

С. Л. ЛЕВИН, С. А. ВОЛОБУЕВ, Е. А. ЯКУШИНА

НАВИГАЦИОННЫЕ АКСЕЛЕРОМЕТРЫ: ОПЫТ РАЗРАБОТКИ

В статье дан обзор и сравнительный анализ конструкций акселерометров, разработанных в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» за последние десятилетия. Рассмотрены шесть видов таких устройств: поплавковые с жидкостной разгрузкой опор; «сухие» маятниковые компенсационные; с бесконтактным (магнитным и электростатическим) подвесом; криогенные и микромеханические. Для каждого вида описан принцип действия, а также конструктивные особенности, точностные характеристики и области применения. Показана эволюция подходов к снижению влияния механического трения – от гидростатической разгрузки до полного отказа от механического контакта. Отдельное внимание уделено перспективным разработкам: криогенным и электростатическим акселерометрам для космических научных экспериментов, а кроме того, современным микромеханическим датчикам для навигации и потребительской электроники. Приведены результаты сопоставления отечественных и зарубежных аналогов. Сделан вывод о рациональном сочетании различных типов акселерометров в зависимости от требуемой точности, условий эксплуатации и стоимости.

Ключевые слова: акселерометр, кажущееся ускорение, линейное ускорение.

Введение

Современные инерциальные навигационные системы (ИНС) представляют собой сложные автономные информационно-измерительные комплексы, первичными датчиками в которых являются измерители кажущегося ускорения – акселерометры и измерители угловой скорости (или угла) – гироскопы. В развитие инерциальной навигации внесли большой вклад российские ученые Б.В. Булгаков, А.Ю. Ишлинский, Е.Б. Левенталь, Г.О. Фридлендер, немецкий исследователь М. Шулер, американский ученый Ч. Дрейпер и другие.

С помощью акселерометров измеряют кажущееся ускорение w для решения основной задачи навигации – счисления пройденного пути:

$$S(t) = \int_0^t \left(\int_0^t w(t) dt \right) dt.$$

Следует отметить, что применение акселерометров не ограничивается расчетом ускорения подвижных объектов: их задействуют в гравиметрии, при измерении углов наклона и оценке вибрационных воздействий.

Левин Сергей Львович. Кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург).

Волобуев Сергей Алексеевич. Главный специалист, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Якушина Евгения Александровна. Младший научный сотрудник, аспирант, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

За почти вековую историю развития акселерометрии конструктивные решения кардинально изменились: от простейших механических систем с пружинным подвесом до сложнейших электромеханических устройств, где используются эффекты сверхпроводимости и внутриатомные взаимодействия. Основным направлением этой эволюции стало стремление исключить силы сухого трения и гистерезис в подвижной системе макромеханических акселерометров, а также минимизировать их размеры с учетом массового выпуска и встраивания в микроэлектронные изделия.

Настоящая статья посвящена обзору и сравнительному анализу акселерометров, сконструированных и исследованных в ЦНИИ «Электроприбор». В работе рассмотрены следующие технологические направления: традиционные поплавковые акселерометры с жидкостной разгрузкой опор, современные «сухие» маятниковые компенсационные акселерометры, прецизионные акселерометры с бесконтактным подвесом (магнитным, электростатическим) и микромеханические приборы.

Принцип действия и классификация акселерометров

Согласно фундаментальным принципам классической механики, акселерометры измеряют не абсолютное, а так называемое кажущееся ускорение w объекта – векторную разность между абсолютным ускорением объекта в инерциальном пространстве a и ускорением силы тяготения g : $w = a - g$.

Поясним принцип действия акселерометра с помощью его упрощенной схемы, где инерционная масса (ИМ) m подвешена в корпусе на пружине (рис. 1). В этой модели под действием сил инерции возникает смещение массы x от положения равновесия, которое пропорционально проекции кажущегося ускорения на ось чувствительности. В установившемся режиме уравнение движения массы упрощается, и наблюдаемое смещение становится прямо пропорциональным измеряемой величине: $x = mlw/c$, где c – жесткость подвеса, l – смещение центра массы (маятниковость). Дополнительным элементом системы может являться демпфер, создающий момент сопротивления, пропорциональный скорости перемещения $M_{\text{демп}} = k\dot{x}$, что позволяет гасить внешние воздействия, такие как удары и вибрации [1, 2].

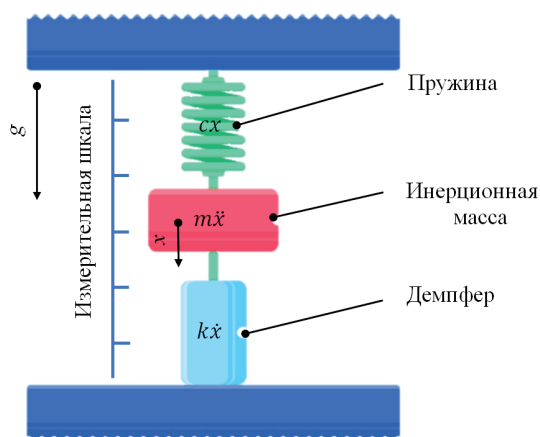


Рис. 1. Принципиальная схема пружинного акселерометра

Смещение ИМ может быть как линейным – под действием силы, так и угловым – под действием момента сил (рис. 2). Чтобы повысить точность измерения и линейность выходной характеристики, прецизионные акселерометры выполняют с обратной связью (по так называемой компенсационной схеме), под воздействием которой масса возвращается в исходное состояние, а по величине прикладываемого момента $M_{\text{ос}} = K_{\text{дм}} i_{\text{дм}}$ оценивается величина воздействия. Таким образом, можем записать уравнение движения ИМ акселерометра, основываясь на принципе равенства действующих моментов Ж.Л. Д’Аламбера [1], согласно

которому совокупность моментов, условно приложенных к движущемуся телу, уравнивает момент всех приложенных сторонних сил и реакций [1, 2]:

$$J\ddot{\alpha} + k\dot{\alpha} + c\alpha + K_{\text{дм}} i_{\text{дм}} = m l w, \quad (1)$$

где $M_{\text{упр}} = c \cdot \alpha$ – момент, зависящий от жесткости подвеса; $M_{\text{демп}} = k \dot{\alpha}$ – момент, определяемый демпфирующими силами; $M_{\text{инерц}} = J \ddot{\alpha}$ – момент сил инерции; $\alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ – угол, угловая скорость и угловое ускорение поворота маятника; k – коэффициент демпфирования движений маятника; J – момент инерции маятника.

Из уравнения (1) видно, что акселерометр является колебательным звеном, собственная частота и степень затухания возникающих колебаний которого могут быть представлены в виде

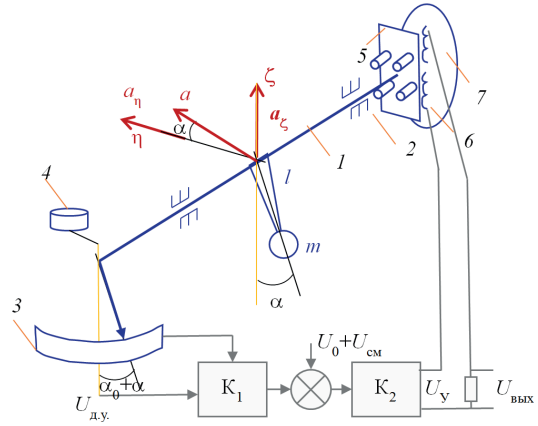


Рис. 2. Принципиальная схема маятникового акселерометра:

1 – ось подвеса маятника (ИМ);
2 – крепление подвеса; 3 – датчик угла;
4 – демпфер; 5 – датчик момента с подвижными катушками и неподвижной магнитной системой;
6 – гибкий токоподвод;
7 – неподвижная колодка токоподводов

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}, \quad (2)$$

$$\xi = \frac{k}{2\sqrt{cm}}. \quad (3)$$

Согласно классификации по области применения, предложенной С.Ф. Коноваловым, существующие акселерометры могут быть разделены на две категории: вибрационные и навигационные [2]. Вибрационные акселерометры предназначены для фиксации динамических процессов – оценки быстроизменяющихся ускорений и вибраций, а навигационные (низкочастотные) акселерометры являются чувствительными элементами (ЧЭ) ИНС и используются для высокоточного измерения линейных ускорений. Навигационные акселерометры, в свою очередь, можно дополнительно классифицировать следующим образом (табл. 1).

Перечислим основные характеристики, определяющие качество работы акселерометра в составе навигационного комплекса.

1. Статические характеристики:

- коэффициент преобразования (масштабный коэффициент) устанавливает связь между входным воздействием (ускорением) и выходным сигналом (например, током в цепи обратной связи) прибора; под нестабильностью коэффициента преобразования понимается его изменение во времени или под влиянием внешних факторов;
- нелинейность масштабного коэффициента – отклонение выходной характеристики от линейного закона;
- смещение нулевого сигнала – показания акселерометра при отсутствии ускорения, на практике выделяют систематическую и случайную составляющие смещения;
- чувствительность – минимальная величина ускорения, которую способен зафиксировать прибор;

- поперечная (перекрестная) чувствительность – коэффициенты, учитывающие влияние ускорений, действующих перпендикулярно измерительной оси; учет этих связей в математической модели позволяет значительно снизить общую погрешность измерения.
2. Динамические характеристики:
- полоса пропускания – диапазон частот входного сигнала, в котором прибор измеряет его без значительных искажений;
 - собственные динамические параметры – круговая частота собственных недемпфированных колебаний и степень затухания (коэффициент демпфирования) обуславливают реакцию прибора на быстрые изменения ускорения и его устойчивость к вибрациям.
3. Эксплуатационные и конструктивные параметры:
- диапазон измерений – интервал амплитуд ускорения, которые акселерометр регистрирует с заданной точностью;
 - диапазон рабочих температур – интервал температур окружающей среды, в котором сохраняются работоспособность прибора и заявленные точностные характеристики; обеспечение температурной стабильности – критическая проблема, для ее решения требуется либо термостатирование прибора, либо алгоритмическая термокомпенсация при обработке выходного сигнала;
 - тип подвеса – способ крепления ИМ, обуславливающий ее подвижность и устойчивость к внешним воздействиям (например, торсионный, жидкостный или электромагнитный подвес);
 - массогабаритные характеристики – масса и размеры прибора, влияющие на возможность его использования в конкретных изделиях (авиация, космические аппараты, морской транспорт, мобильная телефония и т.д.).

Т а б л и ц а 1

Классификация навигационных акселерометров

Параметры классификации	Типы акселерометров
По перемещению ИМ	осевые (измеряет линейное перемещение ИМ)
	маятниковые (измеряет угловое перемещение ИМ)
По наличию обратной связи	прямого действия
	компенсационные
По количеству осей	одноосные
	двухосные
	трехосные
По типу подвеса ИМ	торсионные
	флажковые
	магнитные
	электростатические и др.
По точностным характеристикам	грубые
	средней точности
	прецизионные

Стабильность масштабного коэффициента и случайная составляющая смещения нуля являются определяющими параметрами при оценке класса точности акселерометра [1] (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Классификация акселерометров по точностным характеристикам

Характеристика	Типы акселерометров		
	Грубые	Средней точности	Прецизионные
Стабильность масштабного коэффициента, %	От 1 и более	От 0,05 до 1	От 0,05 и менее
Случайная составляющая нулевого сигнала в запуске, g	От 10 ⁻² и более	От 10 ⁻⁴ до 10 ⁻²	От 10 ⁻⁴ и менее

Корректный расчет с помощью ИНС широты и курса в значительной степени зависит от погрешности акселерометров [3]:

$$\Delta\varphi = \rho_* - \beta + \Lambda_2, \tag{4}$$

$$\Delta K = \frac{\tau_*}{\cos\varphi} + \gamma \cdot \operatorname{tg}\varphi + \Lambda_1, \tag{5}$$

где $\Delta\varphi$, ΔK – погрешности определения широты и курса; ρ_* , τ_* – погрешности построения аналога инерциальной системы координат (СК), в основном зависящие от дрейфа гироскопов; β , γ – погрешности определения вертикали, по большей части обусловленные погрешностями акселерометров; Λ_1 , Λ_2 – погрешности системы списывания датчиков угловой ориентации.

В связи с направленностью своей деятельности ЦНИИ «Электроприбор» в последние десятилетия разрабатывал и выпускал именно навигационные акселерометры (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Акселерометры ЦНИИ «Электроприбор»

Тип акселерометра	Области использования	Годы разработки
Поплавковый	Прецизионная навигация морских и ракетных объектов	1970–2000
Магнитный	Высокоточное определение ускорений на орбитальных космических аппаратах и МКС	1990–2010
Криогенный	Научные исследования, гравиметрия	2015–2020
Электростатический	Космическая гравитационная гравиметрия	2019–2021
МЭМС-акселерометр	Потребительская электроника, автомобильная промышленность, навигация и ориентация	2020–2024
Компенсационный маятниковый	Бесплатформенные ИНС тактического и навигационного классов точности	2023–2025

В настоящем обзоре эволюция конструкций акселерометров рассматривается преимущественно как способ преодолеть главного «врага» их точности – механическое трение в опорах подвеса ИМ. В ходе разработок усложнялись системы разгрузки: от классических «сухих» маятников до жидкостной разгрузки в поплавковых приборах и последующего полного отказа от механического контакта с помощью магнитных и электростатических полей. Далее последовательно анализируются конструктивные особенности и основные характеристики каждого из этих типов устройств на примере изделий ЦНИИ «Электроприбор» со ссылками на результаты других российских и зарубежных предприятий.

Поплавковый маятниковый акселерометр

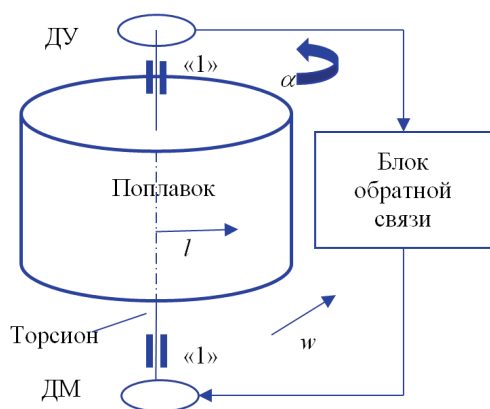


Рис. 3. Схема акселерометра с жидкостным подвесом: ускорение w направлено перпендикулярно плоскости рисунка

Один из первых акселерометров, сконструированных в ЦНИИ «Электроприбор». В нем ИМ выполнена в виде герметичного поплавка (рис. 3) и вывешена с помощью торсионного подвеса в герметичном корпусе, заполненном демпфирующей жидкостью. Основная идея такого решения заключается в обеспечении нулевой плавучести поплавка, что позволяет значительно разгрузить опоры подвеса от веса подвижной части и снизить момент трения. Кроме того, жидкость демпфирует колебания поплавка, отводит тепло от обмоток датчика момента (ДМ) и датчика угла (ДУ), а также оказывает гидростатическую поддержку при действии инерционных перегрузок. Температурное расширение жидкости в корпусе компенсирует сильфон. Жидкость предварительно обезгаживают, и сильфон заполняют по специальной технологии, препятствующей появлению новых пузырьков газа.

Принцип измерения ускорения поплавковым акселерометром основан на компенсации инерционного момента, возникающего при действии измеряемого ускорения на поплавковую ИМ. На оси 1–1 (см. рис. 3) подвешена поплавок-камера прибора массой m . Центр масс поплавка смещен относительно оси подвеса на расстояние l , что обеспечивает маятниковость. Действие на поплавок ускорения w , направленного перпендикулярно оси 1–1 подвеса, создает момент M_u , в результате чего поплавок поворачивается на угол α : $M_u = m \cdot w \cdot l \cdot \sin(\alpha)$.

ДУ преобразует угловое отклонение α в выходной сигнал в виде напряжения переменного тока и частоты, соответствующей частоте питания обмотки возбуждения ДУ. Величина выходного сигнала с ДУ пропорциональна углу α , а фаза зависит от направления действующего ускорения. Напряжение с ДУ передается в блок обратной связи и затем в обмотки ДМ. Датчик подключен так, что создаваемый его током момент действует на поплавок в направлении, противоположном моменту сил инерции, это уменьшает угол отклонения поплавка до величины, при которой моменты M_u и $M_{ом}$ уравниваются друг друга. В установившемся режиме ток в обмотке ДМ

ДУ преобразует угловое отклонение α в выходной сигнал в виде напряжения переменного тока и частоты, соответствующей частоте питания обмотки возбуждения ДУ. Величина выходного сигнала с ДУ пропорциональна углу α , а фаза зависит от направления действующего ускорения. Напряжение с ДУ передается в блок обратной связи и затем в обмотки ДМ. Датчик подключен так, что создаваемый его током момент действует на поплавок в направлении, противоположном моменту сил инерции, это уменьшает угол отклонения поплавка до величины, при которой моменты M_u и $M_{ом}$ уравниваются друг друга. В установившемся режиме ток в обмотке ДМ

строго пропорционален входному ускорению и является его мерой, а сам прибор работает как высоколинейный измеритель.

Ключевым преимуществом поплавкового акселерометра является то, что при точной массовой балансировке ИМ в жидкости, обеспечивающей нулевую плавучесть, реакции в опорах практически отсутствуют, и момент трения становится исчезающе малым. Это позволяет достичь высокой точности прибора [4]:

- нулевой сигнал порядка $10^{-3} g$;
- стабильность нуля на уровне $0,1-1 \cdot 10^{-5} g$;
- стабильность масштабного коэффициента около 5 ppm;
- порог чувствительности до $10^{-7} g$.

Такие параметры делают поплавковые акселерометры незаменимыми в автономных навигационных системах стратегического назначения.

Если нулевая плавучесть отсутствует (рис. 4), ИМ может двигаться под воздействием внешних сил, в результате чего создаются сложные гидродинамические эффекты. Из-за очень малых радиальных и торцевых зазоров (обычно порядка десятых долей миллиметра) при смещении поплавка возникает не только демпфирующая сила, пропорциональная вязкости жидкости и скорости движения, но и значительная инерционная составляющая, связанная с так называемой присоединенной массой. Суть этого явления в том, что частицы жидкости в узком зазоре вынуждены перемещаться на большие расстояния вдоль поплавка и приобретают ускорения, многократно превышающие его ускорение. В результате эффективная ИМ поплавок может возрасти в сотни раз по сравнению с массой вытесненной жидкости. Это создает дополнительные гидродинамические силы, которые, с одной стороны, защищают прибор от повреждений при ударных и вибрационных воздействиях, а с другой – должны учитываться при моделировании динамики системы обратной связи. Для каждого вида движения поплавок – радиального, аксиального или углового – имеются свои формулы демпфирующих и инерционных моментов, включающие вязкость жидкости, геометрические размеры и коэффициенты формы [4]. Чтобы избежать указанных явлений, в обратную связь акселерометра включают интегратор, обеспечивающий нулевой угол рассогласования. Таким образом, прибору придаются астатические свойства и полностью устраняется статическая погрешность по углу отклонения маятника, что существенно повышает точность навигационных измерений.

Температурная стабильность является одной из главных характеристик функционирования поплавковых акселерометров. Созданный в «ЦНИИ «Электроприбор» акселерометр ЧЭА-005 (см. рис. 4) имеет систему термостатирования, поддерживающую стабильность температуры на уровне $0,1^\circ C$, что обуславливает нулевую плавучесть поплавковой ИМ.

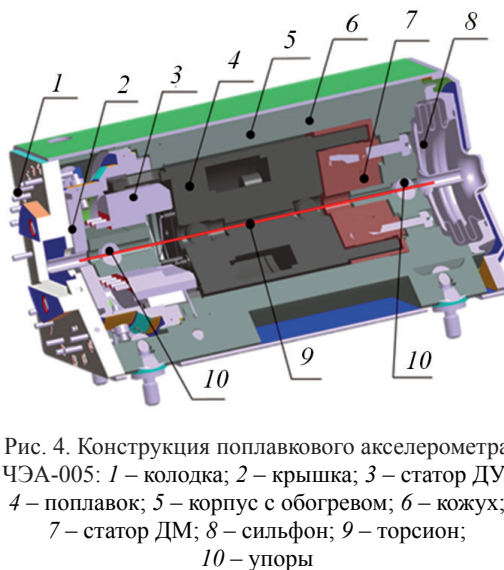


Рис. 4. Конструкция поплавкового акселерометра ЧЭА-005: 1 – колодка; 2 – крышка; 3 – статор ДУ; 4 – поплавок; 5 – корпус с обогревом; 6 – кожух; 7 – статор ДМ; 8 – сильфон; 9 – торсион; 10 – упоры

Выходной сигнал такого акселерометра с учетом модели погрешностей имеет следующий вид [2, 5, 6]:

$$w = N \cdot K_{\Pi} - W_0 - g \cos(\beta) - K_2 g^2 (\sin(\beta))^2 - K_{nc} g^2 \sin(2\beta), \quad (5)$$

где w – измеренное акселерометром кажущееся ускорение; g – вектор тяжести; N – выходной сигнал; K_{Π} – коэффициент преобразования; W_0 – смещение нуля выходного сигнала акселерометра; β – угол между чувствительной осью и направлением вектора силы тяжести; K_2 – коэффициент, зависящий от квадрата действующего ускорения и характеризующий нелинейность выходного сигнала; K_{nc} – коэффициенты, учитывающие влияние перекрестных связей.

На основе прибора ЧЭА-005 разработаны с использованием специализированных электронных компонентов трехосные измерители линейных ускорений нескольких типов. В различных системах их применяют для измерения ускорения, определения углов наклона и выработки приращения кажущейся скорости.

«Сухой» маятниковый акселерометр

Несмотря на высокую стоимость изготовления, поплавковые приборы заняли свою нишу в навигационных системах высокого класса точности. В то же время для систем среднего навигационного класса точности (с более широкими температурными диапазонами, возможностью коррекции, меньшими временем автономной работы и стоимостью) требуются акселерометры с точностью немного ниже. Компромиссным решением стали «сухие» маятниковые схемы, сегодня наиболее распространенные в мире.

Лидер в этом классе – кварцевый маятниковый акселерометр, в котором функции упругого подвеса и ИМ выполняет одна деталь из плавленого кварца, что также позволило кардинально решить проблему нестабильности нуля. Кварцевое стекло было выбрано благодаря почти идеальной упругости и высокой стабильности механических характеристик (в том числе при изменениях температуры), критически важной для прецизионных измерений.

Следует отметить, что по аналогичной схеме изготавливаются и флажковые акселерометры из кремния, однако их точность несколько меньше в связи с большим влиянием градиента температур.

Основой конструкции кварцевого маятникового акселерометра является ЧЭ, выполненный в виде цельной пластины (флажка) из кварцевого стекла, например марки КУ-1 [1, 7], которая одновременно служит упругим подвесом, маятником и несущей конструкцией для электродов ДУ и катушек ДМ. Пластина имеет форму диска (рис. 5), где с помощью ультразвуковой прошивки и химического травления сформированы тонкие упругие перемычки толщиной около 20 мкм, соединяющие подвижную часть – маятник – с неподвижным ободом. Центр тяжести маятника смещен относительно геометрического центра примерно на 0,6 мм, что и создает маятниковость.

На поверхность пластины напыляются электроды дифференциального емкостного ДУ и токопроводящие дорожки к катушкам ДМ (рис. 6). Напыление осуществляется в вакууме, через маску, т.е. поверх слоя хрома, улучшающего адгезию золота и кварца. ДМ состоит из двух бескаркасных катушек, приклеенных к маятнику, и двух постоянных

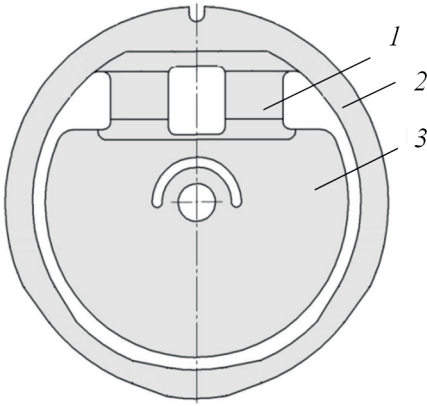


Рис. 5. Маятниковая пластина:
1 – упругие перемычки; 2 – обод; 3 – маятник

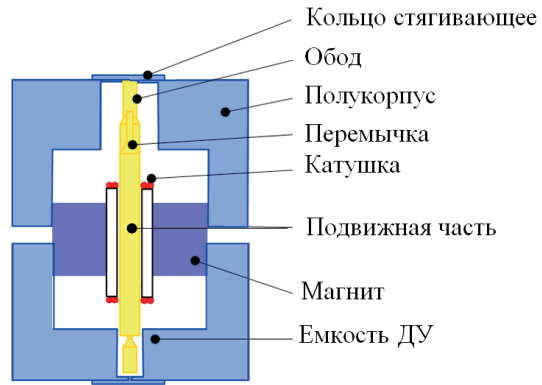


Рис. 6. Функциональная схема кварцевого акселерометра

магнитов, закрепленных на полукопусах из сплава с низким коэффициентом теплового расширения, близким к коэффициенту кварца. Полукопуса, стянутые кольцом, также служат магнитопроводами и создают радиальное магнитное поле в рабочем зазоре. Вся конструкция герметизируется в корпусе, заполненном осушенным газом (обычно гелием или азотом), который улучшает теплопередачу и уменьшает демпфирование.

Принцип работы такого акселерометра основан на классическом компенсационном методе. Когда измеряемое ускорение w направлено вдоль оси чувствительности (перпендикулярной плоскости пластины), на маятник действует инерционная сила $F_{\text{и}} = mw$, приложенная к центру масс. Поскольку центр масс маятника смещен относительно оси подвеса на расстояние l , возникает инерционный момент $M_{\text{и}} = mlw$, действующий на маятник. Угол поворота α регистрируется дифференциальным емкостным ДУ, представляющим собой два переменных конденсатора. При отклонении маятника емкость одного из них увеличивается, а другого – уменьшается. Конденсаторы включены в мостовую схему, сигнал рассогласования $U_{\text{ду}}$ поступает на предварительный усилитель, а затем на усилитель обратной связи.

Аналоговый или цифровой усилитель обратной связи формирует ток $i_{\text{дм}}$, который подается в катушки ДМ. При взаимодействии тока с магнитным полем возникает сила Ампера, а следовательно, компенсирующий момент $M_{\text{дм}} = K_{\text{дм}} i_{\text{дм}}$, в результате чего маятник возвращается в нулевое положение. В установившемся режиме $mlw = K_{\text{дм}} i_{\text{дм}}$, т.е. ток датчика момента пропорционален ускорению и служит его мерой.

Экспериментальные исследования и результаты эксплуатации кварцевых «сухих» акселерометров с маятником в виде флажка подтвердили следующие характеристики прибора: случайная составляющая нулевого сигнала от запуска к запуску $1 \cdot 10^{-4} \text{ g}$, систематическая составляющая $2 \cdot 10^{-3} \text{ g}$, нелинейность масштабного коэффициента 0,05%, погрешность измерения вектора ускорения силы тяжести 0,05% [1].

В ЦНИИ «Электроприбор» была разработана конструкция «сухого» маятникового компенсационного акселерометра (АКМ) такого же класса точности (рис. 7). Однако, по традиции, этот акселерометр имеет не флажковый, а торсионный подвес ИМ.

ЧЭ и плата обработки сигнала установлены на общем основании. ИМ (маятник) сделана в виде катушки с обмоткой управления и подвешена на растяжках – тонких упругих элементах, работающих на кручение. Растяжки выполняют две важнейшие функции: обеспечивают торсионный подвес подвижной части и служат токоподводами

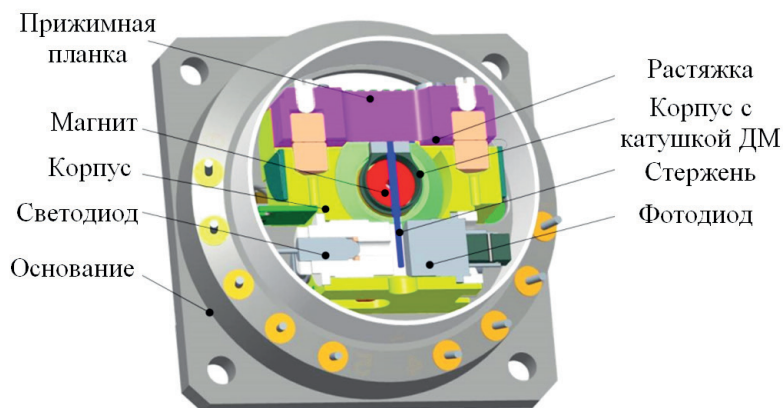


Рис. 7. 3D-модель акселерометра

к обмотке ДМ. Это упрощает конструкцию и уменьшает количество гибких соединений (токоподводов), которые могут вносить вредные моменты тяжения. ДУ состоит из оптической пары (светодиод и четырехсекционный фотодиод) и закрепленного на маятнике стержня. При отклонении маятника стержень перекрывает световой поток, и фотодиод генерирует сигнал рассогласования. Постоянные магниты, установленные в магнитопроводе, вместе с обмоткой управления образуют магнитоэлектрический ДМ, с помощью которого создается момент, компенсирующий действующее на маятник ускорение.

Плата обратной связи размещена внутри корпуса прибора, а дополнительно установленный на нем терморезистор позволяет отслеживать внутренние изменения температуры и алгоритмически вносить температурные поправки без применения термостабилизации конструкции.

АКМ является еще одним вариантом акселерометра компенсационного типа с электромагнитным ДМ. В установившемся режиме ток в обмотке ДМ строго пропорционален входному ускорению, и величина тока служит мерой выходного сигнала. Благодаря работе в режиме нулевого отклонения существенно снижаются погрешности, связанные с нелинейностью упругого подвеса [8].

Акселерометр типа АКМ имеет аналогичную поплавковому акселерометру модель выходного сигнала (5), но отсутствие поддерживающей жидкости может привести к провису ИМ и, как следствие, к росту зависимости от воздействия перекрестных ускорений. В результате при разных положениях торсиона (перпендикулярно и параллельно вектору силы тяжести) акселерометр будет иметь разные коэффициенты перекрестных связей — когда торсион перпендикулярен вектору силы тяжести, коэффициент значительно больше. На рис. 8 представлены результаты оценки погрешности АКМ во всем диапазоне углов установки с учетом всех калибруемых параметров, максимальная погрешность измерений не превышает $\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$ м/с.

В конструкции АКМ не предусмотрена термостабилизация, поэтому на выходной сигнал оказывают значительное влияние изменения температуры внешней среды (рис. 9). За счет алгоритмической термокомпенсации эта зависимость минимизируется, расширяется рабочий диапазон температур, а нестабильность выходного сигнала в пуске и от пуска к пуску не превышает $3 \cdot 10^{-4}$ м/с² (на рис. 9 разрывы соответствуют интервалу между пусками).

Внедрение такого акселерометра в серийное производство в настоящее время находится на завершающем этапе, но уже показано, что его точностные характери-

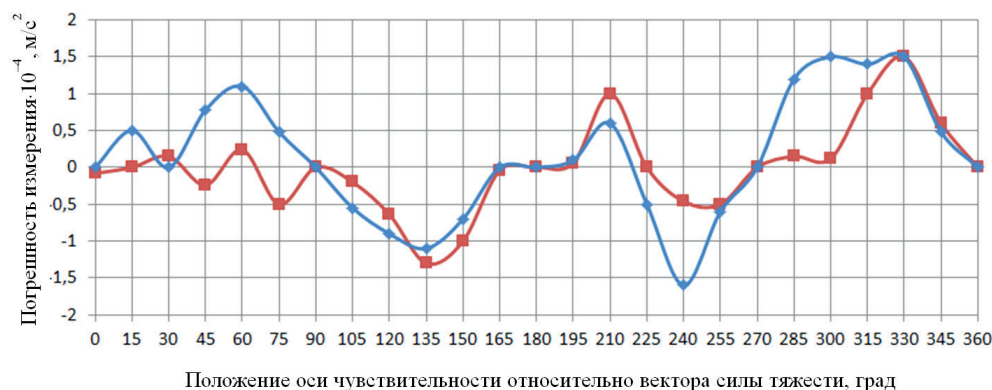


Рис. 8. Погрешность измерения АКМ в двух положениях растяжки относительно направления действия вектора силы тяжести

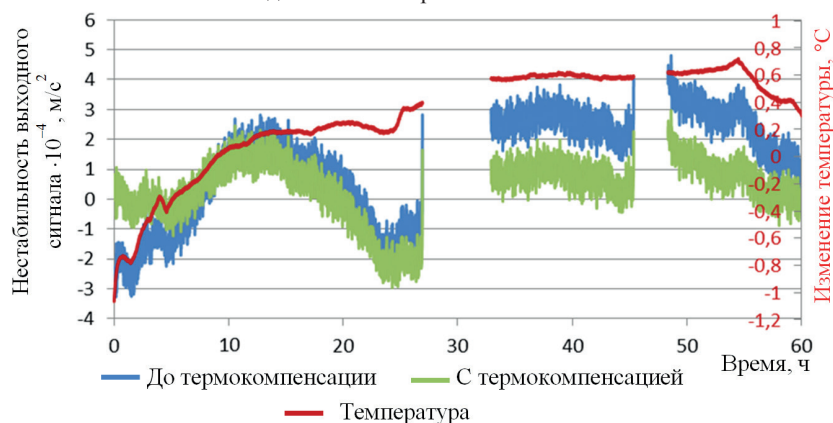


Рис. 9. Нестабильность выходного сигнала и изменение температуры

ки не уступают современным аналогам. Кроме того, модификация магнитной системы позволяет уменьшить диапазон измерения и использовать устройство в качестве ЧЭ прецизионного измерителя малых углов наклона [9].

В табл. 4 макромеханические «сухие» АКМ сопоставлены по ключевым параметрам с некоторыми зарубежными [13–15] и отечественными образцами (ДА-11 и АК-5 с торсионным подвесом [10–12]).

Т а б л и ц а 4

Точностные характеристики современных макромеханических акселерометров

Характеристики	Типичные значения [16, 17]	ДА-11 [10]	АК-5 [10]	АК-15 [11]	ВА-3 [12]	QA [13]	SSA QTNM [14]	ER-QA-03B1 [15]	АКМ [5]
Диапазон измерения, g	±100	±1, ±10	±15, ±50, ±100	±10	25...50	±60	±50	±70	±5
Полоса пропускания, Гц	400	—	—	500	—	>300	800–2500	800–2500	220
Нестабильность масштабного коэффициента, ppm	1000	—	200	200	100	—	—	—	±100
Смещение нуля, g · 10 ⁻³	(0,1...10)	±0,6	±1,5	—	—	—	<±3	<±5	±0,05
Чувствительность, g · 10 ⁻⁶	10	5	200	0,5	—	1	5	5	0,5
Масса, г	—	45	50	30	—	71	< 80	< 80	80

Акселерометр с электромагнитным подвесом

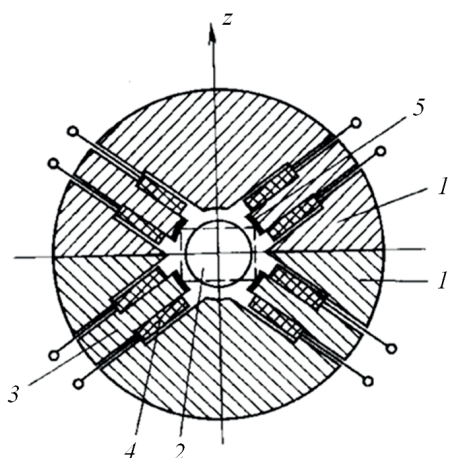


Рис. 10. Конструкция акселерометра с электромагнитным подвесом:

- 1 – ферромагнитный корпус;
- 2 – ферромагнитная чувствительная масса;
- 3 – сердечник силового элемента подвеса;
- 4 – катушка силового элемента подвеса;
- 5 – электрод емкостного датчика положения

Большинство акселерометров одноосные, и, чтобы получить полный вектор ускорения в трехмерном пространстве, приходится использовать три таких прибора, чаще всего установленных ортогонально. Однако существует альтернативный подход – создать один акселерометр, ЧЭ которого свободно перемещается в трех направлениях, а система управления удерживает его в центре подвеса и тем самым позволяет компенсировать действующие ускорения по всем трем осям одновременно. Примером такой конструкции является акселерометр с бесконтактным электромагнитным подвесом (рис. 10).

В этом приборе используется одна сферическая ферромагнитная ИМ, подвешенная в сферическом полумесяце ферромагнитного корпуса без механического контакта. Корпус выполнен из одинаковых полушарий с общей осью симметрии, что упрощает его изготовление

и сборку. Главной особенностью является неортогональная ориентация силовых элементов подвеса: восемь электромагнитных катушек размещены по четыре в каждой половине корпуса в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Оси катушек направлены под углом $\alpha = 54,7^\circ$ к оси симметрии, т.е. катушки ориентированы по направлениям диагоналей куба, вписанного в сферический корпус. Такая геометрия обеспечивает равную жесткость подвеса по всем трем ортогональным осям: при действии одинаковых сил по осям x , y , z в силовых элементах создаются равные компенсационные усилия [18, 19].

В результате прохождения тока через катушки возникают электромагнитные силы, удерживающие ИМ в центре подвеса. На каждом сердечнике катушки жестко закреплен сферический электрод емкостного датчика перемещения, электрически изолированный от корпуса. Конструкция подвеса и датчика обеспечивает равномерный рабочий зазор при центральном положении массы. При отсутствии ускорения во все катушки подается одинаковый начальный ток, создающий силу, которая «взвешивает» ИМ в центре. Когда на прибор действует ускорение w в произвольном направлении, ИМ смещается и зазоры между ее поверхностью и электродами меняются. Соответственно, изменяются емкости датчиков положения, включенных, например, в мостовую схему переменного тока. Сигнал с этих датчиков, по амплитуде и фазе пропорциональный смещению, поступает на предварительные усилители, а затем на линейный преобразователь координат.

Ключевая особенность следящей системы такого акселерометра – двойное преобразование координат. Поскольку оси силовых элементов (катушек) расположены неортогонально, сигналы с датчиков положения нужно преобразовать в ортогональную СК. В этой системе выполняются все необходимые операции коррекции: интегрирование для обеспечения астатизма, фильтрация, масштабирование и т.д. Затем

обработанный сигнал поступает на второй линейный преобразователь-распределитель, где пересчитывается обратно в неортогональную СК катушек и после этого распределяется по соответствующим выходным усилителям. Они изменяют ток в каждой из восьми катушек: в катушке, к которой приблизилась чувствительная масса, ток уменьшается, а в противоположной – увеличивается. В результате возникает результирующая электромагнитная сила, возвращающая массу в центр подвеса. Изменение токов (суммарное или в отдельных катушках) пропорционально проекциям действующего ускорения на оси ортогональной СК.

Преимущества такого решения:

- в конструкции без механического подвеса (шарикоподшипников, кернов, растяжек) отсутствует трение, люфты и гистерезис, что потенциально позволяет достичь очень большой точности и высокого порога чувствительности;
- одна ИМ заменяет три одноосных акселерометра, при этом уменьшаются габариты прибора, масса и потребляемая мощность;
- расположение катушек, ориентированных под углом $54,7^\circ$, по четыре в каждой половине корпуса обеспечивает равновесность подвеса по всем направлениям: при одинаковых силах по осям x, y, z компенсационные усилия в катушках также оказываются равными, в результате упрощается расчет и настройка системы управления;
- корпус из двух одинаковых полушарий с общей осью симметрии технологически удобен для изготовления, причем силовые элементы не попадают в его разрез, что облегчает сборку.

Следует отметить, что для всех акселерометров (и гироскопов) с бесконтактным подвесом существует диалектическое противоречие между повышением чувствительности и увеличением перегрузочной способности: для усиления чувствительности необходимо снижать уровень поддерживающего поля (магнитного, электрического), а для роста перегрузочной способности, наоборот, повышать. Таким образом, максимальной чувствительности можно достичь в условиях невесомости, поэтому рассматриваемый здесь акселерометр нашел свое применение в космической технике – в аппарате «Фотон» и на Международной космической станции [19].

Акселерометр с электростатическим подвесом

Технологические возможности снижения погрешностей макромеханических акселерометров с контактными подвесами в настоящее время достигли своих пределов. В связи с этим разработчики акселерометров пошли по пути коллег-гироскопистов и начали проектировать ЧЭ с неконтактными подвесами ИМ. Одним из вариантов стал электростатический подвес. Уже в 1980-х гг. французская фирма ONERA объявила о создании электростатического акселерометра (ЭСА) *Cactus* [20]. ONERA и по сей день остается лидером в разработке ЭСА различного назначения.

Акселерометрами, в которых ИМ удерживается электростатическим подвесом, также занимаются частные компании и научные центры других государств. Американская фирма Ball Aerosystems создала трехосный микромеханический акселерометр Si-MESA, функционирующий по принципу электростатической левитации [21]. В Чехии Институт аэронавигационных исследований и испытаний (Institute of Aeronautical Research and Testing) в рамках программы МАС (Microaccelerometer) представил несколько вариантов ЭСА [22]. Китайский Хуачжунский университет науки и техноло-

гий (Huazhong University of Science and Technology) также ведет работы по конструированию ЭСА, ориентированных на применение в космических исследованиях [23]. Диапазон погрешностей измерений микроускорений у таких приборов составляет от 10^{-9} до 10^{-13} м/с² в зависимости от конкретных задач космического эксперимента. В России акселерометры подобного класса пока не разработаны.

Величина превалирующих погрешностей таких приборов пропорциональна квадрату действующей на ИМ напряженности электрического поля, которая в условиях Земли в значительной степени зависит от противодействия ускорению силы тяжести, что не позволяет получить точность измерения выше 10^{-7} g. Сверхнизкой погрешности на уровне (10^{-10} ... 10^{-13}) g в таком ЭСА можно достичь только в условиях невесомости. В последние десятилетия в ряде стран созданы ЭСА космического применения для научных исследований, гравиметрии и управления спутниками, свободными от сноса [24]. Одним из наиболее ярких примеров является эксперимент Европейского космического агентства (European Space Agency) с научным спутником GOCE (рис. 11), где ЭСА с чувствительностью 10^{-11} g использовались для измерения гравитационного градиента Земли и определения поверхности геоида с погрешностью 2 см [26, 28].

Обладая опытом создания гироскопов с электростатическим подвесом, ЦНИИ «Электроприбор» тоже не остался в стороне от задач разработки ЭСА. В основу подвеса была положена динамическая следящая система с обратной связью по линейному перемещению ИМ, в которой мерой ускорения является выходное напряжение [24, 25, 27]:

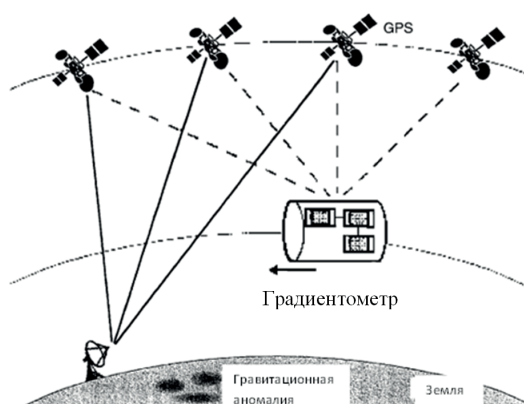


Рис. 11. Принцип работы спутниковой гравиметрии

$$U_{\text{вых}} = \frac{dm}{2kCU_0} \cdot w, \quad (6)$$

где U_0 – опорное напряжение; C – емкость электрода; d – зазор между электродом и ИМ; m – инерционная масса; k – коэффициент усиления высоковольтного усилителя.

Детали ЧЭ акселерометра для космического применения, созданного в ЦНИИ «Электроприбор», изготовлены из кварца, обеспечивающего стабильность геометрии при изменении температуры. Инерционное тело массой около 300 г представляет собой параллелепипед с квадратным основанием и сплошным металлическим напылением. На внутренние стенки герметичного прямоугольного корпуса напылена электропроводящая структура прямоугольных электродов, между стенками и телом имеется зазор (рис. 12).

В отличие от Земли, при работе ЭСА на низких космических орбитах ускорения не превышают 10^{-4} g, а на спутнике, свободном от сноса, – 10^{-6} g. При таких условиях можно повысить чувствительность прибора на несколько десятичных порядков по сравнению с наземными применениями. Для этого в рабочих горизонтальных каналах подвеса x , y выполнен достаточно большой номинальный зазор между телом и электродами. Вертикальный канал подвеса в основном предназначен для обеспечения взвешивания тела в условиях Земли. Он должен парировать величину ускорения до 1,5 g, поэтому для увеличения силы в 100 раз зазор по этой оси уменьшен в 10 раз.

В рабочих условиях космической невесомости устанавливают напряжение питания подвеса порядка нескольких вольт; для испытаний в наземных условиях напряжения питания по горизонтальным осям увеличивают до десятков и сотен вольт.

Значительные трудности были связаны с оценкой предельной чувствительности ЭСА в условиях земного притяжения. Эталонирование требуемого уровня ускорения в этом случае можно выполнить двумя путями: либо поворотом испытываемого прибора в гравитационном поле Земли (эталонном служит проекция ускорения свободного падения при известных углах поворота), либо перемещением источника гравитационного поля относительно прибора (за эталон принимается гравитационное воздействие источника).

Оба метода были опробованы, и практика показала, что они имеют принципиальные ограничения минимального уровня воспроизводимого эталонного воздействия, обусловленные сейсмикой и естественными долговременными (сезонными, суточными) поводками основания, на котором установлен макет ЭСА. Преодолеть их можно, если задавать эталонирующее воздействие по определенному закону, например гармоническому, что позволит частотным методом выделить полезный сигнал.

Метод задания эталонирующего воздействия по гармоническому закону при повороте прибора в гравитационном поле Земли используется в сейсмометрической установке, входящей в состав Государственного специального эталона единиц длины, скорости, ускорения и плоского угла для сейсмометрии (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева») (рис. 13).

В результате испытаний была подтверждена чувствительность измерения эталонного ускорения в условиях земного притяжения на уровне $10^{-8} g$ (рис. 14) [27].

Это позволяет рассчитывать на достижение в условиях космической невесомости погрешности измерений, сравнимой с показателями ЭСА зарубежных производителей, о которых упоминалось в начале настоящего раздела.

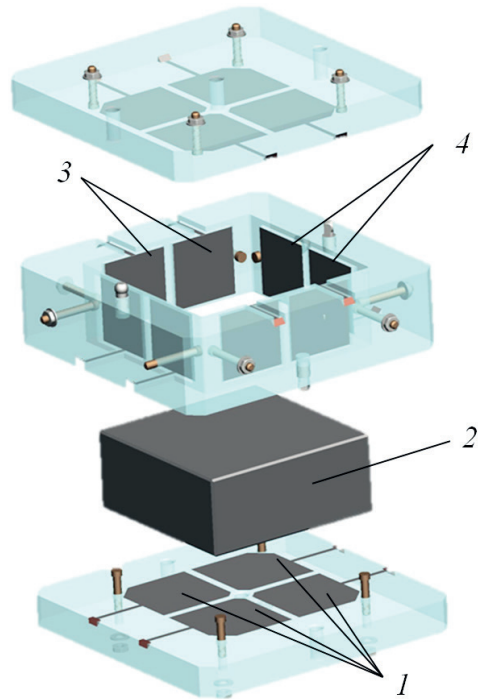


Рис. 12. Схема расположения электродов ЭСП акселерометра: 1 – электроды оси z ; 2 – инерционная масса; 3 – электроды оси x ; 4 – электроды оси y

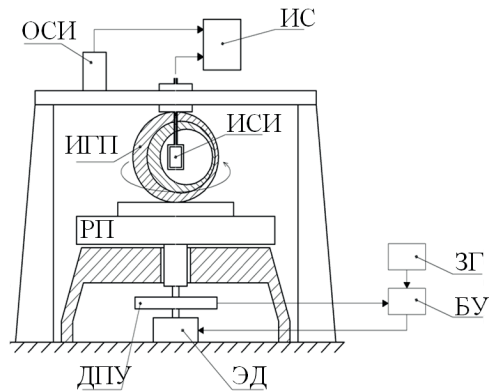
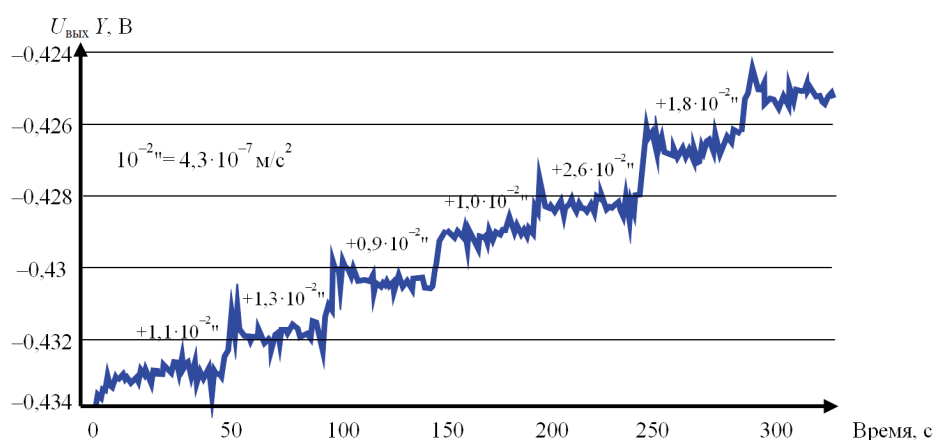


Рис. 13. Устройство установки ВНИИМ:
 БУ – блок управления; ЗГ – задающий генератор;
 ИГП – источник гравитационного поля;
 ИС – измерительная система;
 ИСИ – исследуемое средство измерений;
 ОСИ – опорное средство измерений;
 РП – ротационная платформа;
 ЭД – электродвигатель

Рис. 14. Изменение выходного сигнала при эталонном воздействии $4,3 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2$

Криоакселерометр

Работы по созданию высокоточных криоакселерометров (КА), в основном для научных экспериментов на Земле и в космосе, велись в США и СССР в 70–80-х гг. прошлого века. Например, во второй половине XX в. в Стэнфордском университете был разработан однокоординатный КА с потенциальной чувствительностью $10^{-17} g$ для проверки принципа эквивалентности гравитационной и инерционной масс в космосе [28, 29]. Прибор представляет собой сверхпроводящий цилиндрический подвес, внутри которого взвешены две массы, покрытые ниобиевой пленкой. В качестве датчика перемещения служит СКВИД-магнитометр. Другие исследователи [30] подтвердили достижение в наземных условиях чувствительности КА 10^{-2} мГал ($10^{-8} g$). Проектирование криогенных ЧЭ было развернуто в этот период и в ЦНИИ «Электроприбор».

Эксплуатация в условиях сверхнизких температур открывает путь для существенного повышения точности КА, так как позволяет понизить порог чувствительности и увеличить стабильность выходных характеристик по сравнению с «теплым» прибором. Кроме того, появляется возможность использовать эффекты сверхпроводимости: эффект Мейснера – для магнитного экранирования и безмоментного взвешивания сверхпроводящей ИМ в магнитном поле, а также эффект Джозефсона – для высокоточного измерения перемещения ИМ с помощью СКВИД-магнитометра.

Требования к повышению точности навигации наземных объектов и необходимость проводить сложные космические эксперименты в начале XXI в. привели к активизации работ по созданию КА. При этом в ЦНИИ «Электроприбор» рассматривались варианты как трехосного сферического КА, так и одноосного КА с подвесом, состоящим из сверхпроводящего магнитного подвеса (СМП) по оси чувствительности и механического подвеса на основе плоских пружин по двум другим ортогональным осям.

В трехкоординатном исполнении КА включает сферическую ИМ и датчики измерения перемещений по всем осям. Основной недостаток такой схемы – значительное влияние перекрестных связей, особенно сильно проявляющееся при смещении сферической ИМ от геометрического центра подвеса. В связи с этим упор был сделан на разработку однокоординатного КА с ИМ в форме шпули (рис. 15).

В конструкции одноосного высокочувствительного КА, функционирующего при воздействии ускорения силы тяжести Земли, предлагалось:

- компенсировать ускорение силы тяжести с помощью неуправляемого СМП;
- постоянно удерживать ИМ, установленную на консольных пружинах, в нулевом положении путем введения обратной связи;
- выбрать такую ИМ, при которой собственная частота будет минимально возможной для достижения требуемой чувствительности, а напряженность магнитного поля в рабочем зазоре при действии максимальных ускорений не превысит значения первого критического поля сверхпроводящего материала ИМ;
- обеспечить минимум напряжений в материале ИМ при термоциклировании в диапазоне температур от изготовления (300 °K) до эксплуатации (2–4 °K);
- использовать СКВИД-датчик магнитного поля как высокочувствительный датчик положения ИМ;
- создать достаточно глубокий магнитный «вакуум».

Такой акселерометр (см. рис. 16) включает:

- СМП по оси чувствительности;
- механический упругий подвес по двум перекрестным осям;
- системы считывания информации о положении ИМ на базе емкостного датчика (E_1 , E_2) и датчика на базе СКВИД-магнитометра (C_1);
- систему магнитного экранирования.

Ускорение, действующее на ИМ, в таком приборе рассчитывается следующим образом:

$$w = x \left(\frac{4gH_0 / H}{d_0} + \frac{C_g}{m} \right), \quad (7)$$

где x – смещение ИМ; H_0 – начальная напряженность магнитного поля при $I_1 = I_2 = I_0$; H – напряженность магнитного поля, необходимая для взвешивания ИМ; d_0 – номинальный рабочий зазор; C_g – собственная частота механического подвеса.

Требования к опытному образцу КА, учтенные при его разработке, приведены в табл. 5. Макет прошел испытания в условиях «гелиевых» температур (269 °K) (рис. 16, 17).

Объектами проверки стали макетные образцы основных узлов и блоков одноординатного КА: ИМ, упругого пружинного подвеса, СМП, ДП на базе СКВИД-магнитометра, емкостного датчика положения, блока электроники емкостного датчика и СМП.

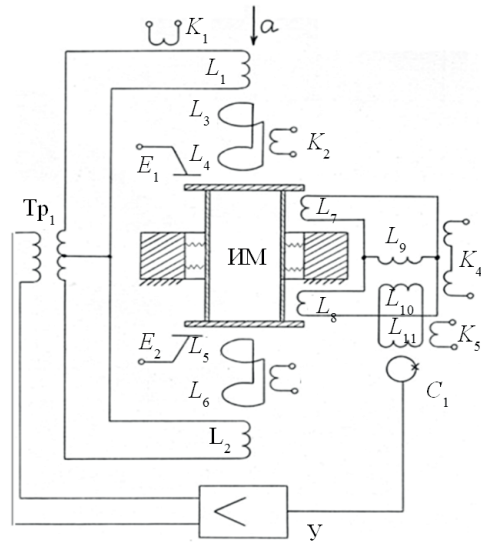


Рис. 15. Принципиальная схема КА

Требования к опытному образцу КА

Элемент	Характеристика	Требования
ИМ	Материал	Ниобий, $T_k \geq 9,2 \text{ }^\circ\text{K}$, $H_k \leq 1,04 \cdot 10^5 \text{ А/м}$
	Масса, кг	0,25–0,30
	Конструкция	В виде шпули
Механический пружинный подвес	Собственная частота f_c , Гц	10–15
СМП	Рабочий зазор, мм	0,3
	Собственная частота, Гц	<20
	Напряженность магнитного поля СМП, А/м	$\leq 5 \cdot 10^4$
Емкостной датчик положения ИМ	Чувствительность, м	10^{-10} – 10^{-11}
Датчик положения на базе СКВИД-магнитометра	Чувствительность, м	10^{-13} – 10^{-14}

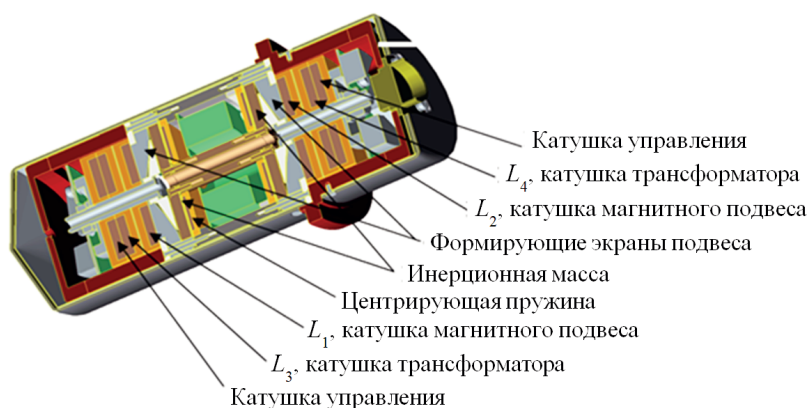


Рис. 16. Конструкция КА

По результатам были сделаны следующие выводы:

- подтверждено функционирование емкостного датчика положения ИМ, получена чувствительность датчика $3 \cdot 10^{-10}$ м;
- подтверждено функционирование ДП на основе СКВИД-магнитометра, получена чувствительность $3 \cdot 10^{-13}$ м;
- получена жесткость центрирующего пружинного подвеса, равная 15 Гц, что соответствует теоретическим расчетам;
- подтверждено функционирование СМП, рассчитана суммарная жесткость СМП и пружинного подвесов (31,2 Гц) и жесткость СМП (28 Гц); определена напряженность магнитного поля подвеса при положении ИМ в середине зазора – $3,3 \cdot 10^4$ А/м;



Рис. 17. Криостат при проведении испытаний

- ДП на основе СКВИД-магнитометра при жесткости комбинированного подвеса 15 Гц позволяет достичь чувствительности КА на уровне $4 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^2$;
- порог чувствительности КА с емкостным датчиком равен $1 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$.

Таким образом, проведенные испытания показали работоспособность основных блоков и узлов КА и возможность обеспечить требуемые для земных применений характеристики.

Микромеханический акселерометр

Стремление к миниатюризации конструкций, удешевлению производства, использованию навигационных приборов не только в военной, но и в гражданской технике привело в 90-х гг. XX в. к появлению микромеханических акселерометров (ММА).

Акселерометры такого типа нашли широкое применение в самых разных областях – от бытовой электроники до высокоточных ИНС. Их популярность обусловлена уникальным сочетанием малых габаритов, низкой стоимости и высокой стойкости к экстремальным нагрузкам. Например, в автомобильной промышленности ММА используются в качестве датчиков удара для подушек безопасности, в антиблокировочных системах (ABS), системах стабилизации курсовой устойчивости (ESP/SSKU) и адаптивного круиз-контроля, для регулирования давления в шинах. В сфере потребительской электроники ММА задействованы в смартфонах и планшетах для определения ориентации экрана, в фототехнике (в системах активной стабилизации изображения). Кроме того, ММА являются компонентами БИНС тактического класса точности [31, 32].

В подавляющем большинстве современных приборов ИМ подвешена на упругих элементах (рис. 18). Следует отметить, что в последнее десятилетие некоторые исследователи начали проектировать ММА с неконтактными подвесами (рис. 19) [33], как это делали и их предшественники – разработчики макромеханических приборов.

Механическое смещение ИМ в ММА можно преобразовать в электрический сигнал следующими методами [32, 34]:

- **емкостный метод** (наиболее распространенный) – смещение массы изменяет зазор в системе конденсаторов (часто выполненных в виде гребенчатых структур), в результате электрическая емкость меняется пропорционально ускорению;
- **тензорезистивный метод** – на упругих подвесах формируются (в структуру балок методом ионной имплантации внедряются тензорезисторные области) по-

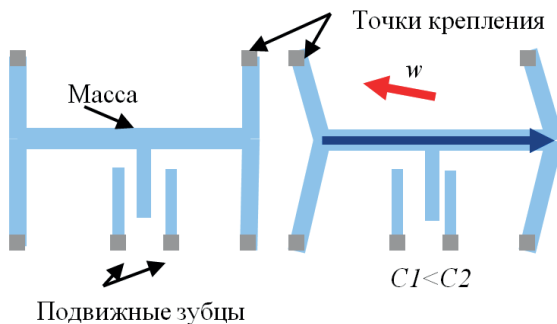


Рис. 18. Принципиальная схема ММА с емкостным датчиком смещения

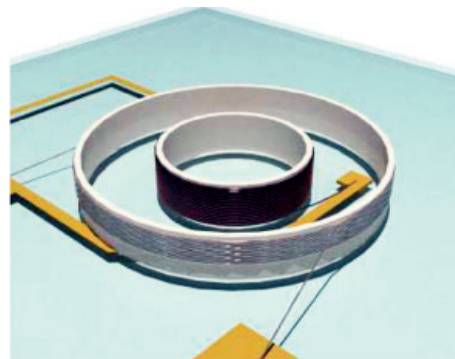


Рис. 19. Конструкция бесконтактного ММА

лупроводниковые тензорезисторы, при деформации подвеса их сопротивление меняется, что фиксируется с помощью мостовой схемы;

- **вибрационно-частотный (резонансный) метод** – за счет воздействия ускорения создается механическое напряжение в вибрирующем резонаторе, которое вызывает изменение его собственной частоты колебаний;
- **принцип поверхностных акустических волн** – деформация подложки под действием ускорения влияет на скорость распространения акустических волн между встречно-штыревыми преобразователями, это позволяет измерять ускорение через изменение фазы или частоты сигнала.

Одна из основных проблем ММА – большая зависимость полезного сигнала вдоль одной оси от чувствительности по перекрестным осям. Она устраняется с помощью комплекса конструкторских, технологических и алгоритмических решений, в первую очередь путем применения систем с отрицательной обратной связью. Такие системы удерживают ИМ в нейтральном («нулевом») положении и минимизируют геометрические отклонения, при которых маятниковые подвесы начинают реагировать на ускорения, перпендикулярные оси чувствительности. Дополнительно в конструкцию ММА можно ввести специальные корректирующие электроды для подавления квадратурного сигнала, возникающего из-за технологических перекосов, что позволяет подстраивать жесткость подвеса путем подбора его электрических параметров и компенсировать паразитные перемещения. Газовое демпфирование также снижает амплитуды паразитных колебаний по нерабочим осям. Влияние перекрестных связей уменьшают путем симметрирования конструкции прибора, введения дифференциальных схем, оптимальных форм подвеса.

ЦНИИ «Электроприбор» разрабатывает и производит ММА с различными структурами ЧЭ (рис. 20).

Наиболее стабильна S-структура, результаты оценки ее точностных параметров показаны на рис. 21 в сравнении с ЧЭ ADXL150 (США). Погрешности рассчитывались в соответствии с моделью (5). При нормальных климатических условиях погрешность акселерометров такого типа находится на уровне $6 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ и в большой

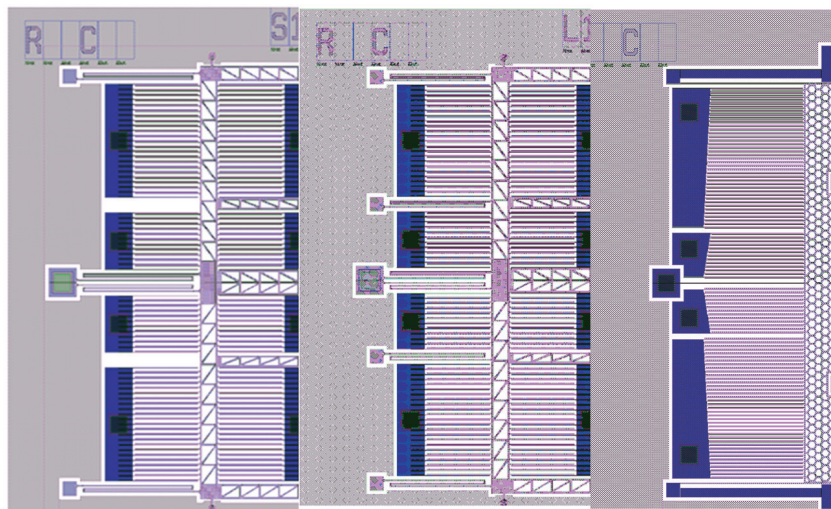


Рис. 20. Микромеханические ЧЭ производства ЦНИИ «Электроприбор»: S-, L- и T-структура

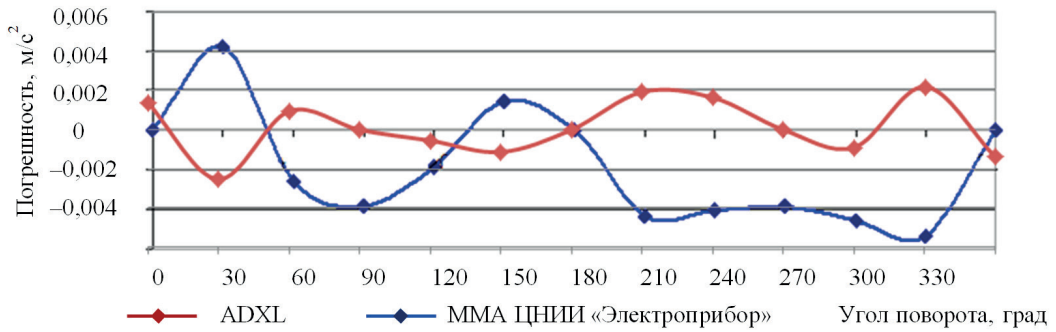


Рис. 21. Сравнение погрешностей отечественного и иностранного ММА

степени зависит от изменения температуры. У ММА ЦНИИ «Электроприбор» эта зависимость нелинейна и поддается сложной алгоритмической компенсации, в то время как у акселерометров типа ADXL она носит квазилинейный характер.

Современные ММА занимают доминирующее положение на мировом рынке акселерометров и характеризуются следующими параметрами [32, 34]:

- размеры чипов составляют единицы миллиметров (например, $3 \times 3 \times 0,75$ мм для IAM-20380), а масса – доли грамма;
- крайне малое энергопотребление, обычно менее 1 Вт;
- низкая стоимость – мировые производители стремятся к уровню 1–10 \$ за одну ось измерения;
- высокая стойкость – способность выдерживать удары до 100 g.

Отечественные разработки [32] постепенно выходят на мировой уровень, хотя их развитие долгое время сдерживало отсутствие доступа к новейшим зарубежным технологиям.

Заключение

Проведенный обзор конструктивных решений акселерометров, созданных и исследованных в ЦНИИ «Электроприбор» и других организациях-разработчиках, демонстрирует основные тенденции развития инерциальных датчиков: от макро- к микроразмерам и от механического контакта к бесконтактным методам взвешивания. Такое разнообразие конструкций позволяет ЧЭ навигационных систем соответствовать требованиям, предъявляемым к ним в различных применениях.

Классические поплавковые акселерометры остаются непревзойденным эталоном точности в стратегических прецизионных задачах благодаря гидростатической разгрузке опор, но их производство достигло предела технологической сложности, что обуславливает высокую стоимость.

Маятниковые компенсационные акселерометры (флажковые и торсионные) обеспечивают рациональный баланс между точностью и технологичностью, перекрывая потребности большинства навигационных комплексов средней и высокой точности. Их характеристики сегодня улучшаются путем совершенствования алгоритмов термокомпенсации и учета перекрестных связей.

Приборы с бесконтактным подвесом (ЭСА, криоакселерометры) являются инструментом для решения специальных научных задач, например измерения геопотенциала в космических миссиях.

В настоящее время в ЦНИИ «Электроприбор» ведутся работы по совершенствованию указанных технологий, что позволяет поддерживать отечественные разработки на уровне мировых тенденций.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Опыт проектирования** и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления / С. Ф. Нахов [и др.]. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2021. 240 с.
2. **Коновалов С.Ф.** Навигационные акселерометры : учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023. 328 с.
3. **Анучин О.Н., Емельянец Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общ. ред. чл.-кор. РАН В.Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и испр. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 357 с.
4. **Aerospace sensors** / ed. by A. Nebylov. New York : Momentumpress, LLC, 2013. 348 p.
5. **Волобуев С.А., Якушина Е.А., Драницина Е.В., Тунин И.С.** Маятниковый компенсационный акселерометр: результаты разработки и испытаний // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2026. Т. 69. № 3. С. 242–252. DOI: 10.17586/0021-3454-2026-69-3-242-252.
6. **Синельников А.Е.** Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства проверки и градуировки. М.: Изд-во стандартов, 1979. 116 с.
7. **Мельников В.Е.** Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. М.: Машиностроение, 1984. 160с.
8. **Патент RU 2859308 C1.** Компенсационный маятниковый акселерометр / Волобуев С.А., Левин С.Л., Махаев Е.А., Святой В.В., Якушина Е.А.; заявитель и патентообладатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (RU). № 2025133534; заявл. 01.12.2025; опубл. 31.03.2026. Бюл. №10.
9. **Якушина Е.А., Романенко С.Г.** О влиянии конструктивных особенностей устройства автокомпенсации на погрешности прецизионного измерителя малых углов наклона // сб. материалов XXXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2025.
10. **Матвеев В.В., Распопов В.Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
11. **Технические характеристики** акселерометров ПАО «МИЭА». URL: <http://korpus64.ru/>.
12. **Технические характеристики** акселерометров НИК «Электрооптика». URL: <http://electrooptika.com/>.
13. **Технические характеристики** акселерометров фирмы Honeywell. URL: <http://Honeywell.com/>.
14. **Технические характеристики** акселерометров фирмы SENSSET. URL: <http://sensset.ru/>.
15. **Технические характеристики** акселерометров фирмы ERICCO. URL: <http://ericcointernational.com/>.
16. **El-Sheimy, N., Youssef, A.**, Inertial sensors technologies for navigation applications: state of the art and future trends, *Satell. Navig.*, 2020, vol. 1, no. 2, <https://doi.org/10.1186/s43020-019-0001-5/>.
17. **Titterton, D., Weston, J.L.** *Strapdown inertial navigation technology*, 2nd ed. London: IET, 2011, vol. 17, 581 p.
18. **Патент RU 2082173 C1.** Пространственный акселерометр с электромагнитным подвесом / Буравлев А.П., Дудницын Б.В., Левин Л.А., Мумин О.Л., Сумароков В. В.; заявитель и патентообладатель Мумин О. Л. № 9400796328; заявл. 02.03.1997; опубл. 20.06.1997. Бюл. №17.
19. **Дудницын Б.В., Мумин О.Л., Рябова Л.П., Сумароков В.В., Топчий А.И.** Магнитный сферический трехкомпонентный акселерометр с цифровым выходом // Гироскопия и навигация. 2003. № 1 (40). С. 82–88.
20. **Boudon, Y. Barlier, F., Bernard, A., Juillerat, R., Mainguy, A.M., Walch, J.J.**, Synthesis of flight results of the Cactus accelerometer for accelerations below $10^{-9}g$, *Acta Astronautica*, 1979, vol. 6, no. 11, pp. 1387–1398.
21. **Toda, R.** [et al.], Electrostatically levitated spherical 3-axis accelerometer, *Proc. of 15th IEEE Int. Conf. on Micro Elktro Mechanical Systems (MEMS)*, pp. 710–713.
22. **Peresty, R., Chvojka, M., Fedosov, V.**, Use of the highly sensitive electrostatic accelerometer for orbit perturbation effects investigation on board of LEO spacecraft, *Proceedings of the 61st IAC*, Prague, 2010, IAC-10.B1.3.2.
23. **Zhu, Z.** [et al.], Electrostatic gravity gradiometer design for the future mission, *Advances in Space Research*, 2013, vol. 51. pp. 2269–2276.

24. Краснов А.А., Розенцвейн В.Г. Современное состояние и перспективы развития электростатических акселерометров космического применения // *Гирскопия и навигация*. 2022. Т. 30. № 2 (117). С. 3–33. DOI: 10.17285/0869-7035.0088.
25. Сумароков В.В. Электростатический подвес инерциальных чувствительных элементов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2026. 54 с.
26. DiFrancesco, D., Advances and Challenges in the Development and Deployment of Gravity Gradiometer Systems, *EGM 2007 International Workshop Innovation in EM, Grav and Mag Methods: a new Perspective for Exploration*, Capri, Italy, 2007.
27. Кукушкин А.В., Левин С.Л., Святый В.В., Сумароков В.В. Высокоточный электростатический акселерометр // Сб. тр. XIV Всерос. совещания по проблемам управления. М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2024.
28. Albertella, A., Migkiccio, F., Sanso, F., GOCE: the earth gravity field by space gradiometry, *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2002, vol. 83, pp. 1–15, <https://doi.org/10.1023/A:1020104624752/>
29. Жернаков О.А., Фрезинский В. С. Криогенные чувствительные элементы инерциальных навигационных систем: обзор. Л.: Румб, 1988.
30. Oelfke, W.C., Hamilton, W.O, Superconducting accelerometer for study of gravitation and gravitational radiation, *Acta Astronautica*, 1978, vol. 5, is. 1–2, pp. 87–96, [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(78\)90037-1/](https://doi.org/10.1016/0094-5765(78)90037-1/).
31. Евстифеев М.И. Методы проектирования конструкций микромеханических гироскопов. СПб.: Университет ИТМО, 2019.
32. Лукьянов Д.П. Микромеханические акселерометры и микросенсоры на ПАВ. СПб.: СПбГЭТУ (ЛЭТИ), 2005.
33. Mamleyev, E.R., Voigt, A., Moazenazadeh, A., Korvink, J.G., Kohl, M., Poletkin K., A Technological Approach for Miniaturization of Three-Dimensional Inductive Levitation Microsuspensions, *IEEE Magnetism Letters*, 2022, vol. 13, pp. 1–4, <https://doi.org/10.1109/LMAG.2022.3174522/>.
34. Voldman, J., Case Study: A Capacitive Accelerometer, *MIT Course Materials*, 2007.

Levin, S.L., Volobuev, S.A., and Yakushina, E.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg) Navigation Accelerometers: Development Experience, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2026, vol. 34, no. 2 (133), pp. 128–150.

Abstract. This article provides an overview and comparative analysis of accelerometer designs developed at Concern CSRI Elektropribor over the past decades. Six key technological trends are considered: floated accelerometers with pivot and jewel bearings, dry pendulum force-rebalanced accelerometers, accelerometers with contactless (magnetic and electrostatic) suspension, cryogenic and micromechanical (MEMS) accelerometers. The operating principles, design features, accuracy characteristics, and fields of application are described for each type. The evolution of approaches to reducing the impact of mechanical friction is demonstrated, from hydrostatic unloading to complete elimination of mechanical contact. Special attention is given to promising projects: cryogenic and electrostatic accelerometers for space research experiments, as well as modern micromechanical (MEMS) sensors for navigation and consumer electronics. A comparison of domestic and foreign counterparts is presented.

The analysis has led to the conclusion on the rational integration of different types of accelerometers, depending on the required accuracy, operating conditions, and cost.

Key words: accelerometer, specific force, linear acceleration.

Материал поступил 12.05.2026