

На правах рукописи

Измайлов Андрей Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
И ПОВЫШЕНИЕ ИХ КАЧЕСТВА.**

Специальность 05.11.14.

«Технология приборостроения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2003

Работа выполнена в «МАТИ» - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского на кафедре “Технология производства приборов и систем управления летательных аппаратов”.

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Суминов Вячеслав Михайлович.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Мельников Валерий Ефимович;
кандидат технических наук
Ильин Валентин Николаевич.

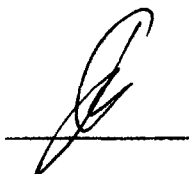
Ведущая организация – ФГУП ПО «Корпус» .

Защита диссертации состоится 17 ноября 2003 года в 14 часов на заседании Диссертационного Совета Д.212.110.01 по специальности 05.11.14 (Технология приборостроения) в «МАТИ» - Российском государственном технологическом университете им. К.Э. Циолковского по адресу: 109240 г.Москва, Берниковская набережная, д. 14, ауд. 602.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «МАТИ» - Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского.

Автореферат разослан « 16 » октября 2003 года.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета
Д.212.110.01, кандидат
технических наук, профессор



Баранов П.Н.

2003-А
16437

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие авиационного приборостроения неразрывно связано с созданием летательных аппаратов (ЛА) новых типов, обладающих большой скоростью и дальностью полета и требующих все более высокого уровня автоматизации процессов управления полетом.

Среди множества информационных систем, обеспечивающих формирование данных о текущих параметрах движения ЛА, особое место занимают инерциальные навигационные системы (ИНС). Являясь автономными, они обеспечивают необходимой информацией все системы управления движением ЛА.

Следует отметить, что в последнее время, большое распространение получили бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС), в которых физическая опорная система заменена математической. Данная тенденция связана с рядом преимуществ БИНС по сравнению с платформенными ИНС, к которым можно отнести:

- значительное упрощение конструкции, следствием чего является уменьшение массогабаритных параметров;
- повышение надежности;
- сокращение стоимости жизненного цикла;
- уменьшение энергопотребления;
- увеличение объема формируемой информации.

Повышение точности любой инерциальной навигационной системы прямо связано с созданием акселерометров прецизионного класса. Тенденция широкого распространения бесплатформенных систем еще более усложняет задачу, так как резко ужесточает требования к параметрам точности акселерометров. В первую очередь это относится к величине и стабильности его нулевого сигнала ("нуля"), масштабного коэффициента (К) и положения

НАЦИОНАЛЬНАЯ
БИБЛИОТЕКА
С.Петербург
09 2003 акт 658

оси чувствительности ("базы") в широком диапазоне эксплуатационных условий, что определяется невозможностью калибровки акселерометра при каждом включении БИНС. Решение данной задачи невозможно без углубленного анализа причин возникновения погрешностей акселерометра, т.е. влияния конструкторско-технологических параметров на величины, и стабильность "нуля", "баз" и масштабного коэффициента, на основе которых могут быть разработаны технические предложения, как по совершенствованию конструкции, так и технологии изготовления акселерометра.

Аттестация указанных выше параметров качества акселерометров является неотъемлемой составляющей технологического процесса его изготовления. Так как, по используемой в настоящее время методике аттестации (калибровки), погрешность измерений непосредственно входит в получаемые оценки параметров приборов, повышение точности акселерометра однозначно влечет за собой ужесточение требований к точности измерительного оборудования. Используемая в настоящее время в серийном производстве методика калибровки основана на использовании оборудования, погрешность которого соизмерима с оцениваемыми параметрами. Кроме того, стоимость этого оборудования высока, сам процесс отличается большой трудоемкостью и невозможностью его полной автоматизации.

В соответствии с изложенным, исследование факторов, определяющих погрешность акселерометра, и разработка на его основе конструкторско-технологических рекомендаций по повышению точности, а также создание более эффективной методики калибровки является актуальной задачей.

В данной работе рассмотрены вопросы повышения точности кварцевого акселерометра АК-6, разработанного в ОАО "Московский Институт Электромеханики и Автоматики", до требований предъявляемых современными БИНС. В связи с чем, разработана математическая модель основных параметров прибора, рассмотрены технологические аспекты конструкции и сборки данного акселерометра, на основании анализа которых

предложены пути модернизации конструкции, а также рассмотрена новая модульная модель калибровки акселерометров.

Цель работы

Целью данной работы является разработка конструктивно-технологических решений, обеспечивающих повышение точностных параметров акселерометра, в первую очередь величины и стабильности нулевого сигнала и положения оси чувствительности акселерометра, а так же создание новой методики калибровки акселерометра, обеспечивающей необходимую точность определения параметров приборов при условии снижения трудоемкости процесса и применения менее дорогостоящего оборудования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- проанализировать физическую природу образования погрешностей прибора и выявить доминирующие источники погрешностей;
- формализовать связи первичных конструкторско-технологических погрешностей с выходными параметрами акселерометров;
- провести теоретические и экспериментальные исследования влияния технологии сборки и конструкции соединений элементов прибора на стабильность выходных параметров;
- разработать конструкторско-технологические рекомендации по уменьшению нестабильности нулевого сигнала и "базы" акселерометра;
- провести анализ точности определения параметров приборов по существующей в настоящее время методике;
- разработать и проверить адекватность новой методики определения параметров приборов с необходимой точностью;
- провести формирование требований к необходимому оборудованию для реализации разработанной методики.

Положения, выносимые на защиту

На защиту в соответствии с целью работы выносятся следующие положения:

- математическая модель выходной характеристики акселерометра, формализующая связи первичных конструктивно-технологических параметров функциональных элементов акселерометра с его погрешностями;
- экспериментально-теоретическая модель формирования погрешности акселерометра на этапе его сборки;
- конструкторские и технологические рекомендации по совершенствованию конструкции и технологии сборки акселерометра, а также экспериментальная проверка их эффективности;
- новая методика определения параметров акселерометров, обеспечивающая требуемую точность и снижение стоимости процесса калибровки, адекватность которой подтверждена экспериментально;
- результаты моделирования предлагаемой методики калибровки позволяющие сформулировать требования к необходимому оборудованию.

Методы исследования

Полученные результаты базируются на комплексном применении основных положений теоретической механики, теории электрических цепей, теории точности производства, математических методах анализа, теории линейных векторных пространств, методах аппроксимации и линеаризации, а также натурном и математическом моделировании.

Научная новизна

1. Разработана математическая модель, описывающая доминирующие погрешности акселерометра в его конструктивно-технологических параметрах.
2. Построена и экспериментально подтверждена физическая модель погрешности акселерометра, связанная с нестабильностью положения пластины чувствительного элемента и самого чувствительного элемента в корпусе акселерометра.

3. Разработана скалярная методика определения параметров акселерометров.

4. Сформулированы и обоснованы требования к специальному оборудованию для калибровки акселерометров по предлагаемой методике.

Практическая ценность:

- разработка технических решений по совершенствованию конструкции и технологического процесса сборки акселерометров, обеспечивающих уменьшение его доминирующих погрешностей;

- применении разработанной математической модели погрешности акселерометра для выбора рациональных величин параметров его электронного контура и обоснованных допусков на отклонение этих параметров, с точки зрения обеспечения требуемой точности акселерометра;

- разработка и экспериментальное подтверждение эффективности новой методики калибровки акселерометров, обеспечивающей существенное повышение точности оценок при резком снижении требований к точности испытательного оборудования.

Апробация работы. Материалы представленные в данной диссертационной работе, докладывались и обсуждались на конференциях:

Всероссийских научно-технических конференциях “Новые материалы и технологии” НМТ г. Москва – 2000, 2002;

XXVII, XXVIII, XXIX, Международных молодежных научных конференциях “Гагаринские чтения” г. Москва – 2001г, 2002г., 2003г.;

Международном симпозиуме “Аэрокосмические приборные технологии” г. Санкт-Петербург – 2002.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 8 печатных работах и техническом отчете выпущенном в МИЭА в 2000 г.

Структура и объем диссертации: Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 111 наименований. Материал изложен на 153 страницах иллюстрированных 70 рисунками, графиками и 35 таблицами.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены актуальность и практическая ценность работы. Сформулированы цель работы, задачи и методы исследований, научная новизна, результаты апробации и внедрения данной работы. Приведена структура диссертации и краткое содержание основных разделов.

В первой главе дан обзор конструкций, принципов работы и характеристик ряда акселерометров, выявлены основные параметры, определяющие точность акселерометра, детально рассмотрена конструкция и технология сборки компенсационного маятникового кварцевого акселерометра АК-6.

Анализ состояния вопроса показал, что для данного прибора доминирующими погрешностями в настоящее время являются величина и нестабильность нулевого сигнала и пространственного положения оси чувствительности ("база"), основными источниками которых являются:

- изменение входного сопротивления и влияние нулевого сигнала усилителя обратной связи;
- асимметричности характеристик возмущающих моментов и параметров ДП;
- нестабильность положения кварцевой пластины относительно корпусов ЧЭ и самого ЧЭ относительно корпуса акселерометра, обуславливающуюся различием ТКЛР кварцевой пластины, соединительного и установочного колец, корпусов ЧЭ и корпуса акселерометра.

Во второй главе разработана математическая модель выходной характеристики акселерометра, на основе которой дана оценка степени влияния параметров конструкторско-технологических элементов на величину и стабильность "нуля" и "базы" акселерометров.

Структурная схема рассматриваемого класса акселерометров приведена на Рис. 1 а). При движении акселерометра с ускорением a , на массу M

действует инерционная сила, вызывающая перемещения массы относительно корпуса Δ . Это перемещение преобразуется ДП в электрический сигнал $u_{ДП}$, который усиливается УОС до величины U и поступает на сопротивление нагрузки R_n и датчик силы ДС. Последний создает силу $F_{ос}$, приложенную к массе и компенсирующую инерционную силу. Выходным сигналом акселерометра является падение напряжения $U_{емк}$ на сопротивлении R_n . Кроме

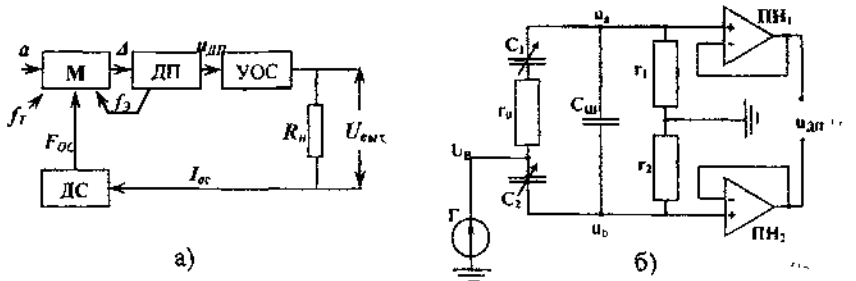


Рис. 1. а) - Структурная схема акселерометра и б) - схема датчика положения акселерометра

рассмотренных сил на массу действует упругая сила от подвеса массы в корпусе f_m и реактивная сила ДП f_s . Конструктивно подвес массы и датчик положения всегда выполняют таким образом, чтобы при $\Delta=0$ f_m и f_s также были равны 0. Однако, реальный акселерометр в силу неизбежных технологических погрешностей отдельных элементов и их сборки характеризуется тем, что в случае отсутствия ускорения на его выходе будет некоторый нулевой сигнал $U_{вв\lambda}$, величина которого определяется условием равновесия возмущающих сил, действующих на массу.

Из структурной схемы, Рис. 1. а), видно, что в случае отсутствия ускорения статическое положение массы определяется условием равенства сил $F_{ос}$, f_m и f_s . Силовая характеристика магнитоэлектрического датчика силы представляет собой произведение коэффициента k_{∂} , равного потокоцеплению катушки с полем постоянного магнита, на величину протекающего по катушке тока I . Связанная с массой часть датчика положения представляет собой подвижные электроды дифференциального емкостного датчика, выходной

информационный сигнал которого можно с учетом малости перемещений Δ представить в виде произведения коэффициента передачи k_{out} , определяемого структурой датчика, на перемещение, дополненное некоторым начальным смещением $\Delta_{дн}$. Наличие электростатических сил притяжения между электродами приводит к тому, что этот датчик так же будет создавать силу, действующую на массу, величина которой в линейном приближении описывается произведением некоторого коэффициента k_t на перемещение, дополненное начальным смещением Δ_t . Упругая сила торсионов описывается аналогично как произведение коэффициента, характеризующего их жесткость k_m , на перемещение, дополненное начальным смещением Δ_t . С учетом изложенного уравнение равновесия получим в виде:

$$\frac{U k_{\kappa}}{R_{\kappa} + r_{\kappa}} + (\Delta + \Delta_t) k_t - (\Delta + \Delta_t) k_s = 0$$

где: r_{κ} - сопротивление катушек ДС

Для нахождения связи выходных параметров датчика положения с его первичными параметрами в работе была рассмотрена его схема, Рис. 1. б), и показано, что в общем случае полное выходное напряжение ни при каких положениях массы не равно нулю и минимальную погрешность формирования опорного сигнала можно обеспечить для синфазной составляющей u_{out} . Однако использование синфазной составляющей в качестве информационного сигнала предполагает определение условия, при которых крутизна ее зависимости от Δ будет максимальной. При выполнении данного условия крутизна выходной характеристики датчика положения $k_{дп}$ будет:

$$k_{дп} = - \frac{2(1 + \alpha)}{\delta [2 + 4\alpha + (1 + \alpha)\beta + (7 + 12\alpha)\xi + 2(1 + 3\alpha)\gamma]} U_0;$$

где α ; β ; ξ ; δ ; γ - отклонения r_0 , r_1 , r_2 , C_1 , C_2 , C_m .

Проведенный в работе анализ элементов ДП показал, что при наличии рассматриваемых погрешностей, положение маятника, при котором информационный сигнал равен нулю, и соответственно его положение, при котором равна нулю электростатическая сила, не совпадают. Сопоставление

уравнений показывает, что технологические погрешности оказывают существенно большее влияние на параметры электростатической силы, чем на информационный сигнал.

Для оценки влияния элементов УОС на выходной сигнал акселерометра, в работе была рассмотрена цепь прохождения информационного сигнала. В УОС сигнал u_{0n} поступает на дифференциальный усилитель, схема которого показана на Рис. 2. а). В связи с невозможностью идеального подбора величин сопротивлений R_1-R_4 выходной сигнал дифференциального усилителя непропорционален u_{0n} :

$$u = (\Delta + \Delta_{0n})k_{0n}k - 2k\lambda u_{b0};$$

где: λ и k - отклонение реальных коэффициентов усиления от номинального, u_{b0} - величина u_b при $u_{0n} = 0$.

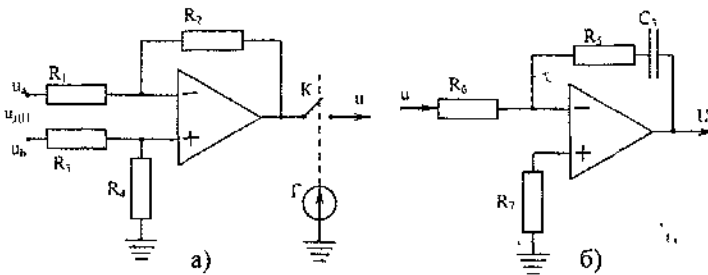


Рис. 2. Схемы усилителей: а) - дифференциального, б) - интегрирующего

С целью минимизации методической погрешности акселерометра, связанной со статической погрешностью регулирования, последний каскад усилителя обратной связи представляет собой интегрирующий усилитель, Рис. 2 б).

На основе анализа работы прибора и рассмотрения функционирования основных узлов, были получены уравнения связи рассматриваемых погрешностей (нулевого сигнала и базы) с параметрами элементов конструкции:

$$U_{\text{вых}} = \left\{ \frac{E_{cm} + i^- R_9 - i^- R_7 + \lambda k k_e}{k_{oc} k_{on} k} (k_3 - k_T) + \frac{(\Delta_3 - \Delta_{on}) k_3 - (\Delta_7 - \Delta_{on}) k_7}{k_{oc}} \frac{E_{cm} + i^+ R_9}{R_n + r_{oc}} \right\} R_n$$

$$\text{и } \Delta_0 = \frac{E_{cm} - i^- R_6 + i^- R_7}{k k_{\text{ДП}}} + 2 \frac{\lambda}{k_{\text{ДП}}} u_{\text{вс}} - \Delta_{\text{ДП}} \text{ соответственно.}$$

Рассматривая задачу рационального распределения допусков в плане анализа точности изделия, были определены функции влияния первичных параметров на $U_{\text{вых}}$ и Δ_0 . При этом, в ряде случаев, в качестве первичных параметров были рассмотрены отклонения конструктивных параметров от номинальных величин. В этом случае за номинальное значение отклонения принимался ноль. В работе рассмотрены функции влияния величин сопротивлений дифференциального усилителя УОС и различия величин емкостей и сопротивлений ДП и ЧЭ на величину отклонения оси чувствительности и выведено выражение для нулевого сигнала:

$$\Phi \left(\frac{u_{\text{вых } \theta=0}}{q_1} \right) = \left[\Phi \left(\frac{\Delta_0}{q_1} \right) (k_3 - k_T) + \Delta_0 \frac{\partial k_3}{\partial q_1} + \frac{\partial \Delta_3}{\partial q_1} k_3 + \Delta_7 \frac{\partial k_7}{\partial q_1} \right] \frac{R_n}{k_{\text{ДС}}} - \frac{\partial (i^+ R_7 + E_{cm})}{\partial q_1} \frac{R_n}{R_n + r_{oc}}$$

В третьей главе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований, на основе которых произведен анализ и сформулированы требования к конструкции чувствительного элемента и креплению его в корпусе АК-6, с целью повышения точности и стабильности "базы" и нулевого сигнала акселерометра в широком температурном диапазоне. Предложенные конструкция и технология сборки прибора внедрены в производство

Основными причинами данных погрешностей являются:

- нестабильность закрепления кварцевой пластины в корпусах ЧЭ в рабочем диапазоне температур, что связано в первую очередь с различиями ТКЛР в рассматриваемой сборке;

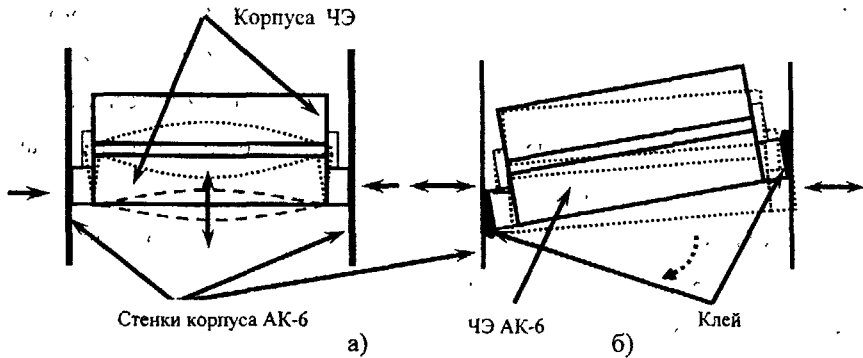


Рис. 3. Деформации корпуса ЧЭ АК-6 при температурных воздействиях

нестабильность положения ЧЭ в корпусе акселерометра, обусловленная клеевым швом и сборкой элементов с различными ТКЛР.

Для выявления характера нестабильности положения ЧЭ в корпусе акселерометра было проведено натурное моделирование показавшее, что в результате температурных воздействий происходит изменение положения ЧЭ относительно базовых поверхностей прибора (нестабильность базы), Рис. 3. б). и возникает изменение геометрии корпуса ЧЭ, Рис. 3. а), что является причиной возникновения возмущений закрепления кварцевой пластины в корпусах ЧЭ (нестабильность "нуля").

Однако данное моделирование показало только качественную картину возникновения рассматриваемых погрешностей, в связи с чем были проведены теоретические исследования состояния элементов конструкции при температурных возмущениях. Для оценки величин ТКЛР материалов корпусов ЧЭ и соединительного кольца были проведены поверочные испытания показавшие нестабильность данной характеристики от температуры, партии материала, а также от технологии получения изделия из заготовки. Причем аналогичное воздействие высоких температур (при изготовлении корпусов ЧЭ производится диффузионная сварка заготовок корпуса и магнитов ДС при температуре $\sim 800^{\circ}\text{C}$) вызывает нестабильность ТКЛР и в образцах взятых из одной плавки.

Анализ взаимодействия элементов ЧЭ показал, что рассматриваемая конструкция может вызывать нестабильность как “нуля”, так и “базы” в связи с создаваемыми на внешнем кольце кварцевой пластины напряжениями и одновременном изменении усилия сжатия корпусами пластинок пластины, что вызывает ее непрогнозируемые перемещения относительно корпусов ЧЭ и как следствие - изменения выходной характеристики акселерометра.

По результатам экспериментальных и теоретических исследований были сформулированы рекомендации по изменению конструкции и технологии сборки рассматриваемых узлов.

Для предотвращения возможных смещений кварцевой пластины относительно корпусов ЧЭ, вызываемых превышением напряжений во внешнем кольце пластины сил трения платиков по посадочным плоскостям корпусов, в работе было предложено обеспечить гарантированное усилие сжатия корпусов ЧЭ соединительным кольцом во всем температурном диапазоне, что достигается изменением конструкции соединительного кольца, обеспечивающего возможность его предварительное натяжение в вертикальном направлении, и изменением технологического процесса сборки и оснастки, Рис.4.

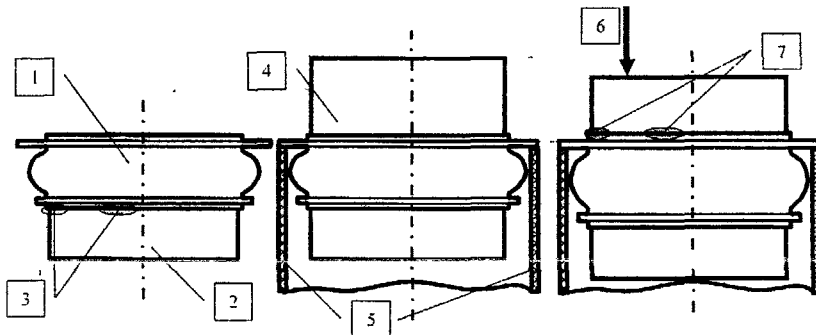


Рис. 4. Схема окончательной сборки ЧЭ.

1. - соединительное кольцо; 2- нижний корпус; 3, 7 лазерная сварка;
4 - верхний корпус; 5 - технологическое приспособление; 6 - тарированное усилие.

С целью исключения возможных перемещений ЧЭ относительно корпуса акселерометра, связанных с различием ТКЛР корпусов ЧЭ, установочного кольца и корпуса прибора, а также обеспечения изоляции ЧЭ от корпуса необходимо было изменить конструкцию и технологию сборки следующим образом:

- фиксацией ЧЭ в корпусе акселерометра путем закрепления фланца соединительного кольца между двумя керамическими втулками выполняющих роль изолятора;
- использованием пружины для обеспечения стабильности зажима фланца во всем рабочем диапазоне температур, Рис. 5.

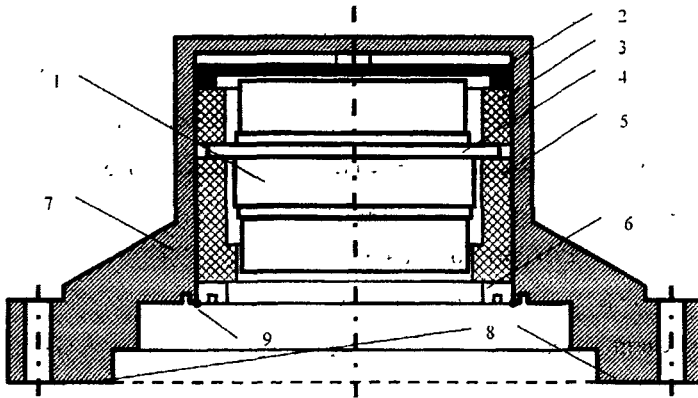


Рис. 5. Крепление ЧЭ в корпусе АК-6. 1. Чувствительный элемент (ЧЭ), 2. Плоская пружина, 3, 5. Втулки (керамика), 4. Фланец соединительного кольца, 6. Запорная шайба, 7. Корпус АК-6, 8. Базовая (установочная) плоскость корпуса, 9. Точечная лазерная сварка

В результате внедрения предложенных рекомендаций, стабильность параметров акселерометров (в части нулевого сигнала и базы) возросла более чем на 20%.

Четвертая глава посвящена разработке и анализу скалярной методики калибровки акселерометров.

Уровень точности акселерометров, необходимый для построения прецизионных БИНС оценивается величиной 3". Следовательно, погрешности определения параметров приборов не должны превышать 1". Используемая в настоящее время методика калибровки основанная на векторном эталоне не может обеспечить данной точности во всем температурном диапазоне и требует включения в состав оборудования прецизионных оптических делительных головок с точностью позиционирования на уровне 1"-2", что приводит к увеличению стоимости рабочего места калибровки акселерометров и трудоемкости процесса.

Для получения более совершенной методики калибровки предпочтительно использование скалярного эталона, в качестве которого в работе был выбран квадрат модуля вектора силы тяжести, точно известный для любой точки Земли. В отличие от векторного, скалярный эталон не имеет привязки к системе координат испытательного оборудования. В основном в ИНС используется сборка из трех ортогонально расположенных акселерометров, позволяющая определять кажущееся ускорение объекта, что в статике равносильно определению ускорения силы тяжести.

Для математического описания методики калибровки в работе была определена модель погрешностей триады акселерометров и составлены уравнения связи, выражающие рассматриваемые погрешности приборов через их выходные сигналы.

Выражение, определяющее связь выходных сигналов калибруемых акселерометров с их параметрами может быть представлено в виде:

$$\frac{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2 - 1}{2} = \sum_{j=0}^2 \Delta_{jx} * B_x^{j+1} + \sum_{j=0}^2 \Delta_{jy} * B_y^{j+1} + \sum_{j=0}^2 \Delta_{jz} * B_z^{j+1} + \Psi_{xy} * B_x * B_y + \Psi_{xz} * B_x * B_z + \Psi_{yz} * B_y * B_z$$

где Ψ_{xy} , Ψ_{xz} , Ψ_{yz} - углы неортогональности между соответствующими осями;

B_j - выходной сигнал J-ого акселерометра с учетом погрешностей, возникающих из-за неточного расположения приборов;

Δ_j - безразмерный коэффициент погрешности j -ой степени:

При выводе данного уравнения использовалось предположение о малости величин Δ и α (составляющей углов неортогональностей), т.е. полагалось, что $\alpha \cdot \Delta = 0$; и возможности, в данных условиях, с точностью до первого порядка малости, принять входное ускорение как выходной сигнал акселерометра.

Для определения параметров акселерометров (нулевой сигнал, масштабный коэффициент, углы неортогональности и коэффициент при квадратичном члене выходной характеристики) по предлагаемой методике калибровки и обеспечения необходимой точности, в работе была предложена специальная система позиционирования. Количество положений, в которых производятся измерения выходных сигналов акселерометров, потребовалось довести до 24.

В пятой главе приведены результаты математического моделирования, на основе которых сформулированы требования к оборудованию для испытания акселерометров и экспериментальная проверка адекватности определяемых параметров по предлагаемой методике калибровки.

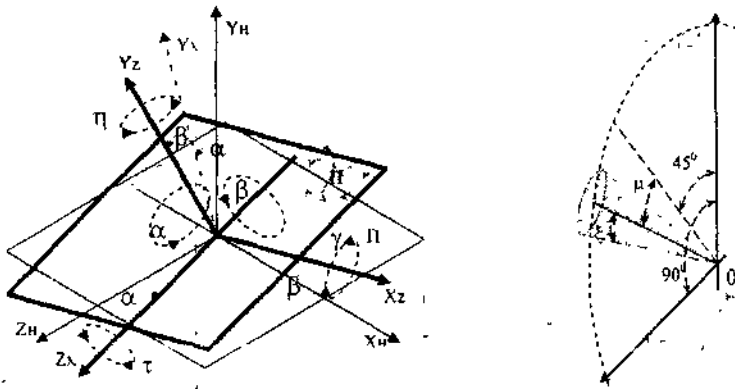


Рис. 6. Погрешности оборудования при калибровке

Для выявления возможности применения рассматриваемой методики калибровки, была разработана математическая модель влияния параметров применяемого оборудования (точность измерительной системы, ошибок позиционирования с учетом как погрешности платформы - наклон α, β и его

нестабильность η , τ , γ во время калибровки, так и поворотного устройства - ошибка поворота μ , его нестабильность, конусность ξ - Рис. 6.) и величин погрешностей самих приборов, на точность определения параметров калибруемых приборов.

По результатам данного моделирования были получены следующие результаты (погрешность определения параметров приборов не более 1"): .

- точность ИС - 0,001 мВ;
- погрешность установки платформы, (при погрешности определения +/- 10 минут) -- +/- 3 градуса;
- погрешность поворота триады - +/- 2 градуса;
- погрешность конусности поворота - +/- 8 минут.

Экспериментальное сопоставление методик проводилось с целью оценки эффективности предлагаемой методики калибровки при испытаниях реальных приборов и подтверждения результатов математического моделирования. В связи с возможным изменением параметров проверяемых приборов во времени и от запуска к запуску была выбрана специальная структура поворотов

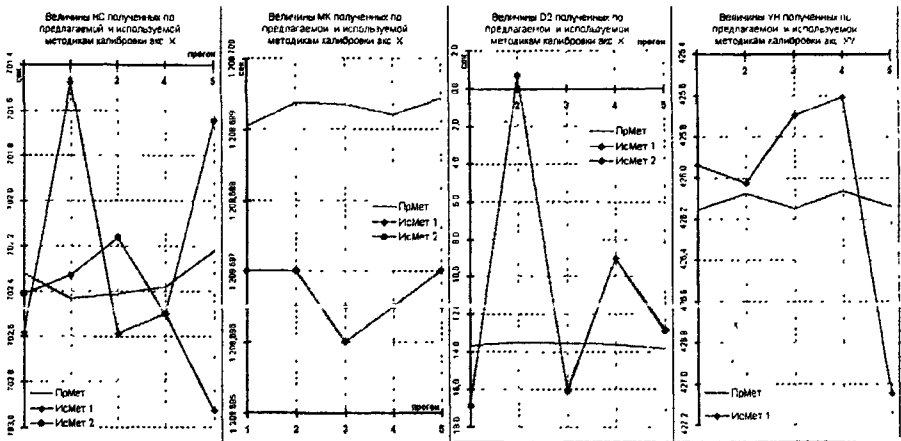


Рис. 7. Результаты экспериментальной проверки адекватности определения параметров скалярной и векторной методиками

включающая в себя точки позиционирования как для используемой в настоящее время методики калибровки (точное позиционирование), в качестве контрольной, так и для предлагаемой методики (при вводимой погрешности позиционирования на уровне 1°). Для получения более полной картины характера оценки параметров приборов, при использовании скалярной и векторной методик калибровки, было проведено пять циклов измерений. Так как данные испытания проводились на штатном месте калибровки акселерометров, ввиду большой сложности и проблемами визуализации, в качестве ошибки позиционирования триады был выбран параметр "погрешность поворота триады" в диапазоне +/- 1 градус.

Оценивая результаты экспериментов, Рис. 7., можно утверждать, что большая стабильность определяемых параметров, полученных по скалярной методике относительно векторной, качественно оценивает ее как более точную. Следует отметить, что разброс определяемых параметров по предлагаемой методике не превышает $0,35''$, что косвенно свидетельствует о состоятельности проведенного моделирования.

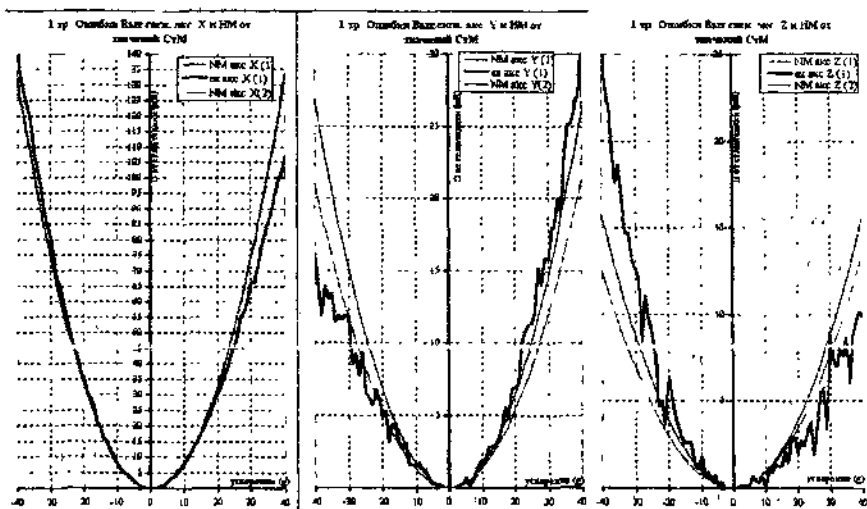


Рис. 8. Отклонения выходных сигналов трех акселерометров, и выходной характеристики определенной по скалярной методике от характеристики полученной по векторной методике

В предлагаемой методике сделана попытка описания нелинейности характеристики выходного сигнала акселерометра с помощью квадратичной составляющей в диапазоне калибровочного ускорения $1g$. Для проверки точности определения этого параметра были проведены экспериментальные исследования (как с используемой, так и с предлагаемой методикой) с дальнейшим прогоном данных приборов на центрифуге во всем диапазоне измеряемых ускорений. Калибровка по предлагаемой методике была осуществлена как до прогона приборов на центрифуге, так и после, для определения их стабильности.

Результаты эксперимента приведены на Рис. 8. Как видно из приведенных графиков, определение квадратичной составляющей выходной характеристики увеличивает точность определения входного ускорения. Погрешность определения входного сигнала можно отнести на счет влияния составляющих более высокого порядка, дрейфа параметров, а также на погрешность установки приборов на кронштейн центрифуги.

В результате проведенного анализа и экспериментальных данных можно заключить, что использование предлагаемой методики, обеспечивает повышение точности определения выходных параметров калибруемых параметров, а также снижает требования к используемому оборудованию.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате проведенных в рамках данной диссертационной работы исследований получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ параметров серийно выпускаемых акселерометров, позволивший выявить их доминирующие погрешности, а также конструктивно-технологические причины их образования.

2. Разработана математическая модель статической погрешности акселерометра, позволившая установить, что:

- положение оси чувствительности акселерометра, определяется погрешностями его информационно-усилительного тракта и следовательно не может быть полностью исключена и не зависит от параметров характеристик торсионов подвеса массы и электростатического воздействия ДП;

- нулевой сигнал прибора содержит две независимые составляющие, источниками которых являются погрешности сборки, электромеханической части и погрешность электронной цепи;

- технологические погрешности оказывают существенно большее влияние на параметры электростатической силы, чем на информационный сигнал.

3. Разработана математическая модель позволяющая:

- сформулировать требования к выбору номинальных параметров функциональных элементов;
- решить задачи рационального выбора допусков на эти элементы с целью повышения стабильности нулевого сигнала и базы.

4. Построена и экспериментально подтверждена физическая модель погрешности акселерометра, связанная с нестабильностью положения кварцевой пластины ЧЭ и самого ЧЭ в корпусе акселерометра.

5. Разработаны и экспериментально подтверждены, на основании теоретического анализа построенной модели, конструктивно-технологические рекомендации по повышению точности акселерометра.

6. Разработана скалярная методика калибровки триады акселерометров, позволяющая повысить точность определения параметров приборов и оценить квадратичный член его выходной характеристики.

7. Построена математическая модель погрешности аттестации параметров акселерометров, на основании которой сформулированы требования к точности измерительного оборудования. На основе экспериментальных исследований подтверждена эффективность разработанной методики.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Измайлов Е.А., Суминов В.М., Данильченко Ю.Д., Измайлов А.Е. Формирование качества высокоточного акселерометра при его сборке. Сборка в машиностроении, приборостроении. №2 М. 2001.
2. Измайлов А.Е., Суминов ВМ Анализ конструктивно-технологических причин нестабильности пространственного положения оси чувствительности акселерометра. Тезисы доклада. Всероссийская научно-техническая конференция Новые материалы и технологии НМТ –2000. "МАТИ" – РГТУ им. К.Э. Циолковского.
3. Измайлов А.Е., Поликовский Е.Ф., Аникейчев В.С. Анализ автоматизированного рабочего места калибровки триады акселерометров на базе скалярной методики. Тезисы доклада. Всероссийская научно-техническая конференция Новые материалы и технологии НМТ –2002 "МАТИ" РГТУ им. К.Э. Циолковского.
4. Измайлов А.Е. Конструктивно-технологические причины нестабильности пространственного положения оси чувствительности акселерометра. "XXVII Гагаринские чтения": Труды Всероссийской научной молодежной конференции "МАТИ" – РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2001г.
5. Измайлов А.Е. Анализ скалярной методики калибровки акселерометров. "XXVIII Гагаринские чтения": Труды Всероссийской научной молодежной конференции "МАТИ" – РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2002г.
6. Измайлов А.Е. Экспериментальная проверка адекватности применения скалярной методики для калибровки прецизионных акселерометров. "XXIX Гагаринские чтения": Труды Всероссийской научной молодежной конференции "МАТИ" – РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2003г.
7. Измайлов А.Е., Суминов В.М. Анализ скалярной методики определения параметров триады акселерометров. Труды Второго международного симпозиума "Аэрокосмические приборные технологии" - С-П 2002.
8. Измайлов А.Е. Модель технологических погрешностей маятникового акселерометра с обратной связью. Научные труды. "МАТИ" – РГТУ им. К.Э. Циолковского. 2001.

Подписано в печать 08.10.03. Объем 1,0 печ. л.
Формат 60X84/16. Печать на ризографе. Тираж 100 экз. Заказ №208

Издательский центр «МАТИ» - Российского государственного
технологического университета им. К.Э. Циолковского.
109240, Москва, Берниковская наб., 14.

Типография ИЦ «МАТИ» - Российского государственного
технологического университета им. К.Э. Циолковского.
109240, Москва, Берниковская наб., 14.

2003-A

16437

16437