

На правах рукописи

Ли Кван Суп

РАЗРАБОТКА
МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА
С КРЕМНИЕВЫМ УПРУГИМ ПОДВЕСОМ

Специальность: 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Kwan Sup Lee

Москва, 2002 г.

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н. Э. Баумана на кафедре «Приборы и системы ориен-
тации, стабилизации и навигации»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
С. Ф. Коновалов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Е. Р. Рахтесенко

кандидат технических наук
В. И. Курносов

Ведущая организация: ОАО «Раменское Приборостроительное Кон-
структ 1600079 кой области.

Ли Кван Суп
Разработка маятникового
компенсационного
акселерометра с кремниевым
3. упругим подвесом

000 2 г. в 10.00 часов на заседании
Государственном

1600079

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

женный печатью,

ке Московского
мана.

Власов И. Б.

Актуальность работы. В 1993 году в республике Корея совместно со специалистами из МГТУ им. Н. Э. Баумана (МГТУ) начались работы по созданию прецизионного акселерометра, получившего в процессе разработки название “корейский акселерометр” или в аббревиатуре “КА”.

При создании КА необходимо было ориентироваться на высокий уровень развития в республике Корея электронной промышленности и учитывать недостаточное развитие отрасли прецизионной электромеханики. Поэтому разработчики акселерометра стремились спроектировать прибор с максимально простой конструкцией электромеханической части, при изготовлении которой использовались бы технологические процессы, оборудование и материалы, традиционные для полупроводниковой промышленности. Кроме того, разрабатываемый акселерометр должен быть надёжен при эксплуатации и недорог при изготовлении.

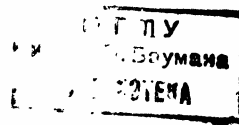
Были намечены следующие основные области применения КА: а) как чувствительный элемент (датчик) для инклинометрических систем при бурении нефтяных и газовых скважин; б) как чувствительные элементы (датчики), измеряющие вибрацию и углы наклона объектов в системах диагностики сооружений (мостов, высотных зданий и тому подобных объектов); с) как акселерометр для инерциальных навигационных систем в платформенном и бесплатформенном вариантах.

Помимо указанных трёх основных областей применения КА намечалось использовать в автопилотах для авиации, в навигационных системах для автомобилей и так далее.

Целью диссертационной работы является разработка конструктивного ряда маятниковых компенсационных цифровых акселерометров с кремниевым упругим подвесом инерционной массы, а также проведение теоретических и экспериментальных исследований этих приборов.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Проведён динамический структурный анализ узла подвеса маятника акселерометра. При этом определены характер движения частей исследуемой механической системы, виды деформации упругих участков кремниевой пластины и частоты, на которых происходят выявленные движения.
2. Проведено теоретическое исследование погрешности магнитоэлектрического датчика силы, которая обусловлена электромагнитным тяжением. При этом расширено число исследуемых конструктивных схем датчиков силы и, кроме магнитного потока в рабочем воздушном зазоре, учтены основные потоки выпучивания в магнитной цепи датчика.



3. Проведено теоретическое исследование возможности компенсации температурного дрейфа нулевого сигнала акселерометра. При этом разработана модель конструкции прибора, в которой температурный дрейф его нулевого сигнала компенсируется изменением момента из-за соответствующей деформации упругого подвеса маятника. С использованием этой модели выведены зависимости для расчёта значений температурных коэффициентов расширения специальных термокомпенсаторов.

Практическая ценность работы заключается в том, что на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

- разработана оригинальная и простая конструкция корейского кремниевого компенсационного маятникового акселерометра с совмещённым датчиком угла - датчиком силы и с импульсным током обратной связи;
- на базе разработанной конструкции разработана технология изготовления приборов и их элементов и создан конструктивный ряд первых в истории Кореи недорогих прецизионных акселерометров;
- разработана и реализована оригинальная компенсационная схема триады акселерометров, в которой общий микроконтроллер входит в составы трёх компенсационных контуров акселерометров;
- созданные КА нашли практическое применение в различных областях техники, в частности в системах диагностики строительных сооружений.

Диссертационная работа связана с работой по контрактам между Korea Advanced Institute of Science and Technology и Hyor Chin Industrial Co. Ltd. с одной стороны и МГТУ с другой стороны.

Апробация результатов работы. Основные теоретические положения и результаты экспериментальных исследований обсуждались на: III Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам (Санкт-Петербург, 1996 г.); IX Санкт-Петербургской международной конференция по интегрированным навигационным системам, (Санкт-Петербург, 2002 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы статья и два доклада, получены три патента.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 222 машинописных страницах, включая 93 рисунка и 5 таблиц. Список литературы содержит 22 наименования литературных источников.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- Разработка принципов проектирования цифровых компенсационных акселерометров с использованием кремния, как конструкционного материала.

- Разработка методов компенсации погрешностей акселерометров.
- Разработка методов ранней диагностики строительных сооружений с использованием акселерометров.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, намечены основные области применения КА, проведен анализ известных конструктивных схем акселерометров, способных обеспечить точностные параметры прибора в намеченных областях применения КА, и сформулированы решаемые в ходе исследований задачи.

В первой главе рассмотрена теория применяемого в КА цифрового контура с импульсным током обратной связи, в котором используется широтно-импульсная модуляция (ШИМ) и квантование сигнала. Характерными особенностями применения в КА цифрового контура компенсации с ШИМ являются следующие.

Амплитуда тока в катушках датчика силы (ДС) неизменна, поэтому выделяемая в приборе мощность будет постоянна независимо от измеряемого ускорения. Это улучшает стабильность акселерометра и позволяет обеспечить большую точность работы системы термостатирования прибора.

При неизменной амплитуде тока в катушках ДС исключается ошибка нелинейности акселерометра, пропорциональная квадрату тока обратной связи (то есть квадрату измеряемого ускорения).

Импульсный ток в обмотках ДС создаст на выходе сигнальных обмоток датчика угла (ДУ) КА импульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна углу отклонения маятника. Этот сигнал используется для формирования временного интервала в ШИМ. При этом в полной мере реализуются все преимущества примененного в КА совмещенного датчика угла – датчика силы (СДУДС): не требуется специальный генератор сигнала возбуждения (ГСВ) ДУ; устраняются проблемы, связанные с необходимостью разделения полезного сигнала ДУ и ложного сигнала, наводимого пульсацией тока обратной связи; благодаря высокой стабильности амплитуды импульсного тока обеспечивается высокая стабильность характеристик ДУ.

Использование контура компенсации КА в варианте с импульсным током обратной связи позволяет производить сопряжение выходного сигнала акселерометра с компьютером без применения специального прецизионного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Оригинально исполнение цифровой части используемого в КА преобразователя. При соединении трёх КА в триаду примененный в ней микроконтроллер (МК) обеспечивает АЦП сигналов ДУ, рассчитывает временные

интервалы в ШИМ и формирует все управляющие цифровые сигналы в соответствии с логикой работы трех приборов.

В главе исследованы режимы работы ДУ. В КА используется индукционный ДУ, конструктивно и функционально совмещённый с ДС. В этом СДУДС имеются общие катушки: подвижные рабочие катушки сдвоенного ДС являются одновременно катушками возбуждения ДУ. В КА сигнальные (выходные) катушки ДУ могут иметь две модификации исполнения.

Согласно первой модификации исполнения катушки возбуждения электромагнитов электродинамического ДС являются одновременно сигнальными катушками ДУ. При этом выходной сигнал ДУ является переменной составляющей тока в цепи катушек возбуждения электромагнитов.

Согласно второй модификации исполнения (которая была применена в КА) на центральных стержнях магнитных систем СДУДС расположены специальные сигнальные катушки ДУ. Эти сигнальные катушки соединены дифференциально последовательно.

При реализации КА были применены два варианта режима работы ДУ. В первом варианте режима работы ДУ схема акселерометра имеет ГСВ, который является источником переменного высокочастотного сигнала возбуждения ДУ. Выход этого ГСВ соединён со входом усилителя мощности контура компенсации акселерометра. Дифференциальное включение сигнальных катушек ДУ позволяет иметь на выходе датчика высокочастотный переменный сигнал, амплитуда которого пропорциональна углу отклонения маятника, а фаза зависит от направления отклонения маятника.

Во втором варианте режима работы ДУ импульсный ШИМ ток обратной связи в рабочих катушках ДС создаёт на выходе сигнальных катушек ДУ КА импульсный сигнал, амплитуда которого пропорциональна углу отклонения маятника. Этот сигнал используется для формирования временного интервала в ШИМ. При этом в полной мере реализуются все преимущества применённого в КА СДУДС.

Использование контура компенсации КА в варианте с импульсным током обратной связи позволяет производить сопряжение выходного сигнала акселерометра с компьютером без применения специального прецизионного АЦП.

В КА при использовании режима работы ДУ с возбуждением импульсным током обратной связи почти весь алгоритм работы компенсационного контура прибора реализуется МК.

В главе проведено теоретическое исследование погрешности магнитозлектрического ДС, обусловленной электромагнитным тяжением. Отличиями проводимого в диссертационной работе исследования от известных являются: расширение числа конструктивных схем ДС, подвергнутых

исследованию; рассмотрение при проведении исследования не только магнитного потока в рабочем воздушном зазоре, но и основных потоков выпучивания в магнитной цепи ДС.

В ходе теоретического исследования погрешности магнитоэлектрического ДС разработаны математические модели основных потоков выпучивания в магнитной цепи ДС. В результате исследования получены аналитические выражения для определения величин сил электромагнитного тяжения, которые вызывают погрешность работы магнитоэлектрического ДС.

Во второй главе сформулированы основные принципы концепции разработки КА. В диссертации разработана нетрадиционная конструктивная схема компенсационного акселерометра. При реализации этой схемы были использованы следующие основные принципы:

- изготовление упругого подвеса маятника (инерционной массы) акселерометра из монокристаллического кремния методом анизотропного травления;
- наличие четырёх балочек упругого подвеса маятника для компенсации действия сжимающих упругий подвес инерционных сил и, в конечном итоге, для обеспечения большой вибрационной и ударной прочности конструкции прибора;
- обеспечение плавных форм переходов у балочек упругого подвеса для предотвращения больших концентраций напряжений;
- простота и надёжность конструкции электромеханических узлов прибора;
- совмещение конструкций ДС и ДУ;
- простота технологического процесса сборки прибора;
- наличие механической компенсации влияния на параметры акселерометра температурных расширений/сжатий элементов конструкции прибора;
- использование ШИМ в следящем контуре акселерометра;
- построение цифрового контроллера контура регулирования акселерометра на базе МК и использование общего МК для трёх акселерометров.

С начала 1990-х годов в мировом приборостроении наметилась тенденция использовать в качестве конструкционного материала акселерометров и микромеханических гироскопов монокристаллического кремния. Механические характеристики кремния позволяют обеспечить точностные параметры акселерометра не хуже, чем при использовании кварца (в акселерометрах типа "Q-Flex"). В то же время кремний лучше использовать из-за возможности применения при работе с ним больших серийных заготовок из электронной промышленности, позволяющих осуществить групповое изготовление деталей и узлов приборов, а также из-за возможности применять технологические процессы и оборудование, традиционные для производства полупроводниковых элементов.

Кремний имеет ещё ряд преимуществ перед кварцем: отличная тепло-

проводность; свободное стекание электростатического заряда (накапливающегося на поверхности подвижной лопасти пластины маятникового узла и приводящего к неустойчивости нулевого сигнала прибора); электрическая проводимость кремния обеспечивает возможность использования кремневой лопасти в качестве подвижного электрода ДУ без напыления металлических электродов и без специального токоподвода к этим электродам (для приборов с емкостным ДУ).

В значительном числе конструкций акселерометров и микромеханических гироскопов на основе монокристаллического кремния для изготовления электроники прибора используется тот же самый кристалл кремния, что и для изготовления электромеханического узла этого прибора.

Учитывая изложенное, в КА в качестве материала пластины маятникового узла использован монокристаллический кремний.

В КА используются гибкие свободно висящие токоподводы из металлической фольги. Проведённые экспериментальные исследования показали существенное уменьшение (до двух порядков) гистерезисных явлений и неустойчивости нулевого сигнала прибора при переходе от напыленных токоподводов к гибким свободно висящим токоподводам.

Важное значение для прочности балок упругого подвеса имеет умение устранить концентрацию напряжений в местах перехода от плоскости $\langle 111 \rangle$ к плоскости $\langle 100 \rangle$, образующихся при анизотропном травлении кремневой пластины маятникового узла – см. рис. 1а. При обычном анизотропном травлении кремния радиус скругления в указанных местах

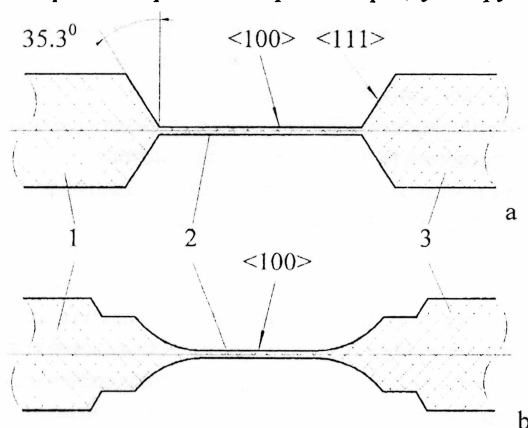


Рис. 1. Продольное сечение пластины маятникового узла

имеет величину порядка размера кристаллической решётки кремния. В МГТУ был разработан технологический процесс, позволяющий формировать плавный переход от плоскости $\langle 111 \rangle$ к плоскости упругой балки $\langle 100 \rangle$, как иллюстрирует рис. 1b. На рис. 1 обозначено: 1 – опорная рамка; 2 – балочка упругого подвеса маятника; 3 – подвижная лопасть.

Этот технологический процесс был использован при изготовлении кремниевых пластин маятникового узла для КА.

Обычные приборы (типа "Q-Flex") имеют упругий подвес инерционной массы (маятника) на двух балочках. При ориентации траекторного или ударного ускорения по оси плеча маятника или по оси подвеса маятника балочки упругого подвеса компенсируют усилие сжатия. При этом упругие балочки могут терять устойчивость и ломаться. КА в основном предназначен для использования в инклинометрах, работающих в процессе бурения скважин. Здесь имеют место экстремальные удары (величиной до 1000 g). Поэтому упругий подвес с двумя балочками оказался непригодным для КА.

Упругий подвес маятника КА имеет четыре балочки. Основное достоинство такого подвеса - большая ударная прочность, поскольку при любой ориентации боковых ускорений две балки подвеса остаются растянутыми и не дают возможности потери устойчивости и поломки сжимаемых балок.

Для использования в КА разработан совмещённый датчик, включающий в себя дифференциальный индуктивный ДУ и двоянный электродинамический (или магнитоэлектрический) ДС. Подвижные рабочие катушки ДС выполняют одновременно функции обмоток возбуждения ДУ. В ДУ и ДС используется общий магнитопровод. Это упрощает конструкцию электромеханических узлов прибора.

Требование наличия цифрового выхода у КА и отсутствие необходимости формирования аналогового сигнала открывает новые возможности для упрощения конструктивной схемы прибора, уменьшения выделяемой в нём мощности и повышения стабильности работы ДУ. Такая возможность реализуется путём применения разработанной в МГТУ импульсной следящей системы для приборов с совмещённым датчиком.

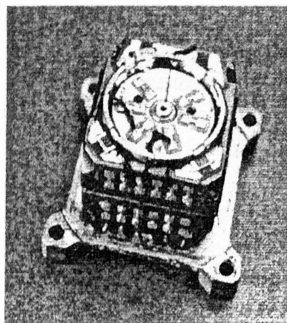
Особенностью конструкции КА является выполнение одинаковых центральных калибровочных отверстий в монтажных шайбах (наклеиваемых вместе с рабочими катушками ДС на поверхность лопасти маятникового узла) и в магнитопроводах. Эти отверстия используются как базовые в процессах приклейки катушек к монтажным шайбам и при приклейке шайб с катушками к лопасти маятникового узла. При сборке прибора оба кремниевых корпуса и маятник центрируются относительно друг друга с помощью вставляемой в отверстия центральной калибровочной иглы. После центрирования детали сжимаются пружинами и фиксируются клеем. По окончании сборки технологическая центральная игла удаляется. Место иглы может занять специальный ограничитель. При ударах максимальное радиальное смещение маятника в боковом направлении будет ограничено, что

исключает возможность поломки балок упругого подвеса.

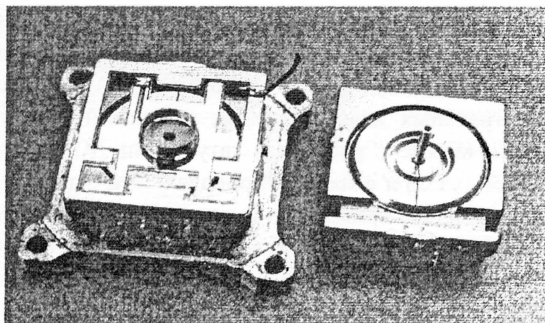
В акселерометрах с упругим подвесом инерционной массы большое внимание уделяют проблемам согласования материала маятникового узла и материала контактирующих с ним деталей, так как несовпадение их температурных коэффициентов расширения (ТКР) является одной из важных причин возникновения температурного дрейфа нулевого сигнала и температурного гистерезиса прибора. Очевидно, что с монокристаллом кремниевой пластины маятникового узла (плоскость среза $\langle 100 \rangle$) лучше всего согласуется кремниевый монокристалл с той же ориентацией среза. Поэтому именно из него в КА выполнены корпусные детали, контактирующие с опорной рамкой маятникового узла, а также монтажные шайбы, которые приклеиваются (вместе с катушками ДС) на лопасть маятникового узла. Магнитные системы СДУДС КА крепятся в кремниевых корпусах с помощью специальных термокомпенсаторов. В зависимости от выбора варианта конструкции узла термокомпенсатора и его материала по ТКР обеспечиваются различные варианты стабилизации или коррекции параметров КА.

Конструкция КА защищена патентами Кореи, России и США.

КА имеет три модификации. Первая модификация КА - с электродинамическим сдвоенным ДС. Эту модификацию имеют акселерометры КА-100 и КА-200Е. Вторая модификация КА, в которой сдвоенный магнитоэлектрический ДС использует внешние кольцевые постоянные магниты, применяется в приборах КА-200Р. Третья модификация прибора - со сдвоенным магнитоэлектрическим ДС, имеющим внутренние цилиндрические постоянные магниты. Эту модификацию имеют акселерометры КА-300. Конструкция акселерометра КА-200Р иллюстрируется рис. 2.



КА-200Р со снятым
защитным кожухом



КА-200Р с разобранным
чувствительным элементом

Рис. 2. Конструкция акселерометра КА-200Р

Проведен динамический структурный анализ узла подвеса маятника КА. Задачей анализа являлось определение мод движения узла подвеса маятника: характер движения частей исследуемой механической системы; виды деформации упругих участков кремниевой пластины; частоты, на которых происходят выявленные движения. Динамический структурный анализ узла подвеса маятника проводился с помощью компьютерной программы SDRС I-DEAS, реализующей моделирование механических систем методом конечных элементов.

В результате динамического анализа узла подвеса маятника были определены следующие режимы движения отдельных частей узла.

Первый режим – колебания маятника вокруг оси подвеса на частоте 6.97 Гц. Второй режим – колебания маятника вокруг оси плеча маятника на частоте 127.84 Гц. Третий режим: колебания верхней части опорной рамки относительно мест заделки (зашемления) платиков опорной кремниевой рамки между кремниевыми корпусами чувствительного элемента (ЧЭ) и совпадающие по фазе колебания маятника вокруг оси подвеса. Эти колебания происходят на частоте 134.51 Гц. Четвёртый режим: колебания верхней части опорной рамки относительно мест заделки (зашемления) платиков опорной кремниевой рамки между кремниевыми корпусами ЧЭ и противоположные по фазе колебания маятника вокруг оси подвеса. Эти колебания происходят на частоте 177.47 Гц. Пятый режим – колебания маятника вокруг оси чувствительности. При этих колебаниях происходят деформации балочек упругого подвеса маятника и верхней части опорной рамки в плоскости кремниевой пластины маятникового узла. Частота колебаний составляет 2941.89 Гц.

Остальные моды движения узла подвеса маятника являются более высокочастотными (находятся за пределами частот вибровозмущений, которым подвергается КА по условиям эксплуатации). Поэтому эти моды не анализируются.

В главе проведена разработка трёх вариантов ДС для КА (электродинамического, а также магнитоэлектрических с внешним кольцевым магнитом и с внутренним магнитом). По результатам разработки трёх вариантов ДС для КА выявлены следующие особенности.

Возможно создание акселерометра с электродинамическим ДС, имеющего диапазон измерения ± 20 g. Однако такой прибор будет выделять мощность около 2.5 Вт, причём больше 90 % мощности выделяется в электромагните ДС. Поэтому электродинамический ДС целесообразно применять в модификациях КА, имеющих диапазон измерения до ± 2 g.

Магнитоэлектрический ДС с внешним кольцевым магнитом позволяет создать акселерометр с максимальным измеряемым ускорением около

70 g, если в качестве материала магнитопровода применять электротехническую сталь (с индукцией насыщения $B_s = 2.2$ Тл), или около 35 g, если в качестве материала магнитопровода применять пермаллой (с индукцией насыщения $B_s = 1.2$ Тл). Однако при использовании в составе акселерометра ДС с внешним кольцевым постоянным магнитом необходимо обеспечить эффективную экранировку магнитной системы ДС от влияния внешних магнитных полей.

Магнитоэлектрический ДС с внутренним магнитом имеет оптимальные параметры для использования в навигационном акселерометре с диапазоном измерения от ± 5 g до ± 20 g.

В главе представлены ход и результаты экспериментального исследования СДУДС. Исследования СДУДС подтвердили пригодность использования такого датчика в составе КА. Проанализированные параметры датчика позволяют ему нормально функционировать в составе компенсационного акселерометра.

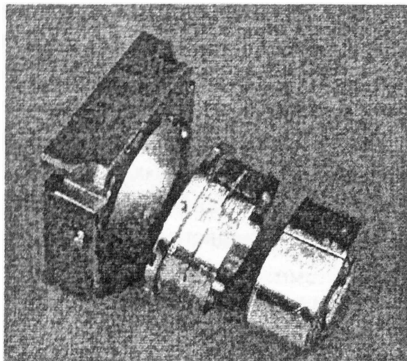


Рис. 3. Кремниевый корпус, термокомпенсатор и магнитная система СДУДС

В качестве корпусной детали в каждом из двух узлов корпуса ЧЭ КА используется кремниевая деталь (кремниевый корпус). Внутри этой кремниевой детали монтируется магнитопровод СДУДС, изготовленный из пермаллоя, феррита или из магнитотвёрдого материала. Поскольку ТКР кремния и материала магнитопровода существенно различны, а температурный диапазон эксплуатации КА велик, для соединения этих элементов прибора используется специальная соединительная деталь – упруго деформируемый термокомпенсатор.

При этом конструкция термокомпенсатора рассчитана таким образом, чтобы исключить наличие резонансов системы “термокомпенсатор + магнитопровод” в диапазоне частот (20 ... 2000) Гц.

При проектировании КА разрабатывались два варианта конструкции узла корпуса ЧЭ – А и В. В обоих вариантах термокомпенсатор выполнен в виде цилиндрической втулки, расположенной в зазоре между кремниевым корпусом и магнитопроводом магнитной системы. Фотография кремниевого корпуса, термокомпенсатора и магнитной системы СДУДС, входящих в состав узла корпуса ЧЭ, приводится на рис. 3.

В варианте А конструкции узла корпуса ЧЭ магнитная система СДУДС закрепляется (вклеивается) во внутренний участок втулки термокомпенсатора, то есть в участок втулки термокомпенсатора, который обращён к маятнику. Соответственно внешний участок втулки термокомпенсатора вклеивается в кремниевый корпус. Втулка термокомпенсатора имеет длину, примерно равную длине чашеобразного магнитопровода магнитной системы.

В варианте В конструкции рассматриваемого узла (как и в варианте А) втулка термокомпенсатора имеет длину, примерно равную длине чашеобразного магнитопровода. Но при этом участок втулки термокомпенсатора, обращённый к маятнику, закреплён на кремниевом корпусе. Другой участок втулки термокомпенсатора, дальний от маятника, закреплён на магнитопроводе.

Возможны несколько версий реализации обоих вариантов конструкции узла корпуса ЧЭ, которые позволяют решать задачи температурной стабилизации взаимного положения ротора и статора СДУДС или компенсации температурного дрейфа нулевого сигнала акселерометра. Для решения второй из указанных задач в диссертации разработана модель конструкции КА, в которой температурный дрейф нулевого сигнала акселерометра компенсируется изменением момента из-за соответствующей деформации упругого подвеса маятника. С использованием этой модели выведены зависимости для расчёта значения ТКР термокомпенсаторов КА.

В ходе работ по созданию КА был разработан и изготовлен макет цифрового контроллера контура регулирования (ЦККР) для компенсационного прибора. Главной целью этой разработки является исследование характеристик акселерометра с цифровым компенсационным контуром. Макет ЦККР имеет функциональную избыточность, но это позволяет реализовать и исследовать несколько разновидностей цифрового контура компенсации: контур компенсации с цифровым контроллером и с управлением персональным компьютером или контур компенсации с цифровым контроллером и с управлением МК. Разработанный ЦККР позволяет применять при исследовании различные варианты стабилизатора тока (СТ) и различные варианты предварительного усилителя (ПУ): в гибридном исполнении и в исполнении на дискретных элементах.

В ходе работ по созданию цифрового варианта компенсационного контура КА были разработаны и изготовлены два типа гибридных схем - ПУ и СТ.

Использование ЦККР даёт возможность реализовать концепцию “интеллектуального” акселерометра. В этом случае функции управления контуром регулирования, обработки данных и интерфейсного соединения с

внешними устройствами выполняются МК. Реализация большого числа специальных функций в цифровом акселерометре обеспечивается путём применения внутреннего стандартного программного обеспечения МК.

Реализация представляемой концепции позволяет акселерометру “самостоятельно” решать многие важные задачи его регулировки и эксплуатации.

- Цифровая регулировка схемы ДУ в собранном акселерометре и контроль процессов в электромеханическом узле прибора.
- Индивидуальная цифровая регулировка контура компенсации акселерометра в зависимости от области применения прибора и с учётом особенностей конкретного электромеханического узла.
- Измерение температуры акселерометра и управление системой термостатирования (при наличии многоканального АЦП в составе МК).
- Создание базы данных акселерометра: информация о результатах тестирования акселерометра на испытательном оборудовании может храниться в памяти МК.
- Алгоритмическая компенсация ошибок.
- Самоконтроль акселерометра.

В третьей главе рассматриваются три основных технологических процесса, разработанных в ходе работ по созданию различных модификаций КА. Этими технологическими процессами являются: изготовление маятникового узла акселерометра из монокристаллического кремния методом анизотропного травления, сборка акселерометра и регулировка параметров акселерометра. При этом часть регулировочных операций выполняется в ходе технологического процесса сборки акселерометра.

Большинство деталей для КА изготавливается механической обработкой из металлов и сплавов, традиционных для прецизионного приборостроения. Этими материалами являются: магнитомягкие сплавы – пермаллой; магнитотвёрдые материалы – сплавы типа “Columax”; хромистая сталь; никель-кобальтовый и алюминий-магниевый сплавы; прецизионные сплавы с заданным температурно стабильным коэффициентом упругости и с заданным ТКР (типа “Инвар”); обезжелезненный намоточный медный провод. Главные детали КА изготавливаются в основном по 6 - 7 квалитетам точности, а главные посадочные размеры в этих деталях – по 4 - 5 квалитетам точности.

Однако часть основных деталей КА, определяющих в значительной мере точностные характеристики прибора, изготавливается из монокристаллического кремния. Одна из этих кремниевых деталей – маятниковый узел – изготавливается методом анизотропного травления кремния. Но ещё две детали КА – корпус ЧЭ и кремниевая шайба – изготавливаются нетрадици-

онными в приборостроении для монокристаллического кремния методами – резкой, шлифовкой и доводкой деталей алмазными инструментами.

Оригинальный технологический процесс изготовления пластины маятникового узла акселерометра из монокристаллического кремния методом анизотропного травления был разработан в МГТУ. Автор этой диссертационной работы разработал модификацию технологического процесса, позволяющую изготовить требуемую конфигурацию пластины маятникового узла для КА.

Заготовкой для изготовления пластины маятникового узла является стандартная пластина монокристалла кремния, которая используется для производства электронных элементов в полупроводниковой промышленности.

Технологический процесс изготовления пластины маятникового узла КА из монокристаллического кремния включает в себя пять этапов анизотропного травления и один этап индивидуального изотропного дотравливания. При этом оригинальность технологического процесса заключается в том, что плавный переход от плоскости $\langle 111 \rangle$ к плоскости упругой балки $\langle 100 \rangle$ (как иллюстрирует рис. 1) формируется на этапах анизотропного травления монокристалла кремния.

Сборка и регулировка параметров КА. Наибольшая часть регулировочных операций выполняется в ходе технологического процесса сборки акселерометра. Краткий перечень и последовательность операций при сборке и регулировке приборов включает в себя:

- сборка основных конструкционных узлов прибора в соответствии с их сборочными чертежами и техническими требованиями к сборке (кроме узлов подвеса маятника и ЧЭ);
- сборка узла подвеса маятника и его регулировка;
- сборка узла ЧЭ и его регулировка;
- сборка и регулировка прибора, предварительная оценка качества сборки;
- герметизация прибора после обезгаживания и заполнения;
- установка усилителя и электрический монтаж прибора с усилителем;
- упаковка и передача на контроль параметров.

Конструктивные особенности приборов КА обуславливают проведение регулировок с целью получения минимального нулевого сигнала следующими методами: подбор катушек СДУДС по массе и величине активной составляющей электрического сопротивления; контроль прокачки маятника; электрическая балансировка ДУ с помощью резисторов из набора подобранных элементов; подбор магнитных систем по индуктивности; компенсация влияния установки кожуха.

Проверка качества сборки прибора выполняется после регулировки

прибора до окончательной установки кожуха с обогревателем. Проверка производится с использованием технологического пульта с замкнутой обратной связью в аналоговом контуре. Прибор закрепляется на технологическом приспособлении. Производится измерение напряжения обратной связи. Для перемещения маятника по рабочемузору используется внешний тестовый сигнал от источника постоянного тока. По взаимному расположению “кривых остаточного тока” (графиков зависимости напряжения обратной связи от величины тестового сигнала) оценивается свобода движения маятника и делается заключение о возможности дальнейшего использования прибора.

В четвёртой главе описаны виды испытаний КА и представлены результаты тестирования этих приборов.

Все изготовленные как в России, так и в Корее КА модификаций КА-100, КА-200Е, КА-200Р и КА-300 проходили статические испытания на автоматизированной системе тестирования (АСТ) акселерометров. Такие АСТ разработаны и изготовлены в МГТУ.

АСТ успешно эксплуатируются в Корее с 1995 года. Автор принимал участие в установке и отладке АСТ, а также проводил на них испытания акселерометров. В результате испытаний на АСТ было установлено, что все модификации КА имеют параметры, указанные в задании на разработку приборов.

Все модификации КА проходили испытания на центрифуге, на вибростенде угловой вибрации, на стенде линейной вибрации (как на случайную, так и на гармоническую вибрацию), а также на ударном стенде. Эти испытания показали, что КА удовлетворяют требованиям для всех возможных областей применения этих приборов.

В пятой главе рассмотрено одно из практических применений КА - их использование в качестве датчиков в системе ранней диагностики возможности разрушения строительных сооружений (СДС): мостов, высотных зданий, телевизионных и радиовещательных башен, дымовых труб и так далее. Одна из модификаций СДС была разработана в МГТУ при участии автора. Система предназначена для периодической проверки состояния строительных сооружений, находящихся в процессе эксплуатации, а также для оценки качества строительства указанных сооружений в процессе сдачи в эксплуатацию.

Измерительный блок СДС регистрирует низкочастотные угловые движения проверяемых сооружений и переменные составляющие ускорений, которые имеют место в процессе эксплуатации строительных сооружений. Переменные ускорения (вибрации) возникают под действием ветровой

нагрузки, воздействия транспортного потока, движения лифтов и так далее. Низкочастотные угловые движения являются следствием просадки почвы под фундаментом сооружения, тепловых деформаций конструкции сооружений, вызванных солнечным излучением, и тому подобное.

Система является переносной и устанавливается на сооружении с помощью регулируемых опор. Она измеряет три компоненты переменных вибрационных ускорений сооружения и анализирует их спектральный состав $S(f)$. Для типовой диагностики сооружений измерения проводятся с периодичностью один раз в месяц в течение 24 часов. По изменению спектра $S(f)$ во времени судят о начале процесса разрушения конструкции. Определяется также изменение угла α наклона конструкции во времени. По разомкнутому характеру регистрируемых циклограмм изменения угла α судят о нарастании отклонения сооружения от безопасного положения.

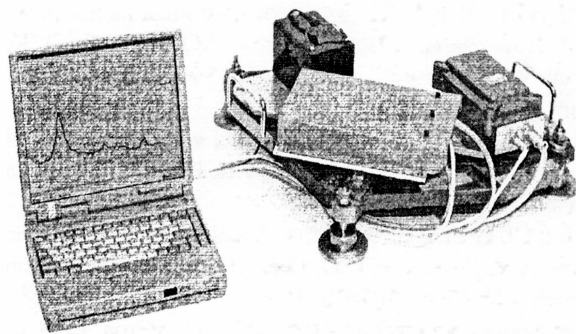


Рис. 4. Система диагностики сооружений

Фотография данной СДС представлена на рис. 4. При необходимости дистанционной передачи информации от управляющего компьютера в состав СДС включаются два радиомодема PC24E-H-FC и второй персональный компьютер.

Используя рассмотренную СДС были исследованы параметры движения более десяти мостов в России и Кореи, Останкинской телебашни и высотного корпуса МГТУ.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Разработана и исследована оригинальная и простая конструкция корейского кремниевого компенсационного маятникового акселерометра с совмещёнными датчиками угла и момента. Конструкция запатентована в России, Кореи и США.
2. На базе разработанной конструкции разработана технология изготовления приборов и их элементов и создан ряд первых в истории Кореи не-

дорогих прецизионных акселерометров, обеспечивающих потребности в различных областях применения.

3. Разработана и реализована оригинальная компенсационная схема триады акселерометров, в которой общий микроконтроллер входит в составы трёх компенсационных контуров акселерометров.

4. Исследованы основные инструментальные погрешности корейских акселерометров, определены пути компенсации погрешностей схемными и конструктивными методами.

5. Проведенные всесторонние экспериментальные исследования партий корейских акселерометров подтвердили наличие у этих приборов высоких метрологических характеристик и правильность основных положений, сформулированных в диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Пат. 2126161 (РФ), МКИ6 G 01 P 15/13. Компенсационный акселерометр / С.Ф. Коновалов, Г.М. Новосёлов, А.В. Полинков, Ч.О. Ли, Ч.Х. О, К.С. Ли; Коновалов Сергей Феодосьевич. - № 97100156/28; Заяв.27.06.94. // Открыт. Изобретения.... - 1999. - №4.
2. Pat. 6073490 (USA), Int. Cl.7 G 01 P 15/00. Servo Accelerometer / S.F. Konovalov, G.M. Novosyolov, A.V. Polynkov, C.O. Lee, J.H. Oh, K.S. Lee; Konovalov Sergey Feodosievich. - № 08/765576; 1994.
3. Pat. 0336151 (Korea), Int. Cl. G 01 P 15/08. Servo Accelerometer / S.F. Konovalov, G.M. Novosyolov, A.V. Polynkov, C.O. Lee, J.H. Oh, K.S. Lee; Konovalov Sergey Feodosievich. - № 1996-0707610; 1996.
4. Особенности проектирования навигационного акселерометра типа «Si-Flex» / С. Ф. Коновалов, Г. М. Новосёлов, К. С. Ли и др. // Докл. III Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - Санкт-Петербург, 1996. – С. 170-178.
5. Опыт разработки навигационных приборов на базе монокристалла кремния / С. Ф. Коновалов, Т. Н. Лаптева, К. С. Ли и др. // Микросистемная техника. – 2001. - №4. – С. 17-25.
6. Система диагностики состояния строительных сооружений / С. Ф. Коновалов, А. А. Елизаров, К. С. Ли и др. // Докл. IX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. - Санкт-Петербург, 2002. – С. 249-257.