

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-1>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/21TVN116.pdf>

DOI: 10.15862/21TVN116 (<http://dx.doi.org/10.15862/21TVN116>)

Статья опубликована 29.02.2016.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Челпанов И.Б., Козлов Д.П., Кочетков А.В. Построение комплексной системы организации калибровки микромеханических датчиков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1 (2016) <http://naukovedenie.ru/PDF/21TVN116.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/21TVN116

Работа выполнена при поддержке проекта 14-08-00347.

УДК 531.383

Челпанов Игорь Борисович

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия, г. Санкт-Петербург
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», Россия, г. Санкт-Петербург
Доктор технических наук, профессор
E-mail: igorhelp@yandex.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=3193

Козлов Дмитрий Петрович

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Россия, г. Санкт-Петербург
Аспирант
E-mail: igorhelp@yandex.ru

Кочетков Андрей Викторович

ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Россия, г. Пермь
Доктор технических наук, профессор
E-mail: soni.81@mail.ru
РИНЦ: http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=179080

Построение комплексной системы организации калибровки микромеханических датчиков

Аннотация. Предлагается структура единой системы постановки и представления требований к испытаниям и калибровки микромеханических датчиков (MEMS), при получении совокупностей метрологических характеристик, необходимых для решения различных практических задач. Для получения надежных и достоверных сведений о точностных характеристиках микромеханических приборов (ММП) применительно к их использованию для решения различных прикладных задач необходимо проведение комплексных калибровочных испытаний по общей программе, которая должна быть составлена на основе использования предложенных в этой работе перечней при использовании трехиндексного кода по предложенной многоаспектной классификации. При правильной организации таких испытаний могут быть получены конкретные значения широко используемых (в частности, паспортных) параметров ММП, а также выявлены и количественно оценены новые влияющие факторы.

Ключевые слова: микромеханические датчики; измерение; влияющие факторы; точность; классификация; испытания; требования; коды; гироскопы; аксерометры

1. Введение

Микромеханические инерциальные датчики (ММД), такие, как микромеханические акселерометры (ММА) и гироскопы (ММА), принцип действия которых заключается в измерении малых линейных или угловых перемещений инерционных масс (ИМ), вызываемых силами инерции и определяемых параметрами движения подвижных объектов, с наступлением двухтысячных годов получили широкое распространение. Они заняли прочное положение в системах индикации, контроля и автоматического управления самых разных отраслях техники применительно к разнообразным задачам, для решения которых необходимо измерение или контроль линейных ускорений [1]. Принципиальной особенностью конструкций этих датчиков является то, что все необходимые по принципу действия перемещения подвижных масс осуществляются только за счет деформаций упругих элементов. Принципиальной особенностью технологий изготовления является то, что чувствительные элементы ММГ и ММА, имеющие подвижные части массово и крупносерийно изготавливаются вместе с необходимой электроникой или по планарным технологиям на пластинах кремния нанесением покрытий по маскам с последующим травлением зацело, без сборочных операций или сборки путем соединения по плоскостям. Полностью исключены обмотки, магнитные цепи, размыкаемые контакты. При формировании выходных сигналов серьезные трудности были связаны с измерением очень малых изменений емкостей. Освоение на уровне массового производства этих технологий, перенесенных из микросхемной техники, явилось важнейшим этапом развития приборостроения.

Следствием их низкой стоимости при массовом производстве явилось значительное расширение областей применения. Необходимо наведение порядка в совокупности реализуемых и планируемых испытаний или процедур калибровки. В данной работе предлагается структура единого представления совокупностей таких процедур, основанная на многоаспектной классификации.

2. Наиболее важные показатели ММД в зависимости от использования

Традиционно акселерометры широко использовались для измерения виброускорений на транспортных средствах, двигателях в системах различного назначения, энергетических установках и пр. Диапазон частот измерений определяется в первую очередь масштабом объекта. Для мостов, подъемных кранов, мачт, больших судов нижняя граница может быть порядка десятых герца, для малых объектах эта граница может начинаться с единиц или даже десятков герц. На одном объекте может устанавливаться целая система акселерометров, тогда по совокупностям их выходных сигналов может реконструироваться распределение виброускорений по конструкциям с учетом изменчивости не только амплитуд, но и спектральных характеристик. Часто в каждой из точек достаточен один одноосный акселерометр. В определенных случаях важны также соотношения свойств виброускорений по осям. Необходимо иметь в виду, что виброускорение – векторная величина, в реальных условиях в конкретном месте виброперемещения могут быть одноосными, плоскими или пространственными. При надежных предварительных сведениях о соотношениях параметров вибраций по осям, угловые параметры установки акселерометра выбираются так, чтобы измерительные оси были направлены по осям наибольших амплитуд. Но когда эти данные отсутствуют, а результаты должны быть надежными и подробными, акселерометры со взаимно перпендикулярными измерительными осями устанавливаются по триадам. По их выходным сигналам тогда восстанавливается трехмерное векторное поле ускорений, которое может рассматриваться, как стационарное или нестационарное, детерминированное или случайное. При цифровых выходах датчиков с кодовой модуляцией они могут работать на единый канал связи, и тогда структурная избыточность системы вполне допустима. При

малых массах и габаритах датчиков и малом энергопотреблении, но недостаточной надежности датчиков вследствие их низкой стоимости не представляет трудности осуществлять их резервирование (в частности на основе мажорирования их сигналов). Обычно невысокие требования к точности датчиков при измерениях виброускорений обуславливаются тем, что вибрационные процессы как правило сами по себе всегда нестабильны по параметрам (в первую очередь, по амплитудным), что в современной метрологии квалифицируется, как неопределенность (uncertainty).

Объекты различных классов при исследовании с помощью акселерометров имеет свою специфику. При этом на одном и том же объекте (например, на автомобиле: в системах АБС, в которых регулируется давление в гидросистеме торможения и в пневмосистемах наполнения подушек безопасности, для обнаружения явлений детонации или отказа свечей зажигания в некоторых цилиндрах) эти многочисленные ММД могут выполнять различные функции в разных подсистемах или устройствах. Интересной областью применения ММА является биомеханика спорта, потребителем может стать медицина при диагностике заболеваний нервной системы, вызывающих потерю ориентации и равновесия и даже при предотвращении травм.

Невысокая точность, конечно, ограничивает возможности их использования в прецизионных системах, однако велико число областей, в которых лишь на немногие метрологические характеристики налагаются ограничения, причем достаточно мягкие. Известно, например, что серьезным потребителем ММП являются производители дронов и летающих моделей с дистанционным ручным управлением. Важную задачу быстрого определения аварийного падения при обеспечении ударостойкости и сохранности жестких дисков («винчестеров») путем быстрой парковки головок решается по сигналам ММА (в процессе падения сигнал ММА обнуляется); аналогичные задачи могут быть актуальными и для других технических средств оперативного обнаружения аварийных ситуаций. Специалисты по защите и охране полагают, что для ММП и ММА могут быть актуальными задачи обнаружения очень малых поворотов и изменений ускорений движения или составляющих гравитационного ускорения.

Определение угловой скорости (для ММГ и ММА) используются при исследовательских испытаниях высокодинамичных подвижных объектов (самолетов, автомобилей, катеров) или при разрушающих испытаниях (например, краш-тестах) или установок с вращающимися роторами с целями определения действующих на объект сил и моментов. При этом обычно требуются широкие диапазоны измерений амплитуд и пиковых значений, но к точности измерения ускорений не предъявляются высокие требования.

Три ММГ и три ММА входят в состав инерциального модуля, по их сигналам последовательным интегрированием их сигналов дифференциальных уравнений кинематики определяются углы ориентации, линейные скорости и приращения координат объекта. Интегрированием акселерометров при использовании уравнений. В целом при высоких требованиях к точности важны постоянные и медленно изменяющиеся составляющие погрешностей. Применительно к автономным режимам работы модуля непосредственный смысл имеют вклады погрешностей ММП в интегралы от их выходных сигналов.

3. Требования к микромеханическим датчикам

Большое разнообразие прикладных задач требований к ММП приводит к разнообразию требований к их техническим характеристикам, в числе которых важное место занимают метрологические характеристики (МХ). Вследствие низкой стоимости ММД можно, с одной стороны, проводить их массовые испытания при одних и тех же воздействиях, чтобы можно было достоверность данных, а с другой стороны, варьировать испытательные воздействия для

более полного и разностороннего представления о свойствах. Вопросам структурированного описания и представления результатов разносторонних испытаний посвящен п. 3 данной работы. При этом можно обрабатывать методики калибровки, а затем распространять на другие средства измерения параметров движения.

Встает вопрос: можно и/или целесообразно составить для калибровки максимально полный перечень всех характеристик ММД, удовлетворит все группы потребителей? По силам ли производителям организовывать калибровку по большому числу показателей и приводить их перечень в паспортных данных? Наоборот, не лучше ли ориентироваться на ситуацию, когда ММД производятся по сериям с узкой специализацией, приспособленные по совокупностям своих характеристик к конкретным задачам? Однако специализация оказывается ограниченной немногими сериями, а чаще фирмы-производители выпускают ММД, как многоцелевые датчики универсального применения, что позволяет ограничивать их номенклатуру. При их калибровке для аттестации подразумевается общетехническое использование ММП, когда конечным результатом измерения считается последовательность значений измеряемой величины (составляющей угловой скорости или линейного ускорения).

В классической метрологии подобные измерения квалифицируются, как прямые. При этом представляется естественным объединить, интегрировать специфические требования, чтобы удовлетворить по возможности большинство потребителей. Такая попытка предпринята в стандартах *IEEE* [3, 4]. В них содержатся общие требования к ММА и ММГ, приводятся перечни характеристик и параметров нормируемых и подлежащих определению при калибровке, а также фрагменты методик необходимых для этого измерений. К сожалению показатели приводятся в несистематизированном виде, возможны разночтения; некоторые из важных показателей отсутствуют или содержатся в неудобоваримом виде. Совершенно очевидно, что некоторые из показателей введены наспех и только соответствуют умозрительным построениям.

Для наведения необходимого порядка и приведения в соответствие с традициями отечественной метрологии необходимо в максимальной степени использовать накопленный опыт. Серьезные исследовательские работы по определению характеристик ММП в России начались только в десятых годах [6, 7, 8]. К настоящему времени Число публикаций в российских изданиях по этой тематике превышает сотню, в их числе работы с участием авторов [9–18], сотрудников ОАО "Концерн ЦНИИ «Электроприбор» [19–23], ЛЭТИ [24], Гирооптика, ГУАП.

В номенклатуре точностных показателей или метрологических характеристик (МХ) всегда важны диапазоны измерения, они всегда приводятся в паспортных данных. В известных и распространенных "серьезных" приложениях в разной степени важны различные метрологические характеристики ММП.

При предварительной оценке пригодности ММП для работы с требуемой точностью в системах значительное место занимает математическое и полунатурное моделирование. Совершенствуется технология. Но надежные сведения и окончательные выводы о реально достигнутых показателях, о "профессиональной пригодности" получаются в только результате калибровочных испытаний и аттестации. В данной работе обсуждаются базовые вопросы испытаний без рассмотрения вопросов устройства и описания свойств структур приборов с помощью математических моделей, чему в литературе по ММП уделяется значительное внимание. Именно так принято в метрологии при аттестации, сертификации и поверке, когда имеют значение только результаты калибровки, а не техника достижения требуемых показателей.

4. Структура инструментальных погрешностей ММП

Необходимость проведения массовых подробных испытаний датчиков определенных типов никогда не оспаривалась. Однако только применительно к ММД, имеющим низкую стоимость, практически возможны массовые испытания, в том числе и разрушающие (например, при ударных воздействиях).

Если собрать, интегрировать и систематизировать требования во всех этих и многих других приложениях, то объемы необходимых испытаний и калибровочных работ для ММП в максимально полной совокупности применений окажутся необозримыми. Нужно еще дополнительно учитывать, что условиях массового или крупносерийного производства ММП их характеристики обладают значительной изменчивостью, различия основных параметров экземпляров даже в одной партии могут иметь порядок десяти процентов и более, и такой же порядок имели бы погрешности. При учете этого обстоятельства представлялось бы правильным каждый экземпляр ММД должен был бы иметь паспорт со своими индивидуальными данными. Для определенных применений это может быть совершенно несущественным, важна лишь работоспособность, а изменения параметров допустимы в широких пределах.

Сплошной индивидуальный контроль ММД по многим параметрам с индивидуальной паспортизацией приводил бы к многократному повышению себестоимости и цены. Поэтому ряд ведущих производителей ММП, таких, как *Analog Devices* вводит в типовую номенклатуру паспортных данных немногие точностные показатели, да и те являются нормативными, а реальные индивидуальные показатели могут значительно от них отличаться, причем эти отличия не нормируются. По месту создания модулей, устройств или систем, включающих ММП, если требуется, контрольные испытания по необходимым параметрам проводятся по месту эксплуатации. В разных организациях по разным методикам и на разном оборудовании проводились испытания и калибровка ММП (конечно, не массовая, а для немногих экземпляров) с определением обычно немногочисленных выбранных показателей, опубликованные результаты (например, [6, 19-23]), сами по себе представляют значительный интерес, однако в результате получаются как бы немногие изолированные фрагменты общей мозаичной картины.

Авторы данной публикации полагают, что для каждой новой модели (марки) ММП необходимо проводить по единой комплексной методике определять в любой форме (табличной, графики, формульные зависимости, математических моделей различных классов, дифференциальные уравнения) максимально полную совокупность исследовательских аттестационных испытаний, получить большую совокупность точностных параметров и характеристик с тем, чтобы в конкретных приложениях можно было бы оценить их пригодность к различным, в том числе перечисленным вариантам использования. В противоположность этому приемо-сдаточные и другие контрольные испытания могут быть как угодно сокращенными, достаточными для конкретных задач.

Принято представлять погрешность ММП в виде суммы

$$e = e_0 + \Delta K/K_0 x + e_n(x) + e_d + n(t) + e_{вф}, \quad (1)$$

где x – измеряемая величина (для ММГ – составляющая угловой скорости, для ММА – составляющая линейного ускорения), e_0 – смещение нуля, $\Delta K/K_0$ – относительная погрешность масштабного коэффициента, e_n – составляющая, обусловленная нелинейностью характеристики, e_d – динамическая погрешность, $n(t)$ – шум, $e_{вф}$ – целая совокупность составляющих дополнительных погрешностей, обусловленных влияющими факторами (температурой, вибрацией, магнитным полем и т.д.). Такое аддитивное представление удобно для первого приближения при анализе показателей точности, но в нем смешаны исходные

причины появления тех или иных составляющих погрешностей и типовые особенности их проявления. Кроме того, разделение условно, например, смещение нуля и изменения динамических характеристик могут проявляться, как следствие воздействия влияющих факторов (температуры, вибраций). Может также показаться, что представляющаяся естественной линейная форма (1) означает независимое друг от друга существование составляющих погрешности. Вследствие этого необоснованного предположения часто принимается, что в выходных сигналах ММП присутствует не зависящая ни от чего аддитивная постоянная составляющая, а свойства шума постоянны во времени. Допустимость (в определенных пределах) подобных предположений подлежит экспериментальной проверке.

При составлении максимально полного перечня точностных показателей ММП целесообразно ориентироваться на недостаточно четко организованные стандарты *IEEE* [3, 4], но с учетом определения основных понятий и трактовки с позиций современной метрологии в соответствии с [5]. Важно, что для ММП функции преобразования всегда очень близки к линейным (номинально они линейные). Практика показала, что эти нормативные документы, естественно, не являющиеся обязательными, нет необходимости и не следует пытаться переносить буквально один к одному на все прикладные задачи измерений. Оказываются необходимыми переосмысление, приведение их в логическую систему с исключением явно несущественных показателей и разработки новых методик. На основе многоаспектной классификации должна быть проработана по возможности полная программа проведения целого комплекса калибровочных испытаний ММП, с тем, чтобы по результатам их проведения можно было бы получить по возможности возможно более полные данные, для всех прикладных задач, как вполне определенных к настоящему времени, так и перспективных.

5. Систематизация аспектов (факторов) калибровки ММП на основе многоаспектной классификации

В этой работе поставлено задачей представить в организованной систематизированной форме множество возможных процедур калибровки ММП для того, чтобы представить все многообразие возможных вариантов. Простое перечисление невозможно использовать. Предлагается использовать трехмерную или трехфакторную классификацию конкретных вариантов испытаний.

Первым аспектом (фактором) считается вид определяемых характеристик, вторым является аспект (фактор) условий проявления и определения этого фактора, Для системного планирования калибровки и получения по возможности полной совокупности данных о точностных показателях. Предлагается использовать следующий трехмерный код многоаспектной классификации. Перечень 1 получивших наиболее широкое распространение точностных показателей, входящих в число МХ.

- 1.1. Смещение нуля или постоянная составляющая.
- 1.2. Масштабный коэффициент (коэффициент преобразования).
- 1.3. Норма нелинейности.
- 1.4. Шум.
- 1.5. Динамические характеристики.
- 1.6. Прогрессирующий медленный дрейф.

Для каждого из указанных показателей необходима конкретизация формы представления для того, чтобы было определено, значения каких именно показателей должны

регистрироваться, нормироваться, приводиться в паспортах, фигурировать в отчетах по испытаниям, и, если требуется, будет использоваться в математических моделях, используемых в компьютерных расчетах.

Вторым аспектом (фактором) Предлагается следующий перечень 1 форм представления показателей.

- 2.1. Условно среднее Паспортное значение показателя для типа (модели ММП) или партии.
- 2.2. Диапазон изменений (или разброс) показателя для различных экземпляров одного и того же ММП.
- 2.3. Характер и диапазон непрерывных изменений во времени показателя для отдельных экземпляров датчиков на больших интервалах времени (долговременная стабильность).
- 2.4. Изменчивость показателя от пуска к пуску (от включения к включению).
- 2.5. Изменение остаточной погрешности после введения поправок на систематические составляющие по результатам калибровки (при этом существенны методики и параметры процедур калибровки).
- 2.6. Изменения параметров во время интенсивных воздействий или после них (например, в плане учета последствия после удара).

При использовании различных форм перечня 2, который в дальнейшем может быть пополнен, целесообразно получить и проанализировать все или, по крайней мере, наиболее важные показатели, из перечня 1, в первую очередь, смещение нуля и масштабный коэффициент. Подобные исследовательские испытания до сих пор проводились только выборочно. Но и при этом оказывалось возможным выявлять новые эффекты, объяснению которых, однако, не уделялось внимания. Часто этим и ограничиваются. Иногда это допустимо, если объяснения на уровне отчетливых физических представлений представляются неубедительными. Если считать, что характеристики составляющих погрешностей получены для условий в определенном смысле типичных для реальных условий работы, (в метрологии они квалифицируются, как нормальные), это может считаться достаточным. Однако если иметь в виду многообразие условий, то одномерная шкала недостаточна, нужно вводить дополнительные классификационные признаки.

Необходимо уточнить, что рассмотрение различных сочетаний аспектов (факторов) из перечней 1 и 2 предполагает возможности использования различных форм представлений и их унификация. Получение представительных данных калибровки при необходимости больших объемов статистических данных может растягиваться на очень большие сроки. Однако после того, как однажды весь цикл будет пройден, объемы можно обоснованно сокращать, исключая несущественные.

Для полноты картины необходим еще третий аспект (фактор), определяющий тип условий калибровки, воздействий одной и той же или различной физической природы и соответственно категорией необходимого стендового оборудования. Он определяется следующим перечнем 3.

- 3.1. Без воздействий (на неподвижном основании). Относительно невысокая точность ММП как правило не требует специальных средств стабилизации основания.
- 3.2. При задании измеряемой величины, для ММГ — угловой скорости, для ММА — центробежным ускорением (дискретными последовательностями постоянных

значений или плавным изменением), что реализуется как правило на поворотных стендах (в частности, на центрифугах).

- 3.3. При вибрациях на вибростендах, воспроизводящих виброускорения и задающих перегрузки (по синусоидальному и по иным законам).
- 3.4. При ударах на ударных стендах.
- 3.5. При акустических воздействиях.
- 3.6. При изменении температуры.
- 3.7. Электромагнитные поля.

.....

Приведенные списки аспектов (факторов) мыслятся, как открытые для дополнений. В результате проведения совокупностей процедур калибровки получается трехмерный массив ячеек, который определяет многоаспектную классификацию в принципе охватывает совокупности всех возможных сочетаний характеристик ММД. В реальных условиях ограничений на испытания лишь немногие ячейки будут заполнены; просмотр структуры позволит обнаружить «белые пятна» в программах комплексных испытаний (калибровки).

Полная картина точностных свойств ММД может быть получена проведением испытаний при различных сочетаниях пунктов по перечням 1 и 2 при наличии технических средств по перечню 3. При этом при большом разнообразии вариантов испытаний объемы получаемых данных могут обладать значительной избыточностью, тогда перекрестное сравнение позволит повышать степень достоверности. Каждый вариант представляется трехиндексным кодом, например, 1.2:2.4:3.2.

Тематика выбора алгоритмов преобразования сигналов ММД с целью определения характеристик инструментальных при калибровке и соответствующего программного обеспечения самостоятельна, ее рассмотрение далеко выходит за рамки данной работы. Различные подходы, способы регистрации, алгоритмы и параметры обработки данных испытаний при определении параметров составляющих инструментальных погрешностей рассматриваются в большом числе публикаций, в частности, в [15]. При необходимости определения большого числа параметров различных составляющих погрешностей алгоритм преобразования реализуется в виде системы, включающей параллельные каналы преобразования. При выборе алгоритмов целесообразно ориентироваться на специфику наиболее ответственных из задач, решаемых с использованием сигналов ММД. Наиболее тяжелыми требованиями к точности ММД характеризуются задачи в составе инерциальных модулей, когда для получения результатов измерений выходные сигналы ММД интегрируются, тогда достаточно определять и регистрировать интегралы от выходных сигналов. В подобных случаях алгоритмы преобразования при определении показателей точности строятся, как проблемно-ориентированные [14].

6. Некоторые результаты испытаний ММА

Выборочные исследовательские испытания ММА, проведенные авторами на неподвижном основании и на доступном стендовом оборудовании, позволили не только отработать методики и найти численные значения параметров составляющих погрешностей конкретных образцов ММП, но и получить качественно понятные численные, но и выявить новые эффекты. Ниже перечислены некоторые качественно новые результаты, полученные авторами.

1. Постоянная составляющая погрешности ММГ при периодических законах изменения измеряемой угловой скорости или вибрациях, не имеющих постоянных составляющих, близка к смещению нуля, определенному на неподвижном основании при малых амплитудах, но значительно (на десятки процентов) отличается от него при больших амплитудах. Поэтому в целом не подтверждается гипотеза об аддитивной составляющей (постоянной составляющей систематической погрешности), не зависящей от измеряемой величины.

2. На больших интервалах времени в смещении нуля наблюдаются дрейфы, вследствие чего поправки, вырабатываемые при калибровке, устаревают, и их введение становится все менее эффективными.

3. Частотная полоса пропускания, как наиболее простая динамическая характеристика ММП, зависит от уровня и направления вибрационных воздействий, уменьшение может достигать 20%.

4. При испытаниях на ударные воздействия во время действия ударов с большими пиковыми значениями ММП может полностью терять работоспособность (кратковременный отказ), но потом нормальный режим работы восстанавливается за короткое время, меньшее, чем время выхода на рабочий режим при пуске; при этом погрешности вычисления интегралов, по которым оцениваются погрешности инерциальных модулей по углам и скоростям, часто остаются малыми.

Выводы

Для получения надежных и достоверных сведений о точностных характеристиках микромеханических приборов (ММП) применительно к их использованию для решения различных прикладных задач необходимо проведение комплексных калибровочных испытаний по общей программе, которая должна быть составлена на основе использования предложенных в этой работе перечней **1** и **2** при учете **3** при использовании трехиндексного кода по предложенной многоаспектной классификации. При правильной организации таких испытаний не только могут быть получены конкретные значения широко используемых (в частности, паспортных) параметров ММП, но и выявлены и количественно оценены новые влияющие факторы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов В.Я. Микромеханические приборы. Учебное пособие. - М.: Машиностроение. 2007.
2. Синельников А.Е., Челпанов И.Б. Измерения векторных и тензорных величин // Измерительная техника. 2001. №4.
3. IEEE Std 1293TM-1998 (R2008).
4. IEEE Std R2008 1293TM -1998 Руководство по тестированию линейных одноосных безгироскопных акселерометров.
5. РМГ 29-2013 Метрология. Основные термины и определения.
6. Одинцов А.А. Калибровка инерциальных модулей // Гироскопия и навигация. 2010, №1.
7. Мешковский И.К., Пешехонов В.Г. Результаты испытаний микромеханического гироскопа RR-типа // Гироскопия и навигация. 2010. №4.

8. Пешехонов В.Г., Некрасов Я.А., Кергерис Ц., Хаддара Х., Эльсайед А. Пфлюгер П. Результаты испытаний установочной партии микромеханических гироскопов RR-типа // Гироскопия и навигация. 2011, №1.
9. Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Метрологические характеристики микромеханических приборов // Метрология. 2014. №9.
10. Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Определение статической калибровочной характеристики микромеханических приборов при испытаниях // Контроль. Диагностика. 2013. №5.
11. Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Введение поправок на смещение нуля датчика угловой скорости при определении углов, скоростей и координат // Приборы. 2013. №11.
12. Челпанов И.Б., Евстифеев М.И., Кочетков А.В. Методы испытаний микромеханических датчиков и приборов // Приборы. 2014. №4.
13. Евстифеев, М.И. Погрешности микромеханического гироскопа на вибрирующем основании // Гироскопия и навигация. 2002. №2. С. 19-25.
14. Евстифеев М.И., Унтилов А.А. Исследование инструментальных погрешностей микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2004. №4. – С. 66-70.
15. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Ковалев А.С., Розенцвейн Д.В. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях // Гироскопия и навигация. 2011. №1. С. 49-59.
16. Евстифеев М.И., Челпанов И.Б. Елисеев Д.П., Розенцвейн Д.В. Особенности испытаний микромеханических гироскопов на ударные воздействия // Гироскопия и навигация. 2011, №3.
17. Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Системно-ориентированная обработка результатов испытаний микроэлектронномеханических датчиков скоростей и ускорений // Нано- и микросистемная техника. 2013, №5.
18. Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Многоцелевые алгоритмы оценки составляющих сигналов микромеханических датчиков угловой скорости и акселерометров // Нано- и микросистемная техника. 2013, №6.
19. Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Метрологическое обеспечение испытаний микромеханических приборов // Измерительная техника. 2013. №9.
20. Челпанов И.Б., Евстифеев М.И., Кочетков А.В., Метрологические характеристики микромеханических приборов, используемых в системах навигации и управления подвижными объектами / Метрология (приложение к журн. "Измерительная техника". 2014. №9.
21. Челпанов И.Б. Показатели точности датчиков инерциальных модулей: определение по результатам испытаний и нормирование // Труды 7 Российской мультиконференции по проблемам управления. СПб. 2014.
22. Евстифеев М.И., Ковалев А.С., Лычев Д.И., Розенцвейн Д.В. Результаты экспериментального исследования влияния линейных перегрузок на характеристики микромеханического гироскопа RR-типа. Труды КМУ2. 2010.
23. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Ковалев А.С., Розенцвейн Д.В. Исследование динамики микромеханического гироскопа при механических воздействиях // НТВ СПб ГУ ИТМО. 2011. №4 (74).

24. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Ковалев А.С., Розенцвейн Д.В. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях // Материалы XXVII конференции памяти Н.Н. Острякова. 2010.
25. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Ковалев А.С., Розенцвейн Д.В. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях // Гироскопия и навигация. 2011. №1.
26. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П., Ковалев А.С., Чапурский А.П. Исследование влияния вибраций на характеристики микромеханического гироскопа. XIII конф. молодых учёных "Навигация и управление движением". Гироскопия и навигации. 2011. №2. С. 117.
27. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Chelpanov I.B. Enhancing the Mechanical Resistance of Micromechanical Gyros // Gyroscopy and Navigation, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 115-122.
28. Y.A. Nekrasov, N.V. Moiseev, S.V. Pavlova, R.G. Lukshonkov. Improving the performance of Russianmade RR-type MEMS gyro // 21st St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 26 - 28 May 2014, pp. 226-235.
29. Nekrasov Y.A., Pavlova S.V., Moiseev N.V. MEMS Gyro Vibration Immunity and its Measurement with TIRA Shaker // IEEE 2015 Instrumentation and Measurement technology Conference. – 2015. – pp. 1763-1768.
30. Некрасов Я.А., Беляев Я.В. / Влияние линейных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа ММГ-ЭП1 // Материалы XXIX конференции памяти Н.Н. Острякова. - Санкт-Петербург. 2014. С. 14-19.
31. Некрасов Я.А., Павлова С.В., Люкшонков Р.Г. Улучшение эксплуатационных характеристик отечественного микромеханического гироскопа RR-типа // Сборник материалов XXI Санкт-Петербургской Международной конференции по интегрированным навигационным системам. - СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2014. - С. 226-235.
32. Моисеев Н.В. Микромеханический гироскоп компенсационного типа на основе специализированной интегральной схемы // Сборник трудов XI научно-технической конференции молодых ученых "Навигация и управление движением". - СПб.: ГНЦРФ – ЦНИИ "Электроприбор". 2009.
33. Боронахин А.М., Подгорная Л.Н., Бохман Е.Д., Филипья Н.С., Филатов Ю.В., Шалымов Р.В., Ларионов Д.Ю. Использование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути // Гироскопия и навигация. 2012. №1.

Chtlpanov Igor Borisivich

JSC Kontsern Central Research Institute «Elektropribor», Russia, St. Petersburg
St. Petersburg national research university of information technologies, mechanics and optics
Russia, St. Petersburg
E-mail: igorchelp@yandex.ru

Kozlov Dmitry Petrovich

JSC Kontsern Central Research Institute «Elektropribor», Russia, St. Petersburg
E-mail: igorchelp@yandex.ru

Kochetkov Andrey Viktorovich

Perm national research polytechnical university, Russia, Perm
E-mail: soni.81@mail.ru

Creation of complex system of the organization of calibration of micromechanical sensors

Abstract. The structure of uniform system of statement and submission of requirements to tests and calibrations of micromechanical sensors (MEMS) is offered, when obtaining sets of metrological characteristics necessary for the solution of various practical tasks. Obtaining reliable and authentic information about precision characteristics of micromechanical devices (MMP) in relation to their use for solution of various applied tasks requires carrying out complex calibration tests according to general program which has to be made on the basis of use of the lists offered in this work when using a three-index code by offered multidimensional classification. At the correct organization of such tests concrete values widely used (in particular, passport) MMP parameters can be received, and also the new influencing factors are revealed and quantitatively estimated.

Keywords: micromechanical sensors; measurement; the influencing factors; accuracy; classification; tests; requirements; codes; gyroscopes; aksererometra

REFERENCES

1. Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory. Uchebnoe posobie. - M.: Mashinostroenie. 2007.
2. Sinel'nikov A.E., Chelpanov I.B. Izmereniya vektornykh i tenzornykh velichin // Izmeritel'naya tekhnika. 2001. №4.
3. IEEE Std 1293™-1998 (R2008).
4. IEEE Std R2008 1293™ -1998 Rukovodstvo po testirovaniyu lineynykh odnoosnykh bezgiroskopnykh akselerometrov.
5. RMG 29-2013 Metrologiya. Osnovnye terminy i opredeleniya.
6. Odintsov A.A. Kalibrovka inertsiyal'nykh moduley // Giroskopiya i navigatsiya. 2010, №1.
7. Meshkovskiy I.K., Peshekhonov V.G. Rezul'taty ispytaniy mikromekhanicheskogo giroskopa RR-tipa // Giroskopiya i navigatsiya. 2010. №4.
8. Peshekhonov V.G., Nekrasov Ya.A., Kergeris Ts., Khaddara Kh., El'sayed A. Pflyuger P. Rezul'taty ispytaniy ustanovochnoy partii mikromekhanicheskikh giroskopov RR-tipa // Giroskopiya i navigatsiya. 2011, №1.
9. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Metrologicheskie kharakteristiki mikromekhanicheskikh priborov // Metrologiya. 2014. №9.
10. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Opredelenie staticheskoy kalibrovochnoy kharakteristiki mikromekhanicheskikh priborov pri ispytaniyakh // Kontrol'. Diagnostika. 2013. №5.
11. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Vvedenie popravok na smeshchenie nulya datchika uglovoy skorosti pri opredelenii uglov, skorostey i koordinat // Pribory. 2013. №11.
12. Chelpanov I.B., Evstifeev M.I., Kochetkov A.V. Metody ispytaniy mikromekhanicheskikh datchikov i priborov // Pribory. 2014. №4.
13. Evstifeev, M.I. Pogreshnosti mikromekhanicheskogo giroskopa na vibriruyushchem osnovanii // Giroskopiya i navigatsiya. 2002. №2. S. 19-25.
14. Evstifeev M.I., Untilov A.A. Issledovanie instrumental'nykh pogreshnostey mikromekhanicheskogo giroskopa // Giroskopiya i navigatsiya. 2004. №4. – S. 66-70.
15. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Kovalev A.S., Rozentsveyn D.V. Rezul'taty ispytaniy mikromekhanicheskikh giroskopov pri mekhanicheskikh vozdeystviyakh // Giroskopiya i navigatsiya. 2011. №1. S. 49-59.
16. Evstifeev M.I., Chelpanov I.B. Eliseev D.P., Rozentsveyn D.V. Osobennosti ispytaniy mikromekhanicheskikh giroskopov na udarnye vozdeystviya // Giroskopiya i navigatsiya. 2011, №3.
17. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Sistemno-orientirovannaya obrabotka rezul'tatov ispytaniy mikroelektronnomekhanicheskikh datchikov skorostey i uskoreniy // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2013, №5.
18. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Mnogotsелеvye algoritmy otsenki sostavlyayushchikh signalov mikromekhanicheskikh datchikov uglovoy skorosti i akselerometrov // Nano- i mikrosistemnaya tekhnika. 2013, №6.

19. Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Metrologicheskoe obespechenie ispytaniy mikromekhanicheskikh priborov // *Izmeritel'naya tekhnika*. 2013. №9.
20. Chelpanov I.B., Evstifeev M.I., Kochetkov A.V., Metrologicheskie kharakteristiki mikromekhanicheskikh priborov, ispol'zuemykh v sistemakh navigatsii i upravleniya podvizhnymi ob"ektami / *Metrologiya (prilozhenie k zhurn. "Izmeritel'naya tekhnika"*. 2014. №9.
21. Chelpanov I.B. Pokazateli tochnosti datchikov inertsial'nykh moduley: opredelenie po rezul'tatam ispytaniy i normirovanie // *Trudy 7 Rossiyskoy mul'tikonferentsii po problemam upravleniya*. SPb. 2014.
22. Evstifeev M.I., Kovalev A.S., Lychev D.I., Rozentsveyn D.V. Rezul'taty eksperimental'nogo issledovaniya vliyaniya lineynykh peregruzok na kharakteristiki mikromekhanicheskogo giroskopa RR-tipa. *Trudy KMU2*. 2010.
23. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Kovalev A.S., Rozentsveyn D.V. Issledovanie dinamiki mikromekhanicheskogo giroskopa pri mekhanicheskikh vozdeystviyakh // *NTV SPb GU ITMO*. 2011. №4 (74).
24. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Kovalev A.S., Rozentsveyn D.V. Rezul'taty ispytaniy mikromekhanicheskikh giroskopov pri mekhanicheskikh vozdeystviyakh // *Materialy XXVII konferentsii pamyati N.N. Ostryakova*. 2010.
25. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Kovalev A.S., Rozentsveyn D.V. Rezul'taty ispytaniy mikromekhanicheskikh giroskopov pri mekhanicheskikh vozdeystviyakh // *Giroskopiya i navigatsiya*. 2011. №1.
26. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Kovalev A.S., Chapurskiy A.P. Issledovanie vliyaniya vibratsiy na kharakteristiki mikromekhanicheskogo giroskopa. XIII konf. molodykh uchenykh "Navigatsiya i upravlenie dvizheniem". *Giroskopiya i navigatsii*. 2011. №2. S. 117.
27. Evstifeev M.I., Eliseev D.P., Chelpanov I.B. Enhancing the Mechanical Resistance of Micromechanical Gyros // *Gyroscopy and Navigation*, 2015, Vol. 6, No. 2, pp. 115-122.
28. Y.A. Nekrasov, N.V. Moiseev, S.V. Pavlova, R.G. Lukshonkov. Improving the performance of Russianmade RR-type MEMS gyro // *21st St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, 26 - 28 May 2014, pp. 226-235.
29. Nekrasov Y.A., Pavlova S.V., Moiseev N.V. MEMS Gyro Vibration Immunity and its Measurement with TIRA Shaker // *IEEE 2015 Instrumentation and Measurement technology Conference*. – 2015. – pp. 1763-1768.
30. Nekrasov Ya.A., Belyaev Ya.V. / Vliyanie lineynykh vibratsiy, udarov i akusticheskikh pomekh na kharakteristiki mikromekhanicheskogo giroskopa MMG-EP1 // *Materialy XXIX konferentsii pamyati N.N. Ostryakova*. - Sankt-Peterburg. 2014. S. 14-19.
31. Nekrasov Ya.A., Pavlova S.V., Lyukshonkov R.G. Uluchshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik otechestvennogo mikromekhanicheskogo giroskopa RR-tipa // *Sbornik materialov XXI Sankt-Peterburgskoy Mezhdunarodnoy konferentsii po integrirovannym navigatsionnym sistemam*. - SPb.: OAO «Kontsern «TsNII «Elektropribor». 2014. - S. 226-235.

32. Moiseev N.V. Mikromekhanicheskiy giroskop kompensatsionnogo tipa na osnove spetsializirovannoy integral'noy skhemy // Sbornik trudov XI nauchno-tehnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh "Navigatsiya i upravlenie dvizheniem". - SPb.: GNTsRF – TsNII "Elektropribor". 2009.
33. Boronakhin A.M., Podgornaya L.N., Bokhman E.D., Filipenya N.S., Filatov Yu.V., Shalymov R.V., Larionov D.Yu. Ispol'zovanie mikromekhanicheskikh chuvstvitel'nykh elementov v zadachakh diagnostiki rel'sovogo puti // Giroskopiya i navigatsiya. 2012. №1.