

УДК 629.7.05

На правах рукописи

Сео Дже Бом

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ
И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧИХ РЕЖИМОВ
В КОМПЕНСАЦИОННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРАХ
ТИПА Q-flex и Si-flex

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



МОСКВА – 2012

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана на кафедре приборов и систем ориентации, стабилизации и навигации.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Коновалов Сергей Феодосьевич

Официальные оппоненты:

Мельников Валерий Ефимович
доктор технических наук, профессор,
МАИ им. С. Орджоникидзе

Соловьёв Владимир Михайлович
кандидат технических наук, доцент,
ЗАО «Инерциальные технологии
«Технокомплекса»

Ведущая организация:

ФГУП «ЦЭНКИ» филиал «НИИ
ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ им.
академика В. И. КУЗНЕЦОВА»,
г. Москва

Защита диссертации состоится *27 июня* 2012 г. в *12 час. 00 мин.*
на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н. Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н. Э. Баумана.

Отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, МГТУ им. Н. Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан *25 мая* 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Бурый Е. В.

900

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Кварцевые и кремниевые компенсационные маятниковые акселерометры широко применяются в различных отраслях, а именно в навигации, при бурении нефтяных и газовых скважин, в строительстве, в системах мониторинга и так далее.

К точностным характеристикам приборов предъявляются высокие требования, в связи с чем оптимизация их параметров с целью улучшения точностных и динамических характеристик приборов, продолжительно работающих в жёстких условиях внешних механических воздействий и изменяющейся температуры, является весьма важной задачей.

В кварцевых и кремниевых компенсационных маятниковых акселерометрах необходимо обеспечить стабильный уровень нулевого сигнала и стабильный масштабный коэффициент. Требуется также высокая линейность выходной характеристики.

Исследованиями многих российских и зарубежных авторов установлено, что на точность акселерометров в первую очередь влияют параметры компенсационного датчика момента, маятникового узла, механических элементов соединения между собой магнитопроводов сдвоенного дифференциального плунжерного датчика момента и элементов крепления магнитопроводов в корпусе акселерометра, а также параметры электронного блока компенсационного контура. Однако в известных публикациях отсутствует информация об оптимизации указанных параметров с позиций получения максимального диапазона измеряемых акселерометром ускорений при минимальном нагреве прибора, получения наивысшей линейности и стабильности масштабного коэффициента и уровня нулевого сигнала. Недостаточно полно выявлены причины, порождающие погрешности акселерометров рассматриваемого типа.

Цели и задачи исследования.

В диссертации сформулированы критерии, по которым проводится оптимизация параметров акселерометра. На основании их использования и моделирования работы акселерометров определены:

- параметры сдвоенного дифференциального плунжерного датчика момента, обеспечивающие получение максимального диапазона измеряемых ускорений при минимуме выделяемой в приборе мощности;
- условия сбалансированности маятника прибора, позволяющие обеспечить высокую линейность выходной характеристики;
- условия минимальных возмущающих воздействий на маятник, приводящие к неустойчивости нулевого сигнала акселерометра;
- методики экспериментального исследования акселерометров и с помощью современной испытательной техники проведены эксперименты, подтверждающие справедливость теоретических выводов;
- технологические вопросы, позволяющие реализовать на практике полученные в работе рекомендации.

Работы выполнены в МГТУ им. Н. Э. Баумана. Экспериментальные исследования проводились на оборудовании корпорации PoongSan FNS, Республика Корея и МГТУ им. Н. Э. Баумана в период с 2000 по 2011 годы.

Объектом исследования является компенсационный акселерометр с кремниевым или кварцевым маятниковым узлом, содержащим установочную рамку, упругий подвес и лопасть с элементами маятника. Акселерометр использует емкостной датчик угла, сдвоенный плунжерный датчик силы и плоский газовый демпфер. В акселерометре реализована аналоговая система обратной связи астатического типа.

Предметом исследования является выявление влияния параметров элементов акселерометра на его эксплуатационные и точностные характеристики, а также определение оптимальных значений и соотношений параметров, при которых акселерометр обеспечивает наилучшие метрологические характеристики.

Методы исследований. В диссертации используются как классические методы аналитического исследования и оптимизации параметров акселерометров, так и методы математического моделирования состояний магнитных цепей, упруго-прочностных состояний элементов акселерометра с использованием программного продукта ANSYS, применены методы теории автоматического регулирования. Экспериментальная часть работы в основном базируется на стандартизированных методиках испытаний, в частности на рекомендованных международными стандартами IEEE Standard. Часть методик испытаний оригинальна и разработана при участии автора диссертации.

Научная новизна результатов исследования. Разработаны методы оптимизации параметров акселерометров, позволяющие улучшить их точностные и динамические характеристики. На их основании получены следующие новые знания:

1. Разработана новая методика оптимизации моментных датчиков прибора и получены оптимальные соотношения их размеров.
2. Определены причины неравномерного распределения магнитного поля в кольцевых зазорах магнитопроводов и разработаны методы устранения вызванных этим распределением разбалансировок маятников.
3. Определены причины искажения формы упругих подвесов и найдены оптимальные варианты конструкций упругих подвесов с токоподводами.
4. Установлена основная причина возникновения нелинейности выходной характеристики акселерометра, заключающаяся в разбалансировке маятника.
5. Разработаны методики экспериментального исследования узлов акселерометров, а также сборочная оснастка, позволяющая осуществлять регулировку и юстировку акселерометров с целью получения высокой точности.

Практическая ценность работы. На основе проведенной оптимизации получены рекомендации, позволившие расширить динамический диапазон и устранить ряд погрешностей акселерометров со сдвоенным плунжерным компенсационным датчиком. Предложены методы расчёта и регулировки приборов, позволившие получить высокую линейность их выходной характеристики. Созданы и исследованы кремниевый (Si-flex) и кварцевый (Q-flex) акселерометры высокой точности.

Достоверность полученных результатов следует из хорошего совпадения результатов экспериментов и теоретических выводов. Эксперименты проведены с помощью передовой испытательной техники ведущих мировых производителей оборудования Acutronic, Ling Electronics, Hewlett-Packard.

Реализация и внедрение результатов осуществлены путём создания новых кварцевых и кремниевых приборов, подтверждено Актом внедрения от корейской

корпорации PoongSan FNS. Оригинальные конструктивные решения, выполненные автором, защищены патентами США, Франции, Российской Федерации и Республики Корея.

На защиту выносятся:

1. Оптимизацию параметров магнитных систем компенсационных акселерометров следует проводить по введённому автором критерию добротности $a/\sqrt{P}$, где a – измеряемое прибором ускорение и P – потребляемая при этом прибором мощность. Введённый критерий позволяет до 30 % расширить динамический диапазон прибора.
2. Причиной неравномерного распределения магнитного поля в кольцевых зазорах магнитопроводов и соответствующей погрешности акселерометра является магнитная неоднородность полюсного наконечника.
3. Усилие сжатия пакета магнитопроводов с маятником следует определять с помощью разработанной автором методики. Для оптимальной сборки акселерометра необходимо использовать разработанную автором технологическую аппаратуру.
4. Оригинальные конструкции акселерометра.
5. Оригинальные методики экспериментального определения статических и динамических характеристик акселерометра, позволяющие выявить ряд неизвестных ранее причин возникновения его погрешностей.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на 3 научно-технических конференциях (на VII международной конференции по интегрированным навигационным системам, г. Санкт-Петербург 2000 год; на XIV международной конференции по интегрированным навигационным системам, г. Санкт-Петербург 2007 год; на XXVI конференции памяти Н. Н. Острякова 2008 год) и обсуждались на научном семинаре кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Публикации. Основные результаты работы изложены в 5 публикациях, в том числе в двух статьях в журналах, входящих в перечень ВАК. Получены 3 патента.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа изложена на 239 листах машинописного текста и содержит 174 рисунка, 20 таблиц. Список литературы содержит 61 библиографическую ссылку.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дан обзор и анализ работ, относящихся к теме диссертации. Рассмотрены вопросы, связанные с актуальностью темы. Определены цели, задачи и методики исследования. Охарактеризована структура диссертации.

В **первой главе** выполнен анализ литературных и патентных источников, а также свойств конструкционных материалов для акселерометров, осуществлён выбор конструктивных схем акселерометров с кварцевым (Q-flex) и кремниевым (Si-flex) маятниками для дальнейшей оптимизации и исследования. Схемы акселерометров представлены на рис. 1 и 2.

Осуществлён выбор конструкции и формы токоподводов, рассмотрены особенности проектирования маятникового узла и магнитной системы акселерометра, обеспечивающие совпадение центра приложения компенсационной силы с центром масс маятника путём формирования арочных выборок в кольцевых зазорах магнитопроводов плунжерных компенсационных датчиков и окон в лопасти маятника.

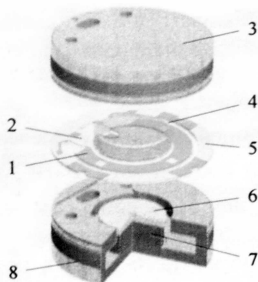


Рис. 1. Конструктивная схема акселерометра Q-flex: 1 – лопасть маятника; 2 – упругая балочка подвеса маятника; 3, 8 – магнитная система; 4 – катушка датчика силы; 5 – кольцо маятникового узла с установочными платиками; 6 – полюсный наконечник; 7 – постоянный магнит.

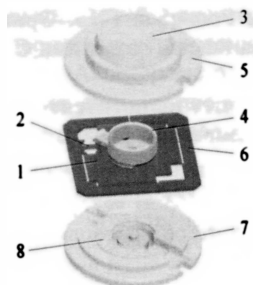


Рис. 2. Конструктивная схема акселерометра Si-flex: 1 – лопасть маятника; 2 – упругая балочка подвеса маятника; 3, 7 - магнитная система; 4, 8 – кварцевые кольца; 5 – катушка датчика силы; 6 – рамка маятникового узла с установочными платиками.

Приведены конструкции разработанных автором кремниевого и кварцевого акселерометров, предназначенные для дальнейшего исследования. Покомпонентное изображение одного из разработанных приборов Q-flex приведено на рис. 3.

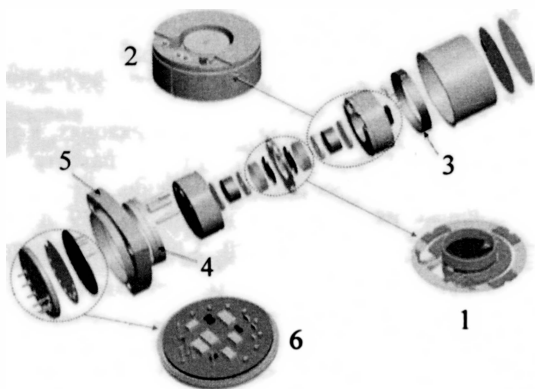


Рис. 3. Покомпонентное изображение маятникового акселерометра Q-flex: 1 – маятниковый узел прибора; 2 – магнитная система; 3 – соединительное крепёжное кольцо; 4 – базировующее крепёжное кольцо; 5 – монтажный фланец прибора; 6 – гибридная схема компенсационного контура.

Во второй главе представлены результаты оптимизации магнитных систем двоянного магнитоэлектрического датчика силы акселерометра как с точки зрения обеспечения максимума общепринятого критерия добротности датчика силы $КД_{дс} = F/\sqrt{P}$, где F – сила, развиваемая датчиком при выделении мощности P , так и по введённому критерию добротности акселерометра $КД_{акс} = a/\sqrt{P}$, где a – ускорение, измеряемое акселерометром с указанным датчиком силы. Показано, что использование критерия добротности $a/\sqrt{P}$ позволяет получить акселерометр с большим диапазоном измерения ускорений, чем при использовании общепринятого критерия. Вид зависимостей критериев добротности $КД_{дс} = F/\sqrt{P}$ и $КД_{акс} = a/\sqrt{P}$ представлен на рис. 4.

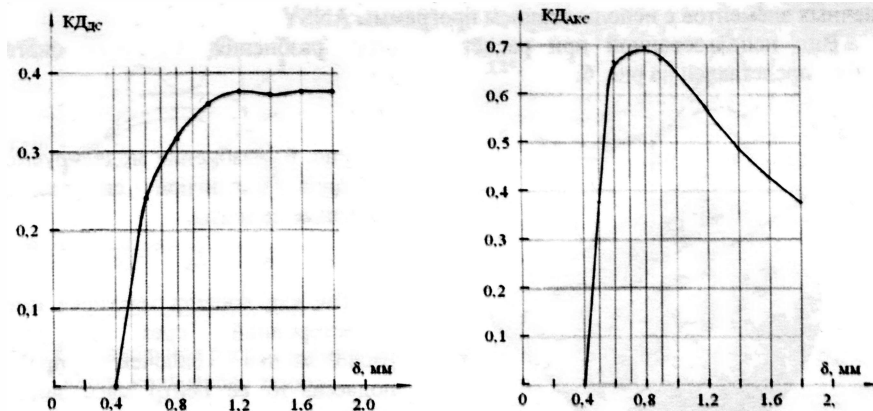


Рис. 4. Зависимости критериев добротности датчика силы KD_D и акселерометра KD_{AKC} от величины рабочего зазора δ датчика силы.

Установлена важность определения точек истинного приложения к маятнику инерционной, компенсационной и газодинамической сил, возникающих в процессе работы акселерометра. Несовпадение точек приложения этих сил определяется конструкцией прибора и приводит к появлению моментов и сил, деформирующих балочки упругого подвеса маятника, и к возникновению погрешностей – см. рис. 5.

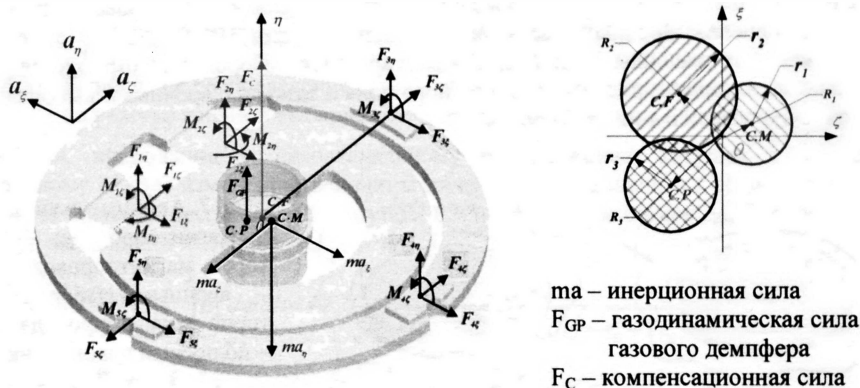


Рис. 5. Схема нагружения маятникового узла акселерометра.

Показано, что технологические разбросы смещений r_1 , r_2 , r_3 являются причиной неповторяемости ряда погрешностей акселерометров (в первую очередь погрешностей смещения нуля прибора и нелинейности его выходной характеристики).

С целью нахождения положения точки приложения к маятнику компенсационной силы в главе проведено моделирование магнитного поля в

магнитной системе сдвоенного плунжерного датчика силы, выполненное методом конечных элементов с использованием программы ANSYS.

Вид использованной при расчётах модели разбиения магнитной системы датчика представлен на рис. 6.

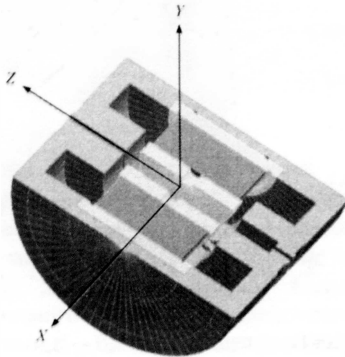


Рис. 6. Разбиение моделируемого варианта магнитной системы на конечные элементы.

Так как лопасть маятника имеет односторонний срез в месте расположения балочек упругого подвеса, то её центр масс заметно смещен в сторону, противоположную срезу.

По конструктивным и технологическим причинам катушки плунжерного датчика крепятся к лопасти в центральной точке, определяемой по наружной цилиндрической поверхности рамки.

Это смещение может быть уменьшено путём выполнения балансировочного отверстия в лопасти (см., например, рис. 5). Однако полной балансировки маятника достигнуть не удаётся. В результате приходится смещать компенсационную силу относительно центра катушки плунжерного датчика. Обычно это обеспечивается путём выполнения арочных выборок в кольцевом зазоре магнитной системы плунжерного датчика силы. Выполнение таких арочных выборок иллюстрируется рис. 7. Однако характер распределения магнитного поля в зазорах с арочными выборками недостаточно освещён в литературе.

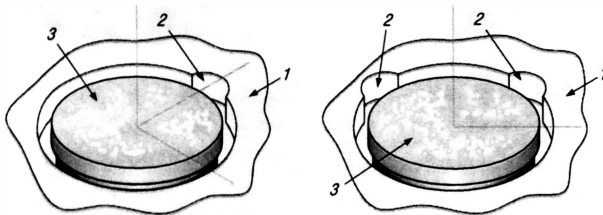


Рис. 7. Арочные выборки в магнитопроводе: 1 – торец магнитопровода; 2 – арочные выборки в торце магнитопровода; 3 – полюсный наконечник.

Рассчитан методом математического моделирования с использованием программы ANSYS характер радиального B_r и аксиального B_x распределений магнитного поля в различных сечениях кольцевого зазора на участках равномерной кольцевой щели, показанные на рис. 8 и 9, а на участке арочной выборки B_1 - на рис. 10.

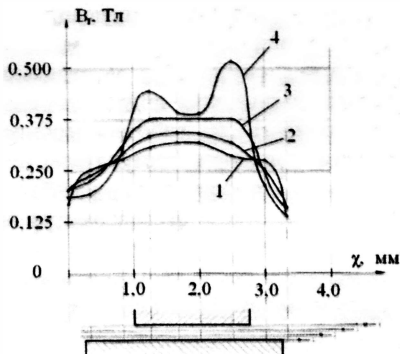


Рис. 8. Радиальное распределение B_r вдоль кольцевого зазора.

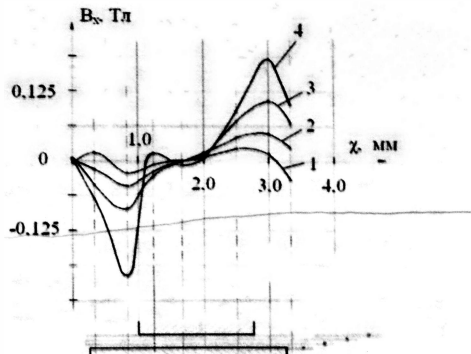


Рис. 9. Аксиальное распределение B_x вдоль кольцевого зазора.

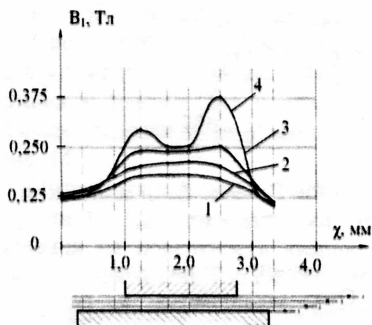


Рис. 10. Радиальное распределение B_l на участке арочной выборки.

маятника, приводящие к некоаксиальному расположению катушек в зазоре и связанному с этим изменению величины силы F по сравнению с её значением F_0 при коаксиальном расположении катушки и к появлению момента M , действующего вокруг оси подвеса маятника.

$$F = 2 \frac{n_k}{h_k} I r_k \int_{-h_k}^{+h_k} \int_0^\pi B_\varphi d\varphi dh = 4 F_0 \frac{l}{\sqrt{r_k^2 - e_0^2 - 2e_0 \varepsilon h_k} + \sqrt{r_k^2 - e_0^2 + 2e_0 \varepsilon h_k}};$$

$$M = 2 \frac{n_k}{h_k} I r_k \int_{-h_k}^{+h_k} \int_0^\pi B_\varphi \cos \varphi \left(l - \frac{e_0 + h \varepsilon}{r_k} \cos \varphi \right) d\varphi dh = -F_0 e_0,$$

где I , n_k , r_k и h_k – ток, число витков, средний радиус и высота катушки.

Установлено, что радиальное и угловое смещения катушек в кольцевом зазоре датчика не являются определяющими в общей погрешности акселерометра.

Экспериментальным исследованием ряда магнитных систем плунжерных датчиков выявлено, что в кольцевых зазорах магнитных систем (без арочных выборок) имеет место неравномерное распределение магнитной индукции B в зависимости от угловой координаты φ .

По известным распределениям B и B_l может быть найдена точка O_R приложения равнодействующей компенсационной силы, приложенной к маятнику. Её смещение k относительно центральной точки катушки O_l определяется формулой:

$$k = \frac{(B - B_l^*) \cdot W \cdot R_s \cos \Theta}{B_l^* (\pi R_s - W) + B_l^* \cdot W}.$$

Исследовано влияние радиальных смещений катушек сдвоенного плунжерного датчика в кольцевом зазоре e_0 и угловых ε смещений катушек

Это является главной причиной, приводящей к смещению компенсационной силы от центра катушки и к смещению точки приложения этой силы к маятнику (разбалансировке). Показано, что величина неравномерности B_ϕ у отдельных магнитных систем может доходить до 10% от среднего значения индукции B_0 и оказывает значительно большее влияние на точность и работоспособность акселерометра, чем возможные по технологическим причинам поступательные и угловые смещения катушек плунжерного датчика относительно расчётного положения. В частности B_ϕ может являться причиной отказа акселерометра при измерении больших ускорений. Экспериментально установлено, что распределение B_ϕ у ряда магнитных систем может необратимо меняться после термоциклических воздействий. Графики B_ϕ для случая «хорошей» и «плохой» магнитных систем показаны на рис. 11 и 12.

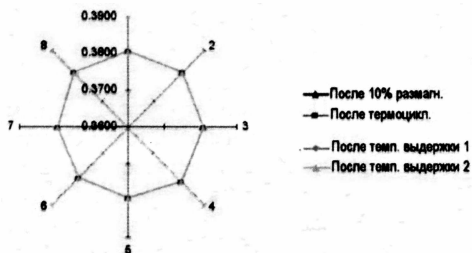


Рис. 11. График B_ϕ для «хорошей» магнитной системы.

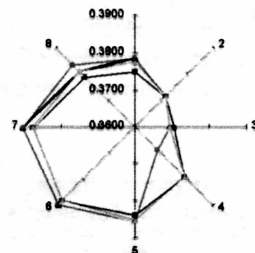


Рис. 12. График B_ϕ для «плохой» магнитной системы.

Многочисленные экспериментальные исследования позволили установить причину возникновения зависимости B_ϕ . Она заключается в радиальной неоднородности магнитных свойств полюсного наконечника.

Экспериментальные исследования, выполненные на 500 макетах магнитных систем, позволили установить причину возникновения зависимости B_ϕ . Она заключается в радиальной неоднородности магнитных свойств полюсного наконечника. Результаты одного из экспериментов, подтверждающих влияние полюсного наконечника на распределение B_ϕ , представлены на рис. 13. Здесь даны распределения B_ϕ у одной и той же магнитной системы при последовательной фиксации полюсного наконечника под углами 0° , 90° , 180° , 270° . Видно, что графики B_ϕ разворачиваются в соответствии с угловым положением полюсного наконечника.

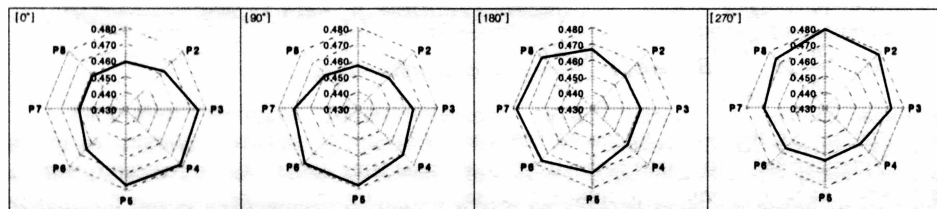


Рис. 13. Распределения B_ϕ при последовательной фиксации полюсного наконечника под углами 0° , 90° , 180° и 270° .

В работе даны рекомендации по устранению неравномерного распределения магнитной индукции по кольцевому зазору магнитопроводов датчика силы. Они заключаются в выборе материала для полюсного наконечника, отборе полюсных наконечников, в изготовлении шихтованных полюсных наконечников и так далее. Реализация этих рекомендаций снижает на порядок неравномерность распределения индукции в кольцевом зазоре.

Показана целесообразность намеренного введения неравномерного распределения B_ϕ для корректировки положения точки приложения к маятнику компенсационной силы вместо выполнения кольцевого зазора с арочными выборками. Регулирование B_ϕ заключается как в снятии металла с отдельных участков цилиндрической поверхности полюсного наконечника после экспериментального определения распределения B_ϕ в кольцевом зазоре, так и в создании в полюсном наконечнике участков с изменёнными магнитными свойствами посредством создания наклёпа.

Третья глава посвящена исследованию и оптимизации параметров маятникового узла акселерометра.

Проведено моделирование состояния маятника методом конечных элементов с использованием программы ANSYS, определены частоты основных мод колебаний маятника и напряжения в его элементах при максимальных перегрузках и при перемещениях маятника в зазорах. Основные моды колебаний маятника приведены на рис. 14.

Интерференционным методом проведено экспериментальное измерение деформаций балочек маятника толщиной 20 мкм, возникающих вследствие напыления на поверхность кварца металлического токоподвода (подложка 20 нм титана и на неё 0,2 мкм золота). Фото кварцевой пластины дано на рис. 15.

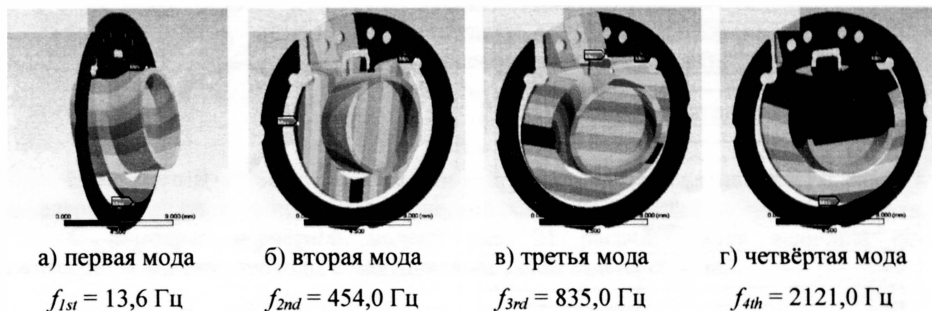


Рис. 14 Результаты исследования мод колебаний маятника.

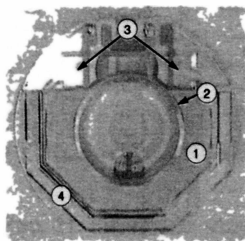


Рис. 15. Фотография кварцевой пластины маятникового узла с напылёнными на поверхности упругих балочек подвеса маятника металлическими токоподводами. Здесь обозначено: 1 – лопасть маятника с подвижным электродом датчика угла; 2 – катушка датчика силы с переходной шайбой; 3 – балочки с токоподводами; 4 – наружная установочная рамка с платиками.

На рис. 16 и рис. 17 показаны профили поперечных сечений упругих балочек до напыления металла и после напыления. Здесь: x – координата точки отклонения; y – отклонение от плоскостности.

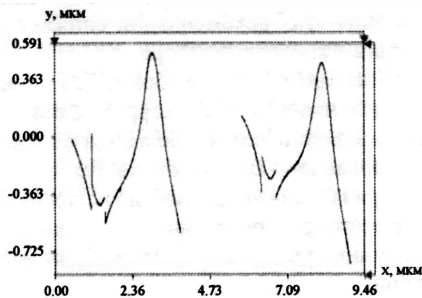
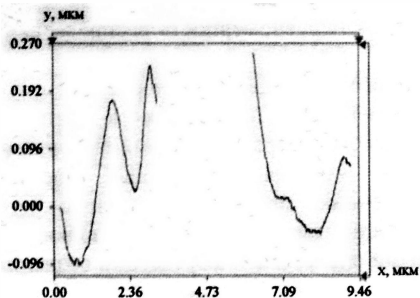


Рис. 16. Профиль балочки до напыления. Рис. 17. Профиль балочки после напыления.

Выявлены температурные погрешности акселерометра (скачкообразные изменения нулевого сигнала в процессе плавного изменения температуры), связанные с наличием искажения формы балочек упругого подвеса вследствие напыления металла. Рис. 18 иллюстрирует временные графики температуры в камере и скачкообразные изменения выходного сигнала акселерометра в положении 0g, график изменения выходного сигнала в зависимости от температуры, а также температурный гистерезис выходного сигнала.

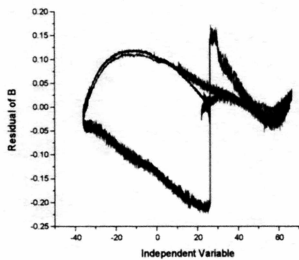
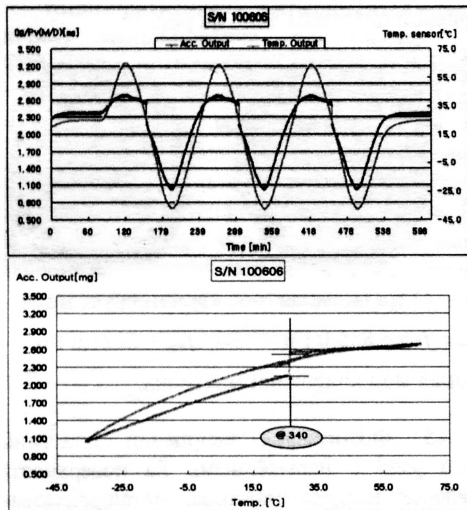


Рис. 18. Графики изменения температуры, выходного сигнала акселерометра и температурного гистерезиса.

Для акселерометра без скачкообразных изменений формы балочек упругого подвеса аналогичные графики приведены на рис. 19.

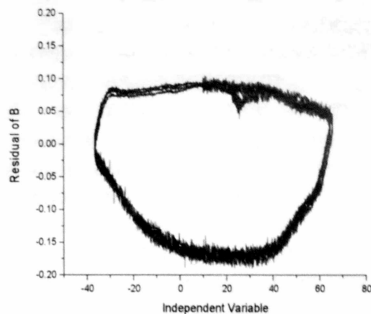
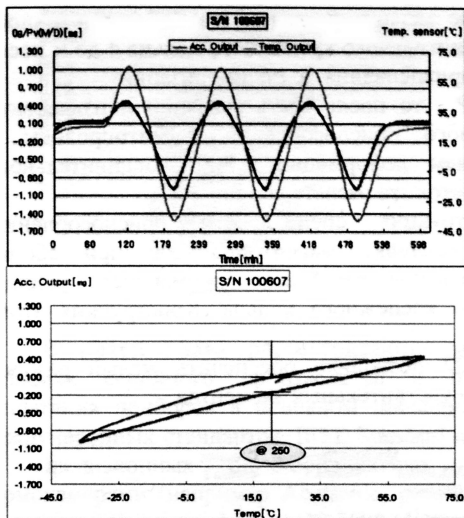
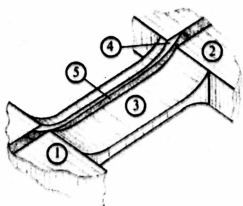


Рис. 19. Графики изменения температуры, выходного сигнала акселерометра и температурного гистерезиса.

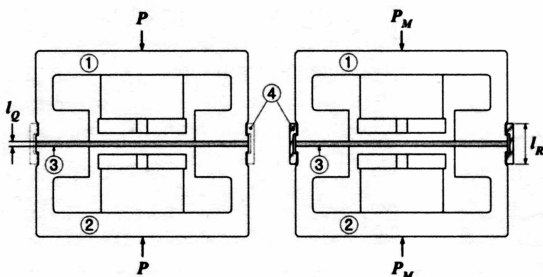
Экспериментально подтверждено, что деформация балочек упругого подвеса снижается в 2,5 раза при напылении металла в канавки, имеющие глубину 1/2 толщины упругих балочек – см. рис. 20. Это способствует как уменьшению нулевого сигнала акселерометра, так и обеспечивает температурную стабильность.



1 – лопасть маятника; 2 – наружное установочное кольцо; 3 – балочка упругого подвеса; 4 – канавка в кварце балочки; 5 – токоподвод на дне канавки.

Рис. 20. Балочка маятникового узла.

В четвёртой главе проводятся результаты исследования влияния на параметры акселерометра конструкций технологической сборочной оснастки и способов сборки. С помощью расчётной модели рис. 21 рассчитывается величина сил, сжимающих магнитопроводы с маятниковым узлом при их сборке.



Здесь обозначено: 1 и 2 – магнитопроводы датчика силы; 3 – установочное кварцевое кольцо с платиками; 4 – соединительное кольцо.

Рис. 21. Расчётная модель исследования соединительного крепёжного кольца.

На модели показано расположение магнитопроводов 1 и 2, установочного кварцевого кольца 3 с пластиками и соединительного крепёжного кольца 4 до и после приклеивания кольца. Если в процессе приклеивания и полимеризации клея магнитопроводы сжать усилием P , то после полимеризации и извлечения чувствительного элемента из сборочного приспособления магнитопроводы и маятниковый узел будут сжаты усилием деформации P_M соединительного крепёжного кольца. В диссертации дана методика расчёта усилия P_M .

Разработана и внедрена конструкция специального приспособления, обеспечивающего точную взаимную выставку магнитопроводов при сборке чувствительного элемента прибора, создание расчётного сжимающего усилия, установку и приклейку соединительного крепёжного кольца. Конструкция этого приспособления иллюстрируется рис. 22.

Внедрение приспособления рис. 22 позволило обеспечить малый разброс параметров акселерометров после сборки чувствительных элементов.

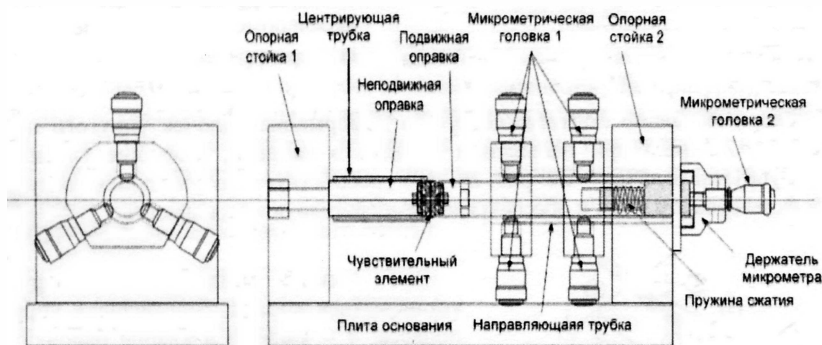
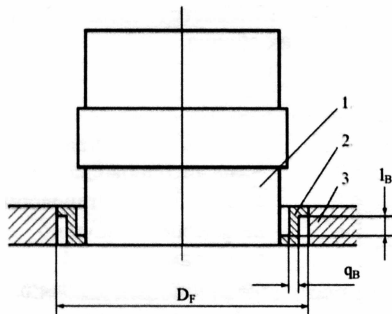


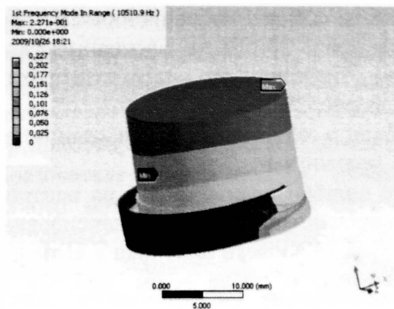
Рис. 22. Специальное приспособление для прецизионной сборки.

Сборка из двух магнитных систем с маятниковым узлом и соединительным крепёжным кольцом (то есть чувствительный элемент акселерометра) укрепляется во фланце прибора с помощью упругого базировочного крепёжного кольца - см. рис. 23.



На рис. 23 обозначено: 1 – чувствительный элемент прибора; 2 – упругое базировочное крепёжное кольцо; 3 – фланец прибора; D_F – диаметр фланца; l_B и q_B – геометрические параметры базировочного крепёжного кольца.

Рис. 23. Схема крепления чувствительного элемента во фланце акселерометра.



Рассчитаны частоты колебаний чувствительного элемента, укреплённого в корпусе. Первая мода колебаний чувствительного элемента акселерометра на базирующем крепёжном кольце соответствует частоте 10 кГц - см. рис. 24.

Рис. 24. Первая мода колебаний чувствительного элемента.

В пятой главе рассматриваются методики испытаний акселерометров в условиях серийного производства и приводятся результаты экспериментов. Испытания приборов в основном проводились в соответствии с рекомендациями международных стандартов IEEE Standard и включали в себя статические испытания на прецизионных двухкоординатных (двухосных) поворотных столах с термокамерами (например Acutronic, рис. 25), а также динамические испытания на прецизионной центрифуге АСТ-3000 (Acutronic) – см. рис. 26.



Рис. 25. Двухосных поворотный стол Acutronic с термокамерой.

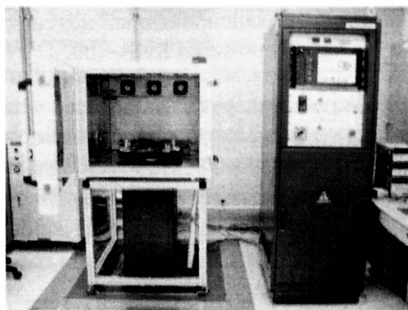


Рис. 26. Центрифуга АСТ-3000 с температурной камерой.

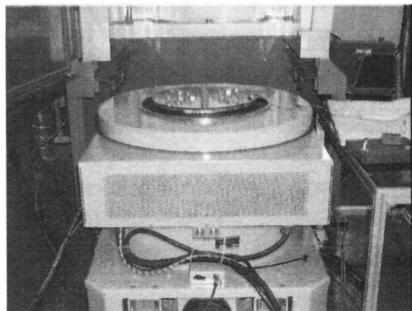


Рис. 27. Вибрационный стенд фирмы Ling Electronics.

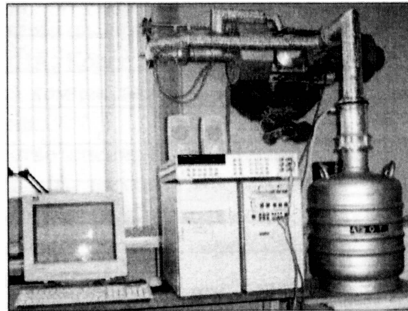


Рис. 28. Автоматизированная испытательная система ATS.

Испытания приборов проводились также на стендах вибрационных и ударных воздействий фирмы Ling Electronics – см. рис. 27. Часть экспериментальных исследований проводилась в МГТУ им. Баумана на автоматизированной испытательной системе АСТ, представленной на рис. 28.

В пятой главе даны результаты статических и динамических испытаний партий акселерометров с кремниевыми и кварцевыми маятниками.

Среди них - эксперименты по проверке ошибки нелинейности на центрифуге для акселерометров КНА-200 с несбалансированным и со сбалансированным маятником (до установки балансировочного груза на лопасти маятника и выполнения балансировочного отверстия в лопасти маятника, и после – см. рис. 29 и 30 соответственно).

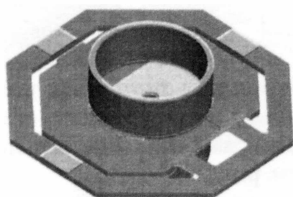


Рис. 29. Несбалансированный маятник акселерометра КНА-200.

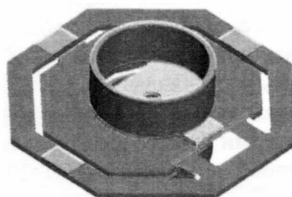


Рис. 30. Сбалансированный маятник акселерометра КНА-200.

Важнейшим результатом явилось экспериментально установленное влияние разбалансировки маятника на линейность выходной характеристики акселерометра. Результаты испытания образцов приборов КНА-200 с несбалансированным и со сбалансированным маятниками представлены на рис. 31.

Ошибки линейности выходных характеристик акселерометров

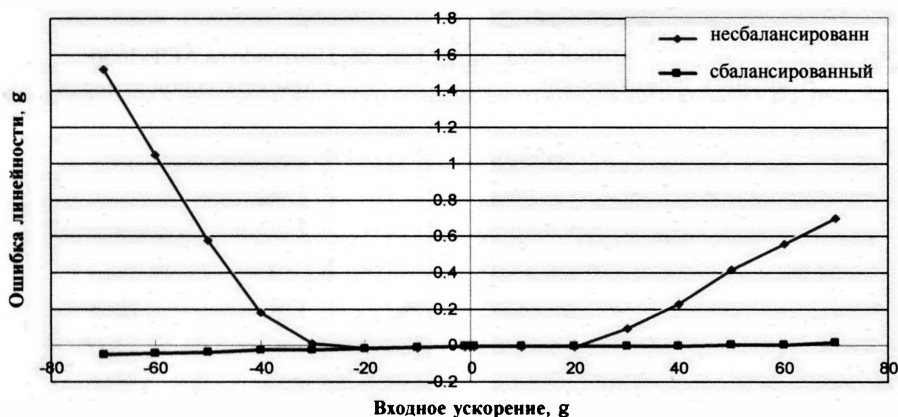


Рис. 31. Графики испытаний образцов акселерометров КНА-200 с несбалансированным и со сбалансированным маятниками.

В связи со значительной стоимостью экспериментов на прецизионном испытательном оборудовании в диссертационной работе рассмотрены методы исследования акселерометров без испытательных стендов. При их реализации осуществляется имитация внешнего воздействия путём введения в компенсационный контур прибора определённым образом формируемых сигналов от цифроаналогового преобразователя интерфейсной платы компьютера. Показана эффективность указанного метода для условий серийного производства приборов. Применение имитационных методов исследования позволило экспериментально установить влияние газодинамической силы, возникающей при вибрационных колебаниях маятника, несимметрично расположенного относительно неподвижных пластин плоского газового демпфера. Сформулированы предложения и разработаны методики по устранению погрешности, связанной с наличием газодинамической силы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, которые состоят в следующем:

1. Проведена оптимизация параметров магнитоэлектрического моментного датчика, обеспечивающая получение максимального диапазона измерения акселерометра при минимальной потребляемой энергии.
2. Определены причины неравномерного распределения магнитного поля в кольцевом зазоре магнитной системы плунжерного моментного датчика и на основании исследования до 500 макетов магнитной системы показано, что данное распределение приводит к разбалансировке маятника акселерометра и к нелинейности его характеристики. Разработаны методы экспериментального исследования и устранения указанной неравномерности.
3. Разработаны методики и проведено исследование и оптимизация параметров следующих элементов акселерометров: маятника, балочек его упругого подвеса, соединительных и базирующих крепёжных колец.
4. Разработаны и экспериментально исследованы методы испытания акселерометров без прецизионных вибростендов, центрифуг и ударных стендов путём имитации внешних воздействий.
5. Исследованы вибрационные погрешности акселерометров, вызванные газодинамическими моментами. Разработана методика регулировки приборов, устраняющая влияние газодинамических моментов на их вибрационную ошибку.
6. Разработаны, запатентованы в РФ, США, Корее и Франции, теоретически и экспериментально исследованы конструкции компенсационных акселерометров с упругим подвесом маятника из кремния и кварца.
7. Разработано и внедрено в производство специальное приспособление для прецизионной сборки и склеивания чувствительного элемента акселерометра.
8. Разработанные в диссертации теоретические положения и полученные экспериментальные данные использованы при создании в корейской корпорации PoongSan FNS кварцевого и кремниевых акселерометров.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Тема и содержание диссертации отражены в следующих научных работах.

1. Пат. 2155964 C1 (РФ), МКИ7 G 01 P 15/13. Компенсационный маятниковый акселерометр / В. М. Прокофьев, С. Ф. Коновалов, Дже-Бом Сео и др.; Коновалов Сергей Феодосьевич. - №99113694/28; Заяв. 23.06.1999. // Открыт. Изобретения.... - 2000. - №25.
2. Pat. 6422076 B1 (USA), Int. Cl.7 G 01 P 15/08. Compensation pendulous accelerometer / V. M. Prokofiev, S. F. Konovalov, Jae-Beom Seo et al; Agency For Defense Development, Taejon (KR); Sergei Feodosievich Konovalov, Moscow (RU). - No 09/598386; Jul. 23. 2002.
3. Pat. 0336151 (Korea), Int. Cl. G 01 P 15/08. Compensation pendulous accelerometer / V. M. Prokofiev, S. F. Konovalov, Jae-Beom Seo et al; Konovalov Sergei Feodosievich. - Apr. 24.2002.
4. Опыт разработки малошумящего акселерометра / С. Ф. Коновалов, А. В. Польшков, Дж. Б. Сео и др. // Доклады VII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. - Санкт-Петербург, 2000. - С. 72-79.
5. Опыт разработки малошумящего акселерометра / С. Ф. Коновалов, А. В. Польшков, Дж. Б. Сео и др. // Гироскопия и навигация. - 2000. - №3(30). - С. 68-77. ISSN 0869-7035.
6. Research of operability of accelerometers at high-G linear acceleration, vibrating and shock effects without using test centrifuges, vibration and shock test tables / S. F. Konovalov, A. V. Polynkov, J. B. Seo et al // Paper. XIV Saint Petersburg international conference on integrated navigation systems. - Saint Petersburg, 2007. - P. 125-132.
7. Коновалов С. Ф., Сео J. В. Причины неравномерного распределения магнитной индукции в зазорах компенсационных датчиков акселерометров типа Q-flex // Гироскопия и навигация. - 2009. - №2. - С. 72-79. ISSN 0869-7035.
8. Коновалов С. Ф., Сео J. В. Распределение магнитного поля в кольцевом зазоре моментного датчика акселерометра типа Q-flex: Тезисы доклада XXVI конференция памяти Н. Н. Острякова // Гироскопия и навигация. - 2008. - №4. - С. 67. ISSN 0869-7035.

Объем 1,0 печ. л. Тираж 100 экз.