплитудой $2 \cdot 10^4 g$ будет составлять $u \approx (2 \cdot 10^5) \cdot (2\pi \cdot 3000)^{-2} = 5,6 \cdot 10^{-4} \text{ м} = 563 \text{ мкм}$, что превосходит значение зазоров в конструкции чувствительного элемента. Очевидно, что при таких высоких инерционных нагрузках в ММГ будут происходить контактные взаимодействия между элементами прибора, что и является предметом настоящего исследования. Особое внимание уделяется анализу прочности упругого подвеса ИТ как наиболее напряженного элемента конструкции.

Анализ контактных взаимодействий производился методом конечно-элементного анализа (КЭА) в следующей последовательности: определение направлений возможных перемещений ИТ; определение жесткости системы «ИТ – упругий подвес» в заданном направлении; определение перемещений ИТ до возникновения контакта и допустимых инерционных воздействий; формулирование ограничений перемещений подвижных элементов; разработка средств ограничения перемещений и возникающих критических напряжений.

Контактные взаимодействия при нагрузках в плоскости инерционного тела

При нагрузках в плоскости ИТ основные контактные взаимодействия происходят в зоне зубцов гребенчатого электростатического двигателя. Жесткость ИТ в этом направлении чрезвычайно высока, и перемещение ИТ под нагрузкой в основном определяется жесткостью упругого подвеса. При нагрузках в плоскости ИТ вследствие конечной жесткости упругого подвеса происходит перемещение ИТ до касания локальных элементов конструкции, таких как длинные тонкие зубья гребенчатых электростатических двигателей ИТ и статора ММГ (рис. 2). Вследствие малого значения центрального угла зоны зубьев (количество зубьев порядка 100) каждый из них можно приближенно рассматривать как прямолинейный консольный стержень с заделкой с одной стороны. Перемещения и напряжения изгиба будут максимальными для наиболее длинного зуба, когда указанные силы перпендикулярны продольной оси зуба и создают моменты изгиба вокруг оси наименьшего момента инерции. Характер контакта зависит от направления перемещения и осуществляется на гладких участках, в точке контакта касательные совпадают. Точечный характер контакта является следствием того, что радиусы кривизны зубьев различны.

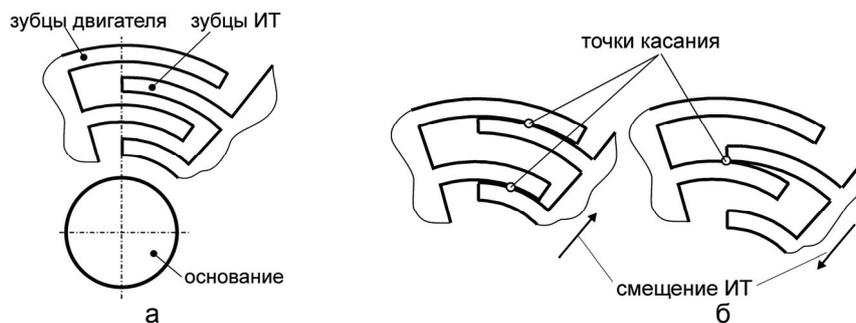


Рис. 2. Номинальное (а) и смещенное (б) положение ИТ

В общем случае произвольного направления ускорения основания W картина контактных взаимодействий получается более сложной. Если иметь в виду, что номинальные зазоры для всех пар зубьев одинаковы, то очевидно, что во всех случаях контакт одного и того же вида должен был бы происходить одновременно по всем парам зубьев. Однако учет неровностей поверхностей зубьев и неравномерность зазоров приводят к кардинальному изменению выводов. Во-первых, местоположение точек контакта по длине зуба становится случайным. Во-вторых, первый контакт происходит только в одной паре зубьев, и лишь при увеличении силы контакты будут возникать в других парах, если до этого не произойдет разрушение одного из контактирующих зубьев.

Специфические задачи расчета прочности возникают в условиях контакта подвижных элементов с неподвижными. Контакт сам по себе опасен, так как может вызвать поломку зубьев или элементов конструкции, но если этого не произошло, происходит разгрузка упругих элементов подвеса ИТ. На рис. 3 показаны результаты расчета напряжений в зубьях двигателя при их контакте, полученные методом КЭА. Верхняя кривая показывает взаимодействие одной пары зубьев, нижняя – трех пар зубьев в случае неравномерного зазора.

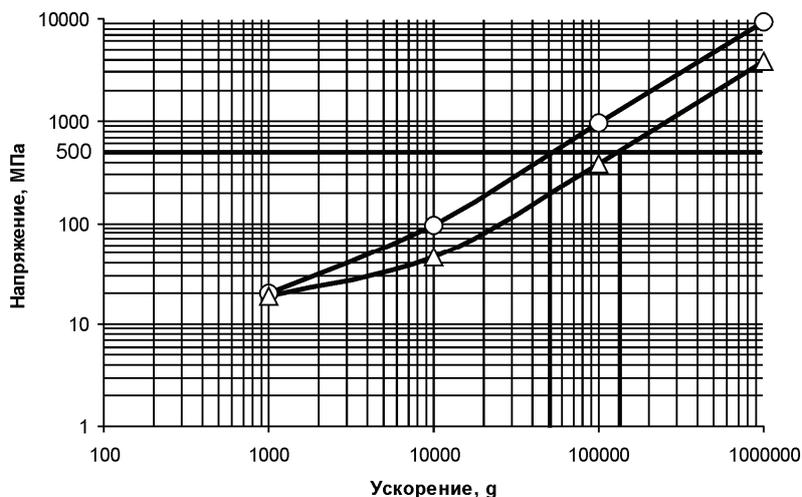


Рис. 3. Контактные взаимодействия зубьев двигателя

В качестве критерия оценки прочности конструкции использовано допустимое нормальное напряжение для кремния, равное $\sigma_{\text{доп}} = 500$ МПа [7]. В случае контакта одной пары зубьев допустимое ускорение удара составляет $5 \cdot 10^4 g$, при контакте трех пар зубьев – более $10^5 g$.

Контактные взаимодействия при нагрузках в направлении, перпендикулярном плоскости инерционного тела

На последовательных этапах разработки для разных модификаций конструкций подвеса разработчиками предлагались и реализовывались средства ограничения упругих перемещений ИТ, которые решают задачи снижения механических напряжений и отсутствия электрических контактов между электродами. Ряд вариантов средств ограничения перемещений был предложен и запатентован за рубежом, но, насколько известно, расположение упоров назначалось без обоснования, а серьезные анализ и расчеты эффективности не проводились.

Известны следующие ограничители-упоры перемещений: на основании (рис. 4, а) [4]; изгиба упругих элементов (рис. 4, б) [8]; амплитуды первичных колебаний (рис. 4, в) [9]. Ограничители-упоры первых двух групп, как правило, ограничивают как угловые, так и линейные перемещения ИТ, чтобы при больших перегрузках не происходило замыканий электрических контактов. Они могут быть выполнены в виде коротких штырей на статоре, входящих с гарантированными зазорами порядка несколько микрометров в прорези ИТ (рис. 4, а), а могут быть расположены вне ИТ (рис. 4, в). Такие упоры практически не ограничивают перемещения по оси X, но в режиме первичных угловых колебаний при сложении перемещений при этих колебаниях и поступательных перемещений при действии линейных ускорений вступают в силу ограничения, обусловленные возможностью соударений упоров с границами прорезей.

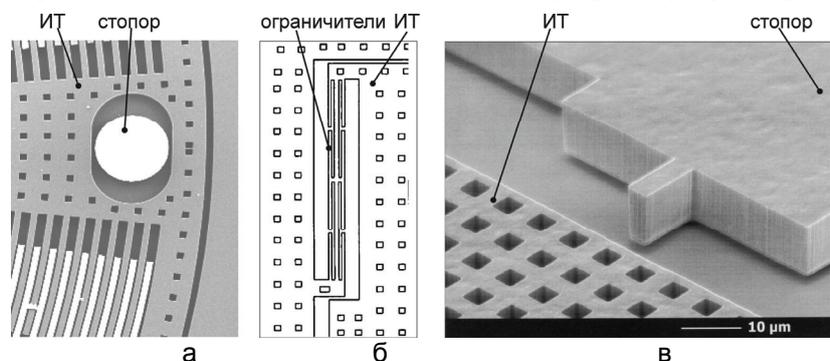


Рис. 4. Упоры на основании (а, в) и ограничители изгиба (б)

Наличие упоров, особенно ограничивающих перемещения ИТ перпендикулярно его плоскости, приводит к значительному изменению напряженного состояния конструкции упругого подвеса и ИТ при возникновении контакта. При отсутствии упоров контакт ИТ осуществляется по плоскости, при этом даже при очень больших перегрузках контактные напряжения малы, однако возможны замыкания электрических контактов. Если же контакт осуществляется только по дискретным точкам в местах расположения упоров, то ИТ подвергается изгибу. При этом определяющими становятся нормальные изгибные напряжения, и опасность разрушения при ударе может возрастать на порядки. Возможно также комбинированное напряженное состояние, при котором ИТ под действием сил инерции садится на упоры, но в то же время в промежутках между ними происходит контакт изогнутой поверхности ИТ с опорной плоскостью.

Обычно после посадки на упоры жесткость упругих элементов незначительна, однако, как правило, нужно учитывать деформации номинально плоской поверхности ИТ перед посадкой на упоры, вследствие чего касание упоров поверхностью ИТ происходит не одновременно, а при увеличении нагрузки со временем. При этом ИТ в целом должно рассматриваться как тонкая упругая пластина. При обычной сложной конфигурации ИТ и упругого подвеса необходимо использовать КЭА (рис. 5, а). Из результатов выборочных численных расчетов выясняется, что экстремальные упругие перемещения достигаются в зонах наибольшего удаления от упоров, а наибольшие изгибные напряжения – как правило, над упорами.

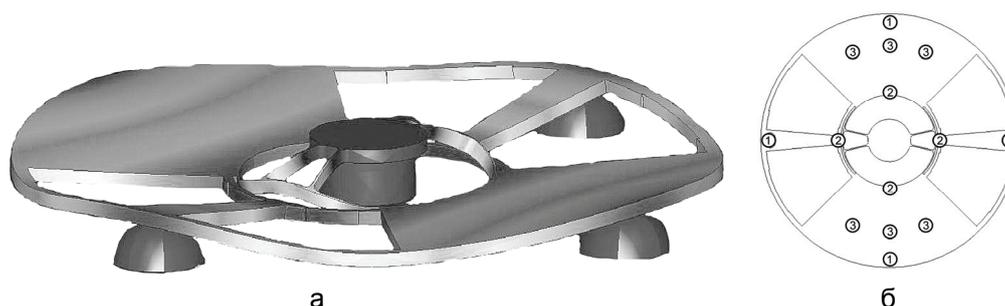


Рис. 5. Деформации ИТ и упругого подвеса при контакте с упорами (а) и варианты расположения упоров (б)

Для оценки эффективности установки упоров были рассмотрены три варианта их расположения (рис. 5, б): (1) четыре упора, равномерно расположенные по окружности на внешнем диаметре ИТ; (2) четыре упора, равномерно расположенные по окружности на внутреннем диаметре ИТ; (3) по три упора под каждым массивным сектором ИТ (вне зоны гребенчатого двигателя). Напряжения вычислялись в замкнутом контуре упругих элементов подвеса методом КЭА (рис. 6). Квазистатический анализ проводился при ускорении, действующем на ИТ, равном 10^3g .

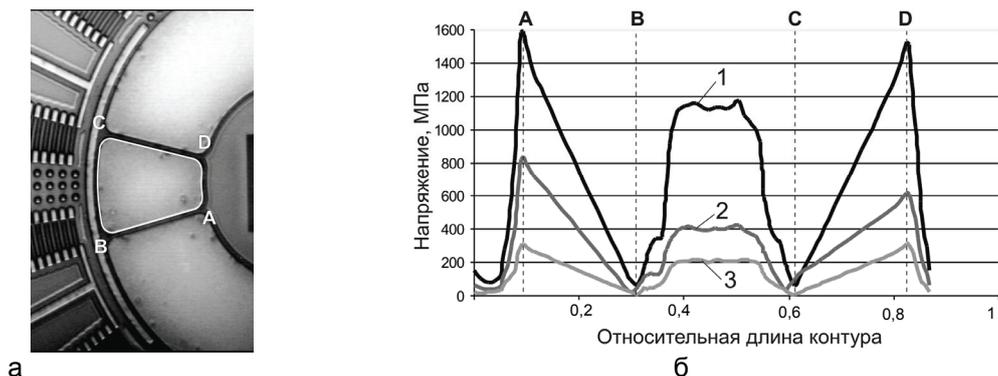


Рис. 6. Контур упругого подвеса (а) и напряжения в контуре (б)

Расчеты показывают, что напряжения в упругом подвесе сильно зависят от расположения упоров и путем удачной конфигурации могут быть снижены с 1600 МПа до 300 МПа. Как видно из рис. 6, б, только вариант (3) удовлетворяет требованию по допустимому напряжению в элементах подвеса $\sigma_{\text{доп}} = 500$ МПа.

Заключение

Контактные взаимодействия в ММГ возникают при значительных инерционных ударных нагрузках. При этом требуется обеспечение ударпрочности конструкции и сохранение метрологических характеристик прибора. На основании данных о собственных частотах конструкции ММГ и длительности ударных импульсов обоснована возможность использования квазистатического анализа ударных процессов. В результате исследований, проведенных методом КЭА, получены данные о механических напряжениях в конструкции при действии удара в плоскости ИТ и в направлении, перпендикулярном плоскости ИТ. По результатам расчетов показано, что элементы конструкции, такие как упругий подвес, зубья двигателя, способны выдерживать значительные перегрузки – до $10^5 g$. При этом можно сформулировать следующие рекомендации по выбору параметров конструкций ММГ, стойких к воздействию удара: повышение собственных частот конструкции и, следовательно, увеличение жесткости упругого подвеса и установка упоров – ограничителей перемещения элементов конструкции. Выявлено, что упоры, ограничивающие перемещения ИТ, при правильном их размещении позволяют повысить перегрузочную способность подвеса. Наиболее сложными представляются задачи расчета ударпрочности, когда возможны контакты в разных точках, и задачи расчета многоударных режимов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 10-08-00153-а.

Литература

1. Habibi S. Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / Habibi S., Cooper S.J., Stauffer J.-M., Dutoit B. // Proceeding of Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION. – PLANS-2008. – 5–8 May 2008. – P. 232–237.
2. Гай Э. Наводящиеся снаряды с инерциальной навигационной системой на микромеханических датчиках, интегрированной с GPS // Гироскопия и навигация. – 1998. – № 3. – С. 72–81.
3. Распопов В.Я. Микромеханические приборы: Учебное пособие. – Тула: Гриф и К., 2004. – 476 с.
4. Пешехонов В.Г. Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» / Пешехонов В.Г. [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2008. – № 2. – С. 29–31.
5. Евстифеев М.И. Анализ ударпрочности конструкций микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, А.А. Унтилов, А.М. Чистяков // Навигация и управление движением. – Материалы 9 конференции молодых ученых. – 2008. – С. 289–295.
6. Евстифеев М.И. Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2009. – № 3. – С. 22–34.
7. Евстифеев М.И. Проблемы расчета и проектирования микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2004. – № 1. – С. 27–39.
8. U.S. Patent 7204144. Micromachined Apparatus with Drive/Sensing Fingers in Coupling Levers / Geen J. ; Analog Devices, Inc. – Apr. 17, 2007. – 23 p.
9. Geiger W. A Mechanically Controlled Oscillator / Geiger W., Sandmaier Y., Lang W. // Sensor and Actuators. – 2000. – № 82. – P. 74–78.

Евстифеев Михаил Илларионович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», доктор технических наук, доцент, начальник отдела, evstifeevm@mail.ru, office@eprib.ru
Розенцвейн Дмитрий Владимирович – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», научный сотрудник, Rosenzwein@mail.ru