

557265

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции  
и ордена Трудового Красного Знамени государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана ( МГТУ им. Н.Э. Баумана )

На правах рукописи

~~Секрет~~

ЮРАСОВ ЮРИЙ ВЛАДИСЛАВОВИЧ

КРЕМНИЕВЫЙ УПРУГИЙ ПОДВЕС КОМПЕНСАЦИОННЫХ  
АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ

05.11.03 - Гироскопы, навигационные приборы  
и комплексы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Москва

1996 г.

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре  
"Приборы и системы ориентации, навигации и гироскопической  
стабилизации подвижных объектов" (ИУ-2).

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор  
КОНОВЛОВ С.Ф.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
РАХТЕЕНКО В.Р.  
(НПП "Алмаз")  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник  
КУРНОСОВ В.И.  
(НИИПМ им. академика Кузнецова В.И.)

Ведущая организация      Научно-производственное объединение  
автоматики и приборостроения

Защита диссертации состоится "      "      1996г.  
на заседании специализированного Совета К 053.15.02 МГТУ им.  
Н.Э.Баумана.

Отзыв на автореферат в 1 экз., заверенный печатью просим  
присылать по адресу: 107005, Москва, Б-5 2-я Бауманская ул., д.5,  
Ученому секретарю специализированного совета К 053.15.02

Автореферат разослан "      "      1996г.

Зам. ученого секретаря  
специализированного Совета  
к.т.н., профессор

В.Н. Дикарев

Подписано в печать 26.12.95. Объем 1 п.л. Зак. 483. Тир. 100.  
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время в нашей стране и во многих странах мира в области навигационной техники большое внимание начинает уделяться созданию и совершенствованию маятниковых, компенсационных акселерометров с упругими подвесами.

Прототип прибора с упругим подвесом, выполненным из кварца был создан компанией Sundstrand. В настоящее время многие зарубежные и Российские предприятия выпускают приборы с упругими подвесами.

Достаточно хорошие для многих задач точностные характеристики этих приборов в сочетании с технологической простотой изготовления и, как следствие этого сравнительной дешевизной приборов, заставляют выбирать приборы с упругим подвесом для решения различных прикладных задач.

Узлом определяющим работу таких приборов является узел подвеса с прикрепленной к нему пластиной маятника.

Большинство выпускавшихся до этого приборов использовали в качестве материала подвеса кварц, нуждающийся в сложной обработке и, как следствие, требующий больших затрат на оборудование и использования высококвалифицированного персонала.

По этой причине разработчики акселерометров стали использовать в качестве конструкционного материала монокристаллический кремний, ориентируясь при этом на технологическую базу современной микроэлектронной промышленности. Основными технологическими процессами при изготовлении кремниевых маятников являются фотолитография и анизотропное травление. На качество изготавливаемых маятников существенное влияние оказывает несовершенство технологических процессов и исходное отклонение формы кремниевых заготовок. В результате собранные с некачественными маятниками приборы будут иметь погрешности. Указанный вопрос ранее не исследовался и его решению посвящена данная работа.

Целью работы является выбор рациональной схемы подвеса маятникового компенсационного акселерометра (МКА) и учет

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1551265

Юрасов Ю. В. Кремниевый уп



основных технологических погрешностей, возникающих при ее изготовлении.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

- Рассмотрены различные схемы подвесов акселерометров и дан расчет этих схем подвесов;
- Выбрана схема подвеса акселерометра и произведено обоснование этого выбора;
- Произведены аналитические и программные расчеты схемы подвеса с учетом технологических погрешностей, возникающих при создании данной схемы;
- Разработаны новые методики расчета погрешностей;
- На экспериментальной установке проведены экспериментальные исследования, качественно и количественно подтверждающие правильность теоретических положений, полученных при расчете ударопрочной схемы акселерометра;

Практическая ценность работы.

Расчитан и исследован удароустойчивый подвес маятникового компенсационного акселерометра.

Выбрана и исследована с учетом технологических погрешностей, возникающих при ее изготовлении схема подвеса МКА.

Созданы методики расчета ряда погрешностей, возникающих при изготовлении подвеса путем травления монокристалла кремния.

Разработанное программное обеспечение позволяет проводить расчеты, варьируя различные параметры подвеса.

Созданная экспериментальная установка позволила исследовать эффекты, вызванные технологическими погрешностями изготовленного упругого подвеса.

Даны требования к максимально допустимым величинам погрешностей, возникающих при изготовлении монокристаллического кремниевого подвеса.

Схема подвеса акселерометра, выбранная в данной работе, использовалась при разработке приборов КА100 и КА200 в МГТУ им.Н.Э.Баумана.

При изготовлении подвесов акселерометров КА100 и КА200 использовались рекомендации данной работы по выбору исходных заготовок из монокристаллического кремния для производства подвесов.

Внедрение. Опытная партия акселерометров КА100 и КА200, использующих схему подвеса, выбранную в данной работе и изготовленных с учетом рекомендаций, содержащихся в ней, прошла успешные испытания в МГТУ им. Н.Э. Баумана, в ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и в НИИПМ им. академика В.И. Кузнецова.

Методики расчета погрешностей, разработанное на основе этих методик программное обеспечение, рекомендации данной работы по изготовлению подвесов внедрены на предприятии НПОАП.

Методика выбора схемы подвеса, методики расчета погрешностей и разработанное на основе этих методик программное обеспечение внедрены на предприятии НИИПМ им. академика Кузнецова В.И.

Методы исследования. При выполнении работы широко использовался аппарат дифференциального интегрального исчисления, реализованный посредством программирования на ЭВМ IBM PC 486 в среде WINDOWS 3.1 на алгоритмическом языке "Microsoft C 6.0". Для аналитических исследований использовалась система аналитического программирования "Reduce 4.0" алгоритмического языка LISP.

Апробация работы. Результаты работы были представлены на следующих научно-практических конференциях:

- II Международная конференция по гироскопической технике и навигации, г.Санкт-Петербург, 1995 год;
- I Украинская Национальная конференция с международным участием "Гиротехнология, навигация и управление движением", г.Киев, 1995 год.

Основные результаты расчетов представлены в журнале "Информатизация и новые технологии"[4]. Рефераты статей журнала издаются в Великобритании и Польше.

Публикации. Аналитические и практические результаты работы опубликованы в 4-х научных статьях, сборнике тезисов докладов международной конференции. В настоящее время в печати находятся еще 2 тезисов докладов научно-практических конференций.

Структура и объем работы. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из наименований и приложений.

Работа изложена на 264 страницах, содержит 83 рисунка и фотографии и список литературы из 107 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, раскрывается цель работы, дана информация об апробации и общая характеристика работы, сформулированы основные положения, разработанные в диссертации.

В главе 1 изучено состояние вопроса и дана постановка задачи. Показано, что целям поставленной задачи наиболее полно отвечает маятниковый компенсационный акселерометр с упругим подвесом, выполненным из одного материала, по единой технологии с подвижной системой акселерометра. Произведен выбор монокристаллического кремния в качестве материала подвеса и маятника акселерометра. Показана необходимость рассмотрения различных схем подвеса, выбора в результате рассмотрения рациональной схемы подвеса, и учета технологических особенностей изготовления подвесов из заготовок монокристаллического кремния. Дан обзор работ по расчетам подвесов и изложены наиболее характерные особенности изготовления подвесов и маятников из кремния.

В главе 2 в качестве схемы подвеса, выполненного путем травления монокристаллического кремния были рассмотрены и рассчитаны различные схемы подвесов акселерометра, а именно:

- центральные подвесы симметричного типа на попарно симметричных  $2n$  перемычках ( $n > 2$ ) (рис. 15) и (рис. 16);
- центральные подвесы кососимметричного типа (рис. 1в);
- подвесы маятникового типа на двух параллельных перемычках (подвесы аналогичные используемому в акселерометре Q-Flex) (рис. 1г);
- подвесы маятникового типа на четырех параллельных перемычках, расположенных в центральной плоскости пластины маятника (рис. 1д);
- подвесы маятникового типа на четырех параллельных перемычках, разнесенных к краям пластины маятника (рис. 1е);
- подвесы маятникового типа с попарно противоположнонаправленными перемычками, разнесенными к краям пластины маятника (рис. 1ж);
- подвесы маятникового типа с попарно противоположнонаправленными перемычками, расположенными в центральной плоскости пластины маятника (рис. 1з);

Центральные подвесы симметричного типа имеют следующие преимущества: Они обеспечивают плоско параллельное перемещение пластины и повышенную ударопрочность при ориентации ударных

воздействий в плоскости пластины. Расчеты показали, что подвесы имеют большую жесткость не позволяющую использовать данный подвес в приборах компенсационного типа.

Кососимметричные подвесы обладают меньшей жесткостью, чем симметричные. Здесь также выполняется условие плоскопараллельного перемещения пластины по оси чувствительности. Однако, в данном случае имеется разворот пластины вокруг измерительной оси с расположенным на ней грузом под действием силы приложенной к подвесу, и кроме того данный подвес является не столь ударопрочным как симметричный. Этот подвес также имеет существенную жесткость не позволяющую использовать его в приборах компенсационного типа. Поэтому оба подвеса могут быть рекомендованы только для разомкнутых приборов, но здесь надо учитывать нелинейный характер зависимости перемещения от силы.

При расчете подвеса на четырех параллельных перемычках, расположенных в центральной плоскости пластины маятника получено, что подвес обладает малой жесткостью, а движение пластины маятника происходит путем поворота.

В случае схемы подвеса на четырех параллельных перемычках, разнесенных к краям пластины маятника получено, что пластина перемещается по оси чувствительности плоскопараллельно, но схема с разнесенными перемычками существенно жестче схемы с перемычками, находящимися в центре пластины маятника.

При расчете традиционного подвеса на двух перемычках рассматривалась идея, заключающаяся в придании схеме на двух перемычках, плоско-параллельного перемещения путем введения смещенной компенсационной силы.

При рассмотрении подвеса на попарно противоположнонаправленных перемычках, разнесенных к краям пластины маятника, получено, что он хотя и обеспечивает повышенную ударопрочность при ориентации ударных воздействий в плоскости пластины маятника и плоско параллельное перемещение пластины маятника, но имеет большую жесткость.

В результате сравнения различных схем подвесов была выбрана схема на попарно противоположнонаправленных перемычках, расположенных в центральной плоскости пластины маятника как обладающая малой жесткостью

$$C = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{3 \cdot L \cdot (d^2 + L \cdot (d + L / 3))}, \quad \text{где}$$

b - ширина перемычек подвеса; h - толщина перемычек подвеса; E - модуль упругости первого рода;

L - длина перемычек подвеса; d - расстояние от центра масс подвеса до края пластины маятника, к которому прикреплены перемычки подвеса;

и обеспечивающей повышенную ударопрочность.

В главе 3 была рассмотрена, выбранная в главе 2 схема подвеса с центрально расположенными попарно противоположнонаправленными перемычками с учетом конкретных технологических погрешностей, получающихся в результате травления монокристалла кремния.

В начале рассмотрим особенности подвеса, заключающиеся в смещении перемычек относительно общей плоскости. Причиной таких смещений может являться волнистость исходной кремниевой заготовки (рис 2 а).

При расчете погрешности, связанной с попарным смещением перемычек получено, что схема ведет себя неоднозначно в зависимости от направления действующей на нее вдоль оси чувствительности силы, т.к. при одном направлении силы все перемычки находятся в состоянии растяжения, а при другом - в состоянии сжатия.

В результате расчетов для случая когда все перемычки находятся в состоянии растяжения были получены окончательные уравнения неизвестными в которых является угол поворота  $\varphi$  и растягивающая сила N в перемычках.

$$\frac{2 \cdot N \cdot L}{E \cdot b \cdot h} - \frac{1}{4} \cdot (\varphi^2 \cdot (L + L \cdot (\operatorname{ch}(kL) + 1)) \cdot (\frac{1}{k \cdot L \cdot \operatorname{sh}(kL)} - \frac{1}{\operatorname{sh}^2(kL)})) -$$

$$- \frac{1}{4} \cdot \frac{P^2}{N^2} \cdot (L + L \cdot (\operatorname{ch}(kL) - 1)) \cdot (\frac{1}{\operatorname{sh}^2(kL)} - 3 \cdot \frac{1}{k \cdot L \cdot \operatorname{sh}(kL)})) =$$

$$= a \cdot \varphi - L \cdot \varphi^2 / 2$$

$$\varphi = \frac{P/N * (d + L/2) - a}{1/k * \frac{\operatorname{ch}(kL) + 1}{\operatorname{sh}(kL)} - L/2 - \frac{1}{2} * \frac{P}{N} * a}$$

где P- действующая сила ; а- расстояние между смещенными перемычками подвеса; k- постоянная дифференциального уравнения для растянутых перемычек подвеса;

Решая систему этих уравнений можно найти зависимость перемещения центра масс системы от действующей силы.

Решение системы проводилось аналитическим (с помощью системы "Reduce") и численными способами. С целью упрощения расчетов по достаточно громоздким выражениям, получающимся в результате преобразования уравнений в системе "Reduce" на языке "Microsoft C" была написана программа.

Программа, использующая численные методы была написана на языке "Microsoft C".

Был также произведен расчет погрешности попарного смещения перемычек для случая когда перемычки находятся в состоянии сжатия.

При расчете погрешности, связанной с попарным смещением перемычек из плоскости симметрии выбранной схемы подвеса получено, что:

- при увеличении расстояния между парами перемычек происходит увеличение жесткости подвеса, причем зависимость носит резко нелинейный характер;

- схема является неравножесткой в зависимости от действия ускорения по оси чувствительности, так как в зависимости от направления действующего ускорения все перемычки будут растянуты при малых деформациях или все сжаты. Жесткость схемы при направлении ускорения, когда перемычки находятся в состоянии растяжения больше жесткости схемы при направлении ускорения, когда перемычки находятся в состоянии сжатия;

- с уменьшением геометрических размеров подвесов происходит увеличение их начальных жесткостей. При этом качественный характер зависимостей остается таким же;

- для случая направления ускорения, когда все перемычки находятся в состоянии сжатия может иметь место эффект потери перемычками устойчивости. При этом резко изменяется угловая жесткость подвеса.

Если потеря устойчивости будет происходить в зоне рабочих углов смещения маятника, то это приведет к большим погрешностям прибора.

Потеря устойчивости будет наблюдаться и для случая первоначально растянутых перемычек, но при значительно больших силах и деформациях, чем для случая сжатых.

Рассчитана зависимость максимального перемещения центра масс маятника от расстояния между смещенными перемычками, при которой перемычки теряют устойчивость.

Был произведен совместный расчет погрешностей, связанных с попарной разнотолщинностью и попарным смещением перемычек. Причиной возникновения разнотолщинности может являться клиновидность исходной кремниевой заготовки. (рис. 26). Данная задача решалась для случаев когда разнотолщинные и смещенные перемычки находятся в состоянии растяжения и когда они находятся в состоянии сжатия.

Для случая когда перемычки находятся в состоянии сжатия была получена следующая зависимость максимального перемещения центра масс  $y_{ц.м.}$  от действующей силы  $P$ .

$$y_{ц.м.} = \left(d + \frac{L}{2}\right) * \\ * \frac{2 * \left(\frac{P}{N} * \left(d + \frac{L}{2}\right) - a\right) * \omega_1 * \omega_2 * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_1 * L}{2}\right) * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_2 * L}{2}\right)}{\omega_2 * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_2 * L}{2}\right) + \omega_1 * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_1 * L}{2}\right) - L * \omega_1 * \omega_2 * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_1 * L}{2}\right) * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_2 * L}{2}\right)} + \\ + \frac{P}{2 * N} * \frac{\left(\frac{2}{\omega_1} * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_1 * L}{2}\right) - L\right) * \left(\frac{2}{\omega_2} * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_2 * L}{2}\right) - L\right)}{\frac{1}{\omega_1} * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_1 * L}{2}\right) + \frac{1}{\omega_2} * \operatorname{tg}\left(\frac{\omega_2 * L}{2}\right) - L}$$

где  $N$  - сжимающая сила, действующая в перемычках подвеса;  $a$  - расстояние между смещенными перемычками подвеса;  $\omega_1$  - постоянная дифференциального уравнения для растянутых перемычек подвеса имеющих толщину  $h_1$ ;  $\omega_2$  - постоянная дифференциального уравнения для растянутых перемычек подвеса имеющих толщину  $h_2$ ;

Был также произведен расчет для случая когда попарно смещенные и разнотолщинные перемычки находятся в состоянии сжатия. Как в случае растяжения, так и в случае сжатия решение проводилось аналитическим (с помощью системы "Reduce") и численным методом. Как в случае аналитического, так и в случае численного решения на

языке "Microsoft C" были написаны соответствующие программы.

При совместном расчете погрешностей попарного смещения и попарной разнотолщинности перемычек было получено, что:

Погрешность, выражающаяся в попарной разнотолщинности перемычек, не влияет на качественный характер зависимостей начальных жесткостей подвесов от расстояния между парами смещенных перемычек. В данном случае также жесткость подвеса, когда перемычки находятся в состоянии растяжения больше, чем когда перемычки находятся в состоянии сжатия.

При изучении погрешности, связанной с разнотолщинностью перемычек выявлено, что в случае если погрешность ведет к суммарному уменьшению толщины перемычек, то схема становится менее жесткой, а в случае если погрешность ведет к суммарному увеличению толщины перемычек, то схема становится более жесткой.

В случае если имеется наличие погрешности, связанной с разнотолщинностью перемычек, но суммарная толщина перемычек подвеса остается такой же как в случае отсутствия погрешности, имеет место незначительное увеличение жесткости подвеса по сравнению с подвесом где отсутствует погрешность.

Были произведен расчет подвеса при воздействии удара 100 г полусинусоидальной формы с полупериодом 3 миллисекунды по осям подвеса ( $O\xi$ ) и плеча маятника ( $O\zeta$ ).

Для выбора расчетных схем при воздействии ударов по осям подвеса ( $O\xi$ ) и плеча маятника ( $O\zeta$ ) были оценены соответствующие частоты собственных свободных колебаний по этим осям.

Показано, что потеря устойчивости перемычек происходит при величине воздействия превышающей 100г и, что в обоих случаях процесс является квазистатическим.

Глава 4 посвящена экспериментальным исследованиям подвеса акселерометра и опытных образцов акселерометров.

Исследование макета подвеса акселерометра проводилось на экспериментальной установке, включающей в свой состав оптическую делительную головку, макет подвеса, направляющую с расположенными на ней фотодатчиком и блок электронной аппаратуры.

На экспериментальной модели подвеса моделировалась погрешность, выражающаяся в попарном смещении перемычек подвеса из плоскости симметрии пластины маятника.

В ходе экспериментов измерялась жесткость подвеса с попарно смещенными перемычками при различных направлениях силы, действующей на маятник. Было получено, что подвес является неравножестким, причем жесткость для случая когда перемычки находятся в состоянии растяжения больше чем жесткость в случае когда перемычки находятся в состоянии сжатия.

Был произведен эксперимент по измерению начальных жесткостей подвеса для различных величин попарных смещений перемычек. Получено, что с увеличением расстояния между парами перемычек происходит увеличение жесткости подвеса, причем зависимость носит нелинейный характер.

При проведении эксперимента по определению максимального перемещения центра масс подвеса от расстояния между смещенными парами перемычек было получено, что качественный характер экспериментальной зависимости совпадает с характером зависимости, полученной с помощью теоретических расчетов.

Таким образом на экспериментальной установке были качественно подтверждены основные теоретически полученные зависимости.

Испытания опытных образцов акселерометров проводились на разработанной группой исследователей МГТУ под руководством профессора Коновалова С.Ф., системе автоматического контроля параметров акселерометров, включающей в свой состав двухкоординатную поворотную установку, управляемую от ПЭВМ.

Испытывалась партия акселерометров КА100 и КА200, имеющих выбранную в данной работе схему подвеса на попарно противоположнонаправленных перемычках, расположенных в центральной плоскости пластины маятника.

При изготовлении этого подвеса использовалась рекомендация данной работы о допустимости попарного смещения перемычек не более 2 мкм.

В результате испытаний партии опытных образцов акселерометров КА100 и КА200 проводившихся группой исследователей МГТУ на АСК, получены вполне удовлетворительные

результаты, позволяющие сделать вывод, что в данном случае удалось избежать негативных эффектов, возникавших при испытаниях ряда других приборов с упругими подвесами.

В заключении приводятся основные результаты и выводы работы.

В приложениях представлен акт внедрения на предприятии НПОАП, приведены блок-схемы и листинги программ расчета погрешностей.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Рассмотрены семь различных схем упругих подвесов акселерометров.

На основании анализа и расчетов семи данных схем была выбрана рациональная схема подвеса для маятникового компенсационного акселерометра. Она использует попарно противоположнонаправленные перемычки, находящиеся в центральной плоскости пластины маятника. Схема обеспечивает малую жесткость при перемещении маятника по оси чувствительности прибора и повышенную ударопрочность по сравнению с другими рассмотренными схемами подвесов.

Рассмотрены различные причины возникновения технологических погрешностей, получающихся при изготовлении подвесов маятникового компенсационного акселерометра путем травления монокристалла кремния.

Эти технологические погрешности способны приводить к появлению ошибок акселерометра из-за неравножесткости подвеса и из-за потери устойчивости перемычек подвеса при смещении маятника по оси чувствительности.

Установлено, что наибольший интерес представляет погрешность, связанная с попарным смещением перемычек из плоскости симметрии схемы. Оценено также влияние погрешности связанной с попарной разнотолщиной перемычек.

Указанные несовершенства изготовления подвесов могут иметь очень большое влияние на погрешность акселерометров разомкнутого типа (погрешность больше 10%). Для акселерометров компенсационного типа указанные несовершенства могут приводить к погрешностям смещения нуля и нестабильности масштабного коэффициента, уровень которых значительно ниже чем для разомкнутых приборов, но на фоне

высокой точности компенсационных приборов они являются ощутимыми и требуют устранения.

Выведены расчетные соотношения, позволяющие оценить влияние технологических погрешностей изготовления перемычек на работу акселерометра.

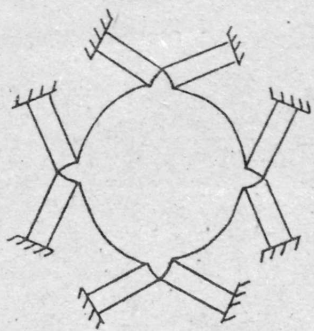
На основании расчетов определены технологические допуски на изготовление подвесов маятников и выполнена соответствующая конструкторская документация.

На экспериментальной установке изучены и качественно подтверждены теоретически полученные результаты.

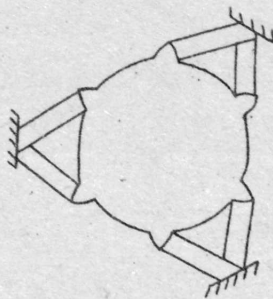
Исследованная схема подвеса установлена в конструкции опытных образцов акселерометров, разработанных кафедрой ИУ-2 МГТУ им. Н.Э.Баумана. Испытания приборов подтвердили правильность основных положений данной диссертации.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

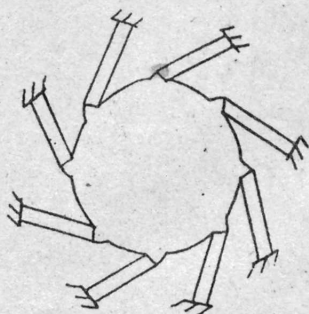
1. Коновалов С.Ф., Лапин А.А., Юрасов Ю.В. Оценка основных параметров различных типов центрального подвеса при создании однокомпонентного удароустойчивого компенсационного акселерометра//ПК-техника. Сер. V. -1994. -Вып.1. -С.87-92.
2. Коновалов С.Ф., Лапин А.А., Юрасов Ю.В. Удароустойчивый подвес акселерометра // Гироскопия и навигация (СПб). -1995. -№3. -С.75.
3. Коновалов С.Ф., Юрасов Ю.В. Выбор рациональной схемы подвеса при создании удароустойчивого однокомпонентного акселерометра//ПК-техника. Сер. V. -1994. -Вып.1. -С.93-99.
4. Коновалов С.Ф., Юрасов Ю.В. Учет технологических погрешностей упругого подвеса акселерометра, возникающих при травлении монокристалла кремния// Информация и новые технологии (Киев). -1995.-№1. -С. 39-40.
5. Konovalov S.F., Lapin A.A., Yurasov Yu.V.. The shock-resistant suspension of the accelerometer//Materials of the 2nd Saint-Petersburg Conference on Gyroscopic Technology and navigation - Saint-Petersburg, -1995. -P.72-78.



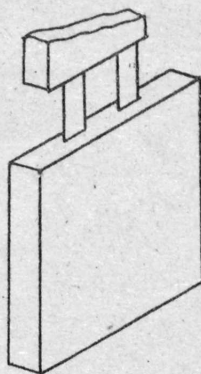
а)



б)

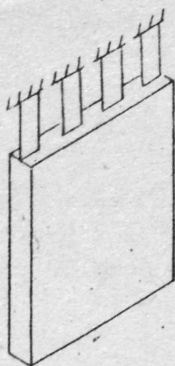


в)

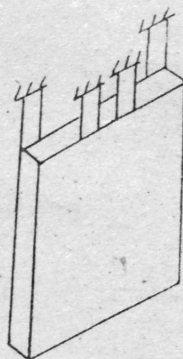


г)

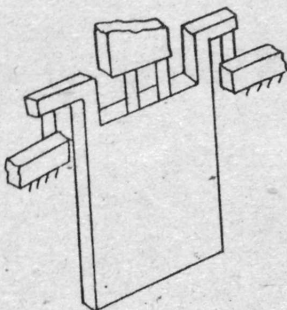
Рис. 1. Схемы упругих подвесов акселерометров



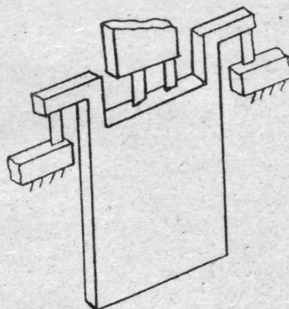
д)



е)

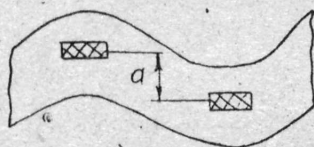


ж)

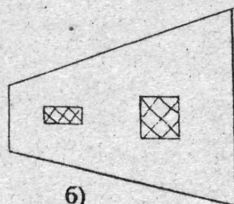


з)

Рис. 1. Продолжение



а)



б)

Рис. 2. Несовершенство исходной заготовки из кремния