

## НИОКР: ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ЛИНЕЙНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА БЕЗ СИЛОВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Основными требованиями к датчикам первичной информации систем навигации, ориентации и управления средней точности являются малые массогабаритные характеристики, низкие себестоимость и энергопотребление при высокой надежности в эксплуатации. Этим требованиям в значительной степени удовлетворяют микромеханические гироскопы и акселерометры, узлы которых формируются из неметаллических материалов (монокристаллического кремния, плавленого кварца, карбида кремния и др.) методами фотолитографии и изотропного или анизотропного травления вместе с элементами электроники возбуждения, датчиками съема и преобразования выходного сигнала, элементами формирования обратных связей.

Недостатками конструкций маятниковых линейных акселерометров и микромеханических вибрационных гироскопов, выполненных из монокристаллического кремния с использованием технологий, развитых в твердотельной микроэлектронике, являются [1]:

- наличие упругих подвесов (торсионов) для инерционной или пробной массы с малыми размерами в плане (десятые доли миллиметра) и толщиной  $(8...20)10^{-6}$  м, которые являются концентраторами напряжений, особенно при высокой степени вертикальности стенок подвеса, снижающими надежность приборов в эксплуатации;

- высокая стоимость заготовок для деталей из монокристаллического кремния;

- низкая добротность осцилляторов (подвесов), обусловленная микроэлектронной технологией обработки заготовок из монокристаллического кремния ( $Q < 50000$ );

- низкие диэлектрические свойства, большая диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 12,5$ , что приводит к снижению точностных характеристик емкостных преобразователей угловых перемещений инерционной (пробной) массы из-за влияния токов утечки и паразитных емкостей;

- увеличенные в плане размеры датчиков, выполненных по дифференциальной схеме, например, акселерометра разомкнутого типа на двух маятниковых подвесах [1].

В отличие от монокристаллического кремния плавленый кварц как конструкционный материал является более технологичным при переработке в изделия на машинах-автоматах, имеет температурный коэффициент линейного расширения  $\alpha = 5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ , низкий модуль упругости  $E = 74,5 \text{ ГПа}$ , малый температурный коэффициент модуля упругости  $\beta_E = 71 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , высокие диэлектрические свойства: диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 3,8$ , большую электрическую прочность  $E_{пр} = 44 \text{ МВ/м}$ , достаточно высокий предел прочности на изгиб

$\sigma_{и}=110$  МПа (для прозрачного кварцевого стекла [2]), позволяет получать добротность резонаторов  $Q=(5...9)10^6$  [1].

Снижение стоимости и повышение надежности в эксплуатации линейных кварцевых акселерометров средней точности возможно при существенном упрощении конструкции акселерометра с разомкнутой схемой измерения ускорений. Упругий подвес инерционной массы таких акселерометров должен иметь большой линейный участок упругой характеристики, наиболее нагруженные участки которого не должны иметь концентраторов напряжений, что можно обеспечить увеличением размеров в плане, толщины и повышением качества поверхностей этих участков подвеса при использовании технологичного способа получения таких подвесов горячей листовой штамповкой, например, из ленты из плавленого кварца заданной толщины.

Общий вид кварцевого акселерометра разомкнутого типа в разрезе представлен на рис.1. Корпус акселерометра выполнен из двух чашеобразных элементов 1 и 2, между которыми закреплен ленточный карданный подвес 3 по наружному кольцу. На внутреннем кольце карданного подвеса 3 симметрично с двух сторон установлены элементы 4 и 5, образующие инерционную массу акселерометра [3].

На наружных торцовых поверхностях А и Б элементов 4 и 5 инерционной массы и на внутренних донных поверхностях С и Д чашеобразных элементов 1 и 2 корпуса нанесены металлизацией электроды дифференциального емкостного преобразователя линейных перемещений инерционной массы, образующих емкости  $C_1$  и  $C_2$ . На внутренних торцовых поверхностях Л, М и Н, Р на участках малой толщины элементов 4 и 5 инерционной массы также напылением нанесены слои металла толщиной, равной толщине напыленных электродов на наружных торцовых поверхностях этих же элементов, которые соединены между собой симметрично расположенными по отношению к подвесу 3 напыленными токоподводами (на чертежах не показаны) с образованием общего подвижного электрода с выводом его на корпус. Это позволяет уменьшить прогиб тонкостенных подвижных электродов емкостного преобразователя за счет биметаллического эффекта, уменьшить температурную нестабильность емкостей  $C_1$  и  $C_2$  емкостного преобразователя линейных перемещений инерционной массы и масштабного коэффициента акселерометра.

Ленточный карданный подвес 3 инерционной массы акселерометра, представленный на рис.2, выполнен из наружного и внутреннего колец и внутренней рамки, зазор между которыми  $\delta=(0,2...0,3)10^{-3}$  м. На участках внутренней рамки карданного подвеса между радиальными парами коротких ортогональных перемычек шириной  $b_{п}$ , соединяющих инерционную массу через внутреннюю рамку с корпусом акселерометра, в радиальном направлении выполнены волны гофров  $E$  пологого синусоидального профиля глубиной  $H_{г}$ , равной удвоенной амплитуде синусоиды и длиной волны  $l_{г}$  (Рис.3), а в окружном направлении волны гофров  $F$  с глубиной  $H_{г}$  и длиной волны  $l_{г}=b$  (Рис.4). Они позволяют

за счет уменьшения жесткости на растяжение гофрированных рабочих участков внутренней рамки карданного подвеса и увеличения их изгибной жесткости на три-четыре порядка увеличить линейный участок упругой характеристики ленточного карданного подвеса и значительно увеличить динамический диапазон акселерометра [4].

Большая ширина внутренней рамки карданного подвеса  $b=(1,0...1,5)10^{-3}$  м при малом наружном диаметре карданного подвеса  $D_n=1,2\cdot 10^{-2}$  м, постоянная толщина ленточного подвеса  $h=(1...5)10^{-5}$  м позволяют исключить концентраторы напряжений на рабочих участках внутренней рамки карданного подвеса, упростить процесс выполнения симметрично напыленного токоподвода к подвижным электродам дифференциального емкостного датчика линейных перемещений инерционной массы акселерометра.

Ленточный карданный подвес 3 инерционной массы можно изготовить из ленты плавленого кварца заданной толщины и диаметра с предварительно полученными с помощью лазера прорезами шириной  $\delta$  заданной конфигурации и последующей горячей формовкой в штампе волн гофров заданной глубины  $H_r$  и  $H_t$  в радиальном и окружном направлениях на участках внутренней рамки ленточного карданного подвеса.

Технологической особенностью конструкции акселерометра является также “холодная” сварка элементов корпуса 1 и 2 и элементов инерционной массы 4 и 5 с наружным и внутренним кольцами ленточного карданного подвеса 3. Сварка включает нанесение тончайших равномерных пленок двуокиси кремния на соединяемые поверхности и облучение мест соединения в специальных камерах инфракрасными лучами при температурах  $150...250^\circ\text{C}$ . Это позволяет резко снизить термоупругие напряжения в элементах конструкции, так как пленка клея не деформируется, обеспечить однородность среды на границах соединений, сохранить геометрию и обеспечить высокую прочность и стойкость к термодарам соединений деталей [5].

В качестве преобразователя измеряемого ускорения в пропорциональный электрический сигнал в акселерометре можно, например, использовать мост Саути (Рис.5) [6], в два смежных плеча которого включены емкости  $C_1$  и  $C_2$  дифференциального емкостного преобразователя линейных перемещений инерционной массы, а в два других – резисторы  $R$ . Одна из диагоналей моста должна быть подключена к высокостабильному высокочастотному источнику синусоидального напряжения  $U$ , а другая - к усилителю-преобразователю акселерометра 7. Действие ускорения  $a$  приводит к смещению инерционной массы акселерометра, изменению емкостей  $C_1$  и  $C_2$  на  $\pm\Delta C$ , которые преобразуются в напряжения постоянного тока  $U_{\text{вых}}$  той или иной полярности, пропорциональное измеряемому ускорению  $a$ .

Для расчета ленточного карданного подвеса акселерометра с волнами гофров в радиальном и окружном направлениях на внутренней рамке можно воспользоваться методикой расчета прорезных пружин, изложенной в работе [7],

поскольку при осевом нагружении их торцы перемещаются строго поступательно. Расчет прорезных пружин в работе [7] приведен без учета ширины и жесткости коротких пар перемычек при действии равномерно распределенной между перемычками осевой силы  $P$ .

Предполагая, что радиальные пары коротких ортогональных перемычек ленточного карданного подвеса являются абсолютно жесткими, можно в первом приближении принять в качестве исходной расчетную схему одного из деформируемых плоских колец прорезной пружины из изотропного материала с шириной кольца равной ширине  $b$  внутренней рамки карданного подвеса и средним радиусом кольца  $R_{cp}$ . Последний определяется с учетом ширины четырех коротких и жестких на изгиб и кручение перемычек длиной  $\delta$  и шириной  $b_{п}$  соотношением

$$R_{cp} = \frac{l_{\delta н} + l_{\delta в}}{4\pi},$$

где  $l_{\delta н}$ ,  $l_{\delta в}$  - длины наружной и внутренней прорезей рамки карданного подвеса с шириной рамки  $b$ .

В произвольном сечении  $\varphi$  внутренней рамки ленточного плоского карданного подвеса, имеющего число прорезей по двум ортогональным осям  $n=2$  и центральный угол  $\alpha$ , соответствующий каждой прорези равный  $\pi$ , изгибающий момент  $M_{и}(\varphi)$  и крутящий  $M_{к}(\varphi)$  соответственно равны [7]:

$$M_{и}(\varphi) = \frac{PR_{cp}}{4}(1 - \chi)(\cos\varphi - \sin\varphi); \quad (1)$$

$$M_{к}(\varphi) = \frac{PR_{cp}}{4}[(1 - \chi)(\sin\varphi + \cos\varphi) - 1], \quad (2)$$

где  $\varphi$  - угол между осью перемычки и произвольным сечением;

$\chi$  - безразмерный коэффициент, определяемый по формуле:

$$\chi = 1 - \frac{2\nu}{\nu - 1 + \frac{\pi}{2}(\nu + 1)}; \quad \nu = \frac{EJ_x}{GJ_p}, \quad (3)$$

$E$ ,  $G$  - модули упругости первого и второго рода для изотропного материала плоского ленточного подвеса соответственно;  $J_x = \frac{bh^3}{12}$  - момент инерции сечения кольца относительно главной центральной оси;  $J_p$  - полярный момент инерции сечения кольца.

Изгибающий и крутящий моменты достигают наибольшей величины в сечениях, граничащих с перемычками, то есть при  $\varphi=0$  и при  $\varphi=\pi/2$ . Из уравнений (1), (2) определим модули максимальных изгибающих  $|M_{и max}|$  и крутящих  $|M_{к max}|$  моментов

$$|M_{и max}| = \frac{PR_{cp}}{4}(1 - \chi); \quad (4)$$

$$|M_{к max}| = \frac{PR_{ср}}{4} \chi. \quad (5)$$

Осевое перемещение  $\lambda$  внутреннего кольца ленточного карданного подвеса равно [7]

$$\lambda = \frac{6\gamma PR_{ср}^3}{Ebh^3}, \quad (6)$$

где безразмерный коэффициент  $\gamma$  равен

$$\gamma = \nu \left[ \frac{\pi}{4} - \frac{2\nu}{(\nu - 1) + \frac{\pi}{2}(\nu + 1)} \right].$$

Жесткость ленточного карданного подвеса по силе  $K_p$  равна

$$K_p = \frac{P}{\lambda} = \frac{Eb}{6\gamma} \left( \frac{h}{R_{ср}} \right)^3. \quad (7)$$

Следует иметь в виду, что формула (7) справедлива только для малых перемещений  $\lambda$  внутреннего кольца карданного подвеса. С увеличением  $\lambda$  возрастают нелинейность упругой характеристики карданного подвеса и его жесткость  $K_p$ , что связано с растяжением внутренней рамки карданного подвеса при приложении осевой силы  $P$ .

Наибольшие напряжения изгиба и кручения с учетом соотношения (4), (5) соответственно равны [7]

$$\sigma_{и max} = \frac{6M_{и max}}{bh^2} = \frac{3(1 - \chi)}{2} \cdot \frac{PR_{ср}}{bh^2}; \quad (8)$$

$$\tau_{к max} = \frac{M_{к max}}{\psi bh^2} = \frac{\chi PR_{ср}}{4\psi bh^2}, \quad (9)$$

где  $\psi$  - безразмерный коэффициент, зависящий от отношения сторон прямоугольного сечения внутренней рамки карданного подвеса  $h/b$  [8].

Значения безразмерных коэффициентов  $\chi$ ,  $\nu$ ,  $\gamma$ ,  $\Psi$  в зависимости от отношения размеров сечения рамки  $h/b$  при коэффициенте Пуассона  $\mu=0,3$  приведены в табл. [7, 8].

Величина напряжения растяжения  $\sigma_p$  в сечении внутренней рамки пропорциональна относительной деформации рамки  $\varepsilon_p$  и модулю упругости материала рамки  $E$  и при больших деформациях может превысить напряжения изгиба  $\sigma_{и}$  и кручения  $\tau_{к}$ .

Коэффициенты  $\nu$ ,  $\chi$ ,  $\gamma$ ,  $\Psi$  для расчета внутренней рамки карданного подвеса прямоугольного сечения

Коэффици- циенты	Отношение $h/b$					
	0	0,10	0,25	0,50	0,66	1,00
$\nu$	0,65	0,69	0,77	0,95	1,10	1,54
$\chi$	0,42	0,41	0,40	0,37	0,35	0,32
$\gamma$	0,133	0,135	0,140	0,146	0,151	0,161
$\Psi$	0,333	0,313	0,282	0,246	0,231	0,208

Покажем, что выполнение на рабочих участках внутренней рамки ленточного карданного подвеса волн гофров в окружном и радиальном направлениях с параметрами волн гофров  $H_t$ ,  $l_t$  и  $H_r$ ,  $l_r$  соответственно, позволит резко уменьшить напряжения растяжения  $\sigma_r$  при заданной величине относительной деформации  $\epsilon_r$ , увеличить изгибную жесткость и уменьшить жесткость на кручение ленточного карданного подвеса.

При расчете упругой характеристики ленточного карданного подвеса инерционной массы акселерометра с волнами гофров в окружном и радиальном направлениях на внутренней рамке подвеса будем рассматривать рабочие участки внутренней рамки как плоские анизотропные секторные пластины. При этом толщину анизотропной пластины примем равной толщине внутренней рамки карданного подвеса, что позволит получить материал для расчета в наиболее простой аналитической форме.

Таким образом, материал эквивалентной плоской кольцевой секторной пластины должен обладать тройной анизотропией: в одном и том же направлении модули упругости материала при растяжении, изгибе и кручении должны быть различными.

Упругие коэффициенты материала анизотропных секторных пластин толщиной  $h$  можно определить из равенства жесткостей на растяжение, изгиб и кручение элементов анизотропных секторных пластин, соответствующим жесткостям гофрированных рабочих участков ленточного карданного подвеса.

Введем обозначения:  $E_{гр}$ ,  $E_{гп}$  и  $E_{ги}$ ,  $E_{ти}$  – приведенные значения модулей упругости первого рода, характеризующие жесткости материала анизотропных секторных пластин рабочих участков карданного подвеса на растяжение, изгиб в радиальном и окружном направлениях;  $G_{rk}$ ,  $G_{tk}$  – приведенные значения модулей упругости второго рода анизотропных секторных пластин при кручении

в радиальном и окружном направлениях, значения которых можно представить в следующем виде [9]

$$\begin{aligned} E_{rp} &= \frac{k_{1t} E}{k_{rp}}; & E_{tp} &= \frac{k_{1r} E}{k_{tp}}; & E_{ru} &= \frac{k_{tp} E}{k_{1r}}; & E_{tu} &= \frac{k_{rp} E}{k_{1t}}; \\ G_{rk} &= \frac{k_{1r} E}{2(1+\mu)k_{tp}}; & G_{tk} &= \frac{k_{1t} E}{2(1+\mu)k_{rp}}, \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициенты анизотропии  $k_{ij} > 1$ .

Коэффициенты  $k_{1r}$ ,  $k_{1t}$  определяются отношением длин дуг одной волны гофров  $S_r$ ,  $S_t$  в радиальном и окружном направлениях к длинам волн гофров  $l_r$  и  $l_t$  (рис.3, 4) в каждом из направлений и находятся в пределах  $1,1 \dots 1,4$ . Коэффициенты  $k_{rp}$ ,  $k_{tp}$ , равные отношению моментов инерции окружного и радиального сечений гофрированной и плоской части внутренней рамки карданного подвеса, быстро возрастают с увеличением глубины волн гофров  $H_r$  и  $H_t$  (рис.3,4) и могут быть значительно больше единицы [4].

Коэффициенты  $k_{rp}$  и  $k_{tp}$  слабо зависят от длин волн гофров [4], поэтому в качестве расчетной длины волн гофров в радиальном направлении можно принять ее среднее значение по среднему радиусу кольца  $R_{cp}$ .

Коэффициенты анизотропии по каждому из двух ортогональных направлений волн гофров  $k_{1r}$ ,  $k_{1t}$ ,  $k_{rp}$ ,  $k_{tp}$  рабочих участков внутреннего кольца ленточного карданного подвеса определяются через полные эллиптические интегралы I и II рода по следующим соотношениям [4]:

$$k_{1r} = \frac{2}{\pi \sqrt{1-a_t^2}} E_{ot}; \quad (11)$$

$$k_{1t} = \frac{2}{\pi \sqrt{1-a_r^2}} E_{or}; \quad (12)$$

$$k_{rp} = \frac{H_t^2}{h^2} \frac{2}{\pi \sqrt{1-a_t^2}} \left[ \left( \frac{1}{a_t^2} - 1 \right) F_{ot} + \left( 2 - \frac{1}{a_t^2} \right) E_{ot} \right] + \frac{2\sqrt{1-a_t^2}}{\pi} F_{ot}; \quad (13)$$

$$k_{tp} = \frac{H_r^2}{h^2} \frac{2}{\pi \sqrt{1-a_r^2}} \left[ \left( \frac{1}{a_r^2} - 1 \right) F_{or} + \left( 2 - \frac{1}{a_r^2} \right) E_{or} \right] + \frac{2\sqrt{1-a_r^2}}{\pi} F_{or}; \quad (14)$$

где  $F_{or} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha_r}{\sqrt{1-a_r^2 \sin^2 \alpha_r}}$ ;  $F_{ot} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha_t}{\sqrt{1-a_t^2 \sin^2 \alpha_t}}$  - полные эллиптические

интегралы I рода для волн гофров в окружном и радиальном направлениях соответственно;

$$E_{or} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - a_t^2 \sin^2 \alpha_t} d\alpha_t; \quad E_{ot} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - a_r^2 \sin^2 \alpha_r} d\alpha_r - \text{полные эллиптические}$$

интегралы II рода для волн гофров в окружном и радиальном направлениях соответственно;

$$a_r = \frac{\frac{\pi H_r}{l_r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H_r}{l_r}\right)^2}}; \quad a_t = \frac{\frac{\pi H_t}{l_t}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\pi H_t}{l_t}\right)^2}} - \text{модули полных эллиптических}$$

интегралов I и II рода для волн гофров в радиальном и окружном направлениях;

$$\alpha_r = 2\pi \frac{x_r}{l_r}; \quad \alpha_t = 2\pi \frac{x_t}{l_t} - \text{аргументы для волн гофров в радиальном и}$$

окружном направлениях;  $x_r$ ,  $x_t$  – текущие координаты для синусоиды волн гофров в радиальном и окружном направлениях.

Полные эллиптические интегралы I и II рода для волн гофров по двум ортогональным направлениям можно представить в виде рядов [10]

$$F_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\alpha}{\sqrt{1 - a^2 \sin^2 \alpha}} = \frac{\pi}{2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 a^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 a^4 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6}\right)^2 a^6 + \dots \right]; \quad (15)$$

$$E_0 = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - a^2 \sin^2 \alpha} d\alpha = \frac{\pi}{2} \left[ 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2 a^2 - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 \frac{a^4}{3} - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6}\right)^2 \frac{a^6}{5} \dots \right] \quad (16)$$

Подставив значения полных эллиптических интегралов (15), (16) в выражения (11), (12), (13) и (14), получим

$$k_{1r} = \frac{1}{\sqrt{1 - a_t^2}} \left[ 1 - \frac{a_t^2}{4} - \frac{3a_t^4}{64} - \frac{45a_t^6}{2304} - \dots \right]; \quad (17)$$

$$k_{1t} = \frac{1}{\sqrt{1 - a_r^2}} \left[ 1 - \frac{a_r^2}{4} - \frac{3a_r^4}{64} - \frac{45a_r^6}{2304} - \dots \right]; \quad (18)$$

$$k_{rp} = \frac{3H_t^2}{2h^2 \sqrt{1 - a_t^2}} \left( 1 - 0,375a_t^2 - 0,078a_t^4 - 0,091a_t^6 \right) + \sqrt{1 - a_t^2} \left( 1 + 0,25a_t^2 + 0,14a_t^4 + 0,097a_t^6 \right) \quad (19)$$

$$k_{tp} = \frac{3H_r^2}{2h^2} \frac{1}{\sqrt{1-a_r^2}} (1 - 0,375a_r^2 - 0,078a_r^4 - 0,091a_r^6) + \sqrt{1-a_r^2} (1 + 0,25a_r^2 + 0,14a_r^4 + 0,097a_r^6) \quad (20)$$

Для определения жесткости гофрированных участков карданного подвеса на кручение найдем составляющие податливости участков подвеса на кручение в радиальном  $q_{rk}$  и окружном  $q_{tk}$  направлениях

$$q_{rk} = \frac{1}{G_{rk}} = \frac{2(1+\mu)k_{tp}}{k_{1r}E}; \quad q_{tk} = \frac{1}{G_{tk}} = \frac{2(1+\mu)k_{rp}}{k_{1t}E}; \quad (21)$$

Суммарная податливость гофрированных рабочих участков карданного подвеса на кручение равна

$$q_k = \sqrt{q_{rk}^2 + q_{tk}^2} = \frac{2(1+\mu)}{E} \cdot \frac{k_{tp}}{k_{1r}} \sqrt{1 + \left( \frac{k_{rp}k_{1r}}{k_{1t}k_{tp}} \right)^2} \quad (22)$$

Эквивалентное значение модуля упругости анизотропных секторных пластин толщиной  $h$  на кручение определяется по формуле

$$G_k = \frac{1}{q_k} = \frac{E}{2(1+\mu) \frac{k_{tp}}{k_{1r}} \sqrt{1 + \left( \frac{k_{rp}k_{1r}}{k_{1t}k_{tp}} \right)^2}} \quad (23)$$

Параметры ленточного карданного подвеса толщиной  $h=0,02$  мм по конструктивным соображениям и условиям технологичности выбираем следующими: глубина волн гофров на рабочих участках подвеса в радиальном направлении  $h_r=20h=0,4$  мм, длина волны гофров  $l_r=2,7$  мм (две волны на рабочем участке) и в окружном направлении  $H_r=10h=0,2$  мм, длина одной волны гофров  $l_t=b=1$  мм.

В этом случае коэффициенты анизотропии для рабочих участков в виде пластин, определенные по формулам (17),... (20), будут равны:  $k_{1r}=1,02$ ;  $k_{1t}=1,05$ ;  $k_{rp}=146$ ;  $k_{tp}=617$ .

Отношение коэффициентов анизотропии  $k_{tp}/k_{1r}$  в формуле (23) для выбранного ленточного карданного подвеса из ленты толщиной  $h=0,02$  мм составляет 605, во столько же раз уменьшится модуль упругости при кручении  $G_k$ , что при заданном линейном перемещении инерционной массы  $\lambda_m$  позволит снизить касательные напряжения на рабочих участках гофрированного карданного подвеса во столько же раз. Поэтому влиянием касательных напряжений на жест-

кость и линейность упругой характеристики ленточного гофрированного карданного подвеса при дальнейшем анализе пренебрегаем.

Увеличение изгибной жесткости гофрированного ленточного карданного подвеса в  $k_{rp}/k_{lt}$  раз можно рассматривать как жесткость плоского карданного подвеса из изотропного материала с большей толщиной ленты

$$h_3 = \sqrt[3]{\frac{k_{rp}}{k_{lt}}} h = 0,103 \text{ мм.}$$

Наибольшее напряжение изгиба  $\sigma_{игmax}$  в карданном подвесе с гофрированной внутренней рамкой в первом приближении можно определить по формуле для плоского подвеса толщиной  $h_3$  из изотропного материала при  $P_{max}=0,08H$  (что соответствует ускорению  $a=40g$ ).

$$\sigma_{игmax} = \frac{3(1-\chi)}{2} \cdot \frac{P_{max} R_{cp}}{bh_3^2} = 23,6 \text{ МПа} ; \quad (24)$$

Максимальное напряжение изгиба  $\sigma_{иbmax}$  на вершинах волн гофров в окружном направлении с глубиной  $H_t=10h$  равны

$$\sigma_{иbmax} = \sigma_{игmax} \frac{H_t}{h_3} = 23,6 \frac{10h}{5,17h} = 45,6 \text{ МПа}$$

Для плавленого кварца предел прочности на изгиб  $\sigma_{и}=110$  МПа, коэффициент запаса по пределу прочности на изгиб  $n_{и}=2,4$ .

Жесткость ленточного карданного подвеса с волнами гофров на рабочих участках глубиной  $H_r$  в радиальном направлении и  $H_t$  в окружном равна

$$k_{pr} = \frac{k_{rp} Eb \left( \frac{h}{R_{cp}} \right)^3}{6k_{lt} \gamma} = 1300 \frac{H}{m} \quad (25)$$

Максимальная осевая деформация  $\lambda_{гmax}$  ленточного гофрированного карданного подвеса, соответствующая ускорению  $a_{max}=40g$  при эквивалентной инерционной массе  $m_u=2 \cdot 10^{-4}$  кг

$$\lambda_{гmax} = m_u \cdot a_{max} / k_{pr} = 6,15 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad (26)$$

На заделанных по концам рабочих участках внутренней гофрированной рамки карданного подвеса длиной  $l_{п}=\pi R_{cp}/2$  действие по оси подвеса силы  $P_{max}$  сопровождается деформацией подвеса  $\lambda_{гmax}=\kappa_{lt} \cdot \lambda_{max}$ , удлинением нейтрального сечения рабочих участков внутренней рамки и появлением напряжения растяжения  $\sigma_{pmax}$ , пропорционального относительно удлинению нейтральной линии  $\varepsilon_{max}$ , которое в первом приближении равно [9]

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sqrt{l_{II}^2 + \lambda_{max}^2 k_{1t}^2} - l_{II}}{l_{II}} = 6,61 \cdot 10^{-5} \quad (27)$$

Максимальное значение напряжения растяжения  $\sigma_{tp \max}$  в анизотропных секторных кольцевых пластинках, соответствующих рабочим участкам внутренней рамки ленточного карданного подвеса можно определить по формуле

$$\sigma_{tp \max} = E_{tp} \cdot \varepsilon_{max} = \frac{k_{1r}}{k_{tp}} E_{кв} \cdot \varepsilon_{max} = 8,14 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} \quad (28)$$

Пренебрегая влиянием напряжений кручения, которые действуют в ортогональной плоскости по отношению к изгибающим напряжениям и снижены в рабочих участках карданного подвеса в  $k_{tp}/k_{1t}$ , максимальное значение нелинейности упругой характеристики ленточного карданного подвеса с гофрами на рабочих участках внутренней рамки подвеса в первом приближении можно определить по формуле [11]

$$\gamma_{н \max} = \frac{2\sigma_{tp \max}}{\sigma_{иг \max}} = 7 \cdot 10^{-4} = 0,07\% \quad (29)$$

Коэффициент нелинейности упругой характеристики карданного подвеса с гофрированной внутренней рамкой в диапазоне ускорений до 40g  $\gamma_{нф}=0,07\%$ , в то время как для негофрированной внутренней рамки подвеса  $\gamma_{н}=37\%$ , а в диапазоне измеряемых ускорений до 12 g коэффициент нелинейности упругой характеристики не превысит 0,01 %.

Собственная частота колебаний ленточного карданного подвеса с эквивалентной инерционной массой  $m_{иэ}=2 \cdot 10^{-4}$  равна [11]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{m_{иэ}}{K_{pг}}}} = 407 \text{ Гц} \quad (30)$$

Температурная погрешность масштабного коэффициента акселерометра  $\Delta a_t$ , выполненного из плавленного кварца ( $\beta E_{кв}=71 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ )

$$\Delta a_t = \beta E_{кв} = 7,1 \cdot 10^{-3} \% \text{ К}^{-1} \quad (31)$$

Для уменьшения этой погрешности при работе акселерометра в широком интервале температур ( $-60 \dots +60^{\circ} \text{C}$ ) можно ввести термостабилизацию прибора.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Предложена и теоретически исследована простая конструкция малогабаритного акселерометра разомкнутого типа, электромеханическая часть которого, состоящая только из трех различных деталей удовлетворяет основным принципам конструирования: симметрии и цельности конструкции, отсутстви-

ем концентраторов напряжений, технологичностью изготовления деталей и сборки.

2. Монолитность конструкции из плавленного кварца позволяет снизить погрешность измерения ускорения от гистерезиса упругой характеристики на 2-3 порядка, а температурную погрешность от изменения жесткости подвеса по сравнению с подвесом из металла уменьшить в 4-5 раз.

3. По величине нелинейности упругой характеристики карданного подвеса предлагаемый акселерометр в зависимости от диапазона измеряемых ускорений удовлетворяет классам точности измерительных преобразователей 0,01...0,05.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработка кремниевых датчиков первичной информации для систем навигации и управления /Будкин В.Л., Паршин В.А. и др.// V Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, май 1998. - 284 с. Государственный научный центр РФ – ЦНИИ “Электроприбор”, 1998.
2. Справочник по электротехническим материалам. Т.2 /Под ред. Ю.В.Корицкого и др. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - С.203.
3. Увакин В.Ф. Акселерометр. Патент РФ на изобретение № 2191390, 2002, Бюл. № 29.
4. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – Машгиз, 1962. - 456с.
5. Федин Э. Самое надежное соединение стеклянных деталей. //Изобретатель и рационализатор. - 1984. - №10, С.18.
6. Аш Ж.Андре Р., Бьюфронт и др. Датчики измерительных систем. В 2-х книгах. Кн.1. - М.: Мир, 1992. С.388-389.
7. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. Расчет упругих элементов машин и приборов. - М.: Машиностроение, 1980. - 326 с.
8. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. – М.: Наука, 1974. – С.93-95.
9. Увакин В.Ф. Олькова В.Б. Об одной конструкции гофрированной мембраны // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. №4, С. 45-49
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров), М.: Наука, 1974. – С.757.
11. Электрические измерения неэлектрических величин. /Под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия, 1975. – С.195-196.

Научный руководитель проекта  
к.т.н., доцент

В.Ф. Увакин.