

УДК 523.43:534.647:629.78

МИНИАТЮРНЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР-СЕЙСМОМЕТР ДЛЯ МАЛОЙ МАРСИАНСКОЙ СТАНЦИИ

В.М. Готлиб, Б.В. Зубков, В.М. Линкин, А.Н. Липатов, А.Б. Манукин

Институт космических исследований РАН, Москва

Необходимость решения трех задач в рамках проекта малой марсианской станции явилась побудительной причиной разработки данного прибора.

Первая задача — получение плотностного разреза атмосферы Марса по измерениям торможения спускаемого аппарата с помощью **акселерометра**.

Вторая задача — измерение углового положения аппарата на поверхности Марса и вариации его наклонов относительно местной гравитационной вертикали с помощью **наклономера**.

Третья задача — измерение сейсмической активности Марса **сейсмометром**.

Все три разновидности датчиков первичной информации — акселерометр, наклономер, сейсмометр — относятся к одному классу: гравиинерциальных приборов, что и позволяет совместить все типы датчиков в одном приборе. При огромном многообразии типов и видов таких датчиков любой гравиинерциальный прибор в итоге состоит из трех частей: пробной массы, элемента жесткости и трения, связывающих пробную массу с корпусом, и преобразователя перемещения или скорости пробной массы относительно корпуса в электрический сигнал. Рассмотрим последовательно каждый из трех датчиков первичной информации.

1. Акселерометр

Измерение микроускорений космического аппарата позволяет определить плотность атмосферы на больших высотах по эффекту торможения аппарата, исследовать динамику входа аппарата в атмосферу, измерить пондеромоторные эффекты воздействия электромагнитных полей, солнечного ветра, микрочастиц, светового давления на аппарат и т. д.

Решение поставленных задач связано с разработкой и созданием высокочувствительного и широкодиапазонного трехкоординатного прибора для измерения микроускорений. Прибор должен позволять измерять микроускорения аппарата по трем ортогональным осям в диапазоне от 10^{-6} до 15 g (g — ускорение свободного падения на Земле).

Создание такого прибора связано с преодолением известных трудностей, главная из которых — широкий динамический диапазон (более семи порядков). Наиболее простым и экономичным способом решения этой проблемы является разработка двух датчиков, предназначенных для работы в двух поддиапазонах, перекрывающих весь требуемый диапазон. Так, для данного случая разумным является разбиение диапазона на поддиапазон больших ускорений — $20\text{--}10^{-3} \text{ g}$ и поддиапазон малых ускорений — $10^{-1}\text{--}10^{-6} \text{ g}$. Эти поддиапазоны в достаточно широкой области ускорений ($10^{-1}\text{--}10^{-3} \text{ g}$) перекрываются, что повышает надежность прибора и достоверность результатов измерений. Для первого диапазона разработан **чувствительный элемент больших ускорений — ЧЭБУ**, для второго — **чувствительный элемент малых ускорений — ЧЭМУ**.

Надо еще удовлетворить очень важному требованию по массогабаритным характеристикам: масса трехкоординатного прибора не должна превышать 200 г .

Принцип построения чувствительного элемента

Были выбраны аксиально-симметричная конструкция чувствительного элемента, а в качестве упругого элемента — круглый стержень с известной изгибной жесткостью. Его жесткость определяется заданным диапазоном измерений.

На рис. 1 условно изображена схема чувствительного элемента: пробная масса 1 цилиндрической формы и четыре концентрических электрода 4 образуют две пары дифференциальных измерительных емкостей. Пробная масса, как уже указывалось, укреплена на упругом круглом стержне 5 , что и позволяет осуществить идею создания двухкоординатного чувствительного элемента.

Пробная масса m под действием ускорения переместилась на величину ρ от центра окружности. Учитывая, что зазор $d_0 = R - r$ между пробной массой и статорными обкладками кон-

денсатора мал, величины емкостей при смещении массы можно оценить, пользуясь формулой для плоского конденсатора:

$$C = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{lRd\alpha}{4\pi d(\alpha)}, \quad (1)$$

где $d(\alpha) = R - R_M$, l – длина цилиндра. Если ρ – смещение пробной массы относительно центрального положения под действием силы инерции, направленной под углом Θ (рис. 1), то

$$R_M \approx r + \rho \cdot \cos(\Theta - \alpha), \quad d \approx d_0 \left[1 - \frac{\rho}{d_0} \cos(\Theta - \alpha) \right]. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), проводя интегрирование, получим

$$\begin{aligned} C &= \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{lR}{4\pi} \frac{d\alpha}{d_0} \frac{1}{[1 - n \cdot \cos(\Theta - \alpha)]} = \\ &= \frac{lR}{4\pi} \frac{2}{\sqrt{1 - n^2}} \operatorname{arctg} \frac{(1 - n) \operatorname{tg} \frac{(\Theta - \alpha)}{2}}{\sqrt{1 - n^2}} \Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $n = \frac{\rho}{d_0}$ – малый параметр.

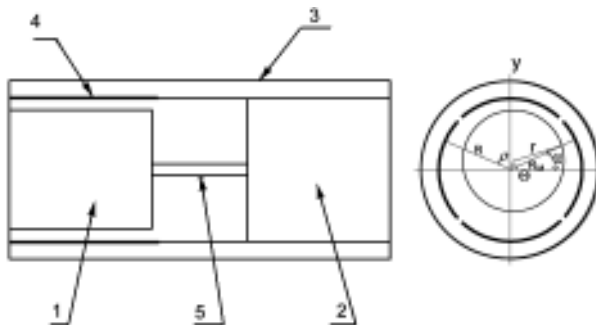


Рис. 1. Схема чувствительного элемента

В первом приближении значения для разностей дифференциальных емкостей:

$$\Delta C_1 = C_1 - C_{1a} = \frac{IR}{4\pi d_0} 2n\sqrt{2} \cos \Theta,$$

$$\Delta C_2 = C_2 - C_{2a} = \frac{IR}{4\pi d_0} 2n\sqrt{2} \sin \Theta. \quad (4)$$

Поскольку каждая из емкостей при отсутствии внешнего гравиинерциального воздействия равна $C_0 = \frac{Rl}{8d_0}$, то максимальное относительное изменение любой емкости (когда $\cos \Theta$ либо $\sin \Theta$ равны 1):

$$\left| \frac{\Delta C}{C_0} \right| = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{\rho}{d}. \quad (5)$$

Отличие (5) от соотношения $\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{x}{d}$, которое верно для плоского конденсатора, незначительно, поскольку $\frac{\rho}{d} \approx 1$, т. е. близко к 1.

Трубка из молибденового стекла 3 является своеобразным корпусом чувствительного элемента с напыленными электродами 4. Внутренняя поверхность трубки изготовлена с высокой точностью: отступление от цилиндричности (овальность, эллиптичность, конусность) не превышает 5 мкм по радиусу, а шероховатости — не более 0,2 мкм. Упругий элемент представляет собой деталь в форме гантели, состоящую из двух цилиндров 1 и 2 диаметрами 8 и 7,9 мм соответственно, соединенных упругим стержнем 5 из бериллиевой бронзы (см. рис. 1). На рис. 2 отдельно изображен упругий элемент ЧЭМУ. Цилиндр 1 диаметром 8 мм вклеивается в корпус, а цилиндр 2 диаметром 7,9 мм — представляет собой пробную массу, которая соединена с цилиндром 1 с помощью упругого элемента 3. Ее смещения под действием сил инерции, измеряемые с помощью преобразователя малых механических перемещений, и дают информацию о величине гравиинерциальных воздействий.

Оба цилиндра изготовлены из молибдена, что позволяет существенно уменьшить температурную зависимость преобразователя: коэффициент теплового расширения молибденового стекла $\sim 50 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$ [1], а коэффициент теплового расширения

молибдена — $47 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ [2], т. е. относительное изменение зазора при изменении температуры на величину Δt будет

$\Delta d/d \approx 3 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta t$. Так, при $\Delta t = 100^\circ\text{C}$, $\frac{\Delta d}{d} \approx 3 \cdot 10^{-3}$, т. е. ошибка в измерениях будет составлять всего 0,3 %.

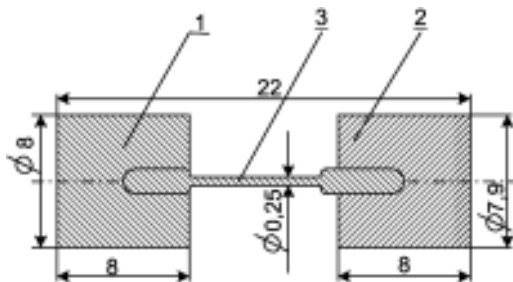


Рис. 2. Упругий элемент ЧЭМУ

В датчиках использованы достаточно жесткие механические системы и высокочувствительный преобразователь малых механических перемещений пробной массы. Среди радиотехнических устройств, преобразующих механические перемещения в электрические сигналы, наибольшей чувствительностью, как известно, обладают емкостные датчики.

Таким образом, один чувствительный элемент прибора позволяет измерять ускорение одновременно по двум координатам X и Z в диапазоне больших ускорений; второй подобный элемент, ориентированный под углом 90° , — по осям Y и X. Еще одна пара подобных чувствительных элементов с упругим стержнем меньшего диаметра обеспечивает измерение в диапазоне малых ускорений. Необходимо заметить, что дублирование измерений по оси X повышает надежность при измерении ускорений по наиболее важному и информативному направлению: ось X прибора необходимо совместить с продольной осью аппарата.

Электронный преобразователь

«Смещение пробной массы — электрический сигнал»

В качестве преобразователя использован емкостный дифференциальный преобразователь с коэффициентом преобразования $k = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta C \approx 1 \text{ В/пФ}$.

Преобразователь для проведения испытаний чувствительных элементов ЧЭБУ и ЧЭМУ собран на печатной плате диаметром 46 мм, которая крепится пайкой непосредственно к выводам измерительного дифференциального конденсатора (без каких-либо промежуточных проводов). Преобразователь собран по схеме измерения разности электрических зарядов измерительных емкостей при перезарядке их постоянным напряжением. В качестве переключателя процесса «заряд/перезаряд» используется кольцевой диодный ключ, возбуждаемый генератором стабильной амплитуды и частоты. Микросхема прецизионного кольцевого диодного ключа (CA3039) собрана на одном кристалле, что существенно повышает ее температурную стабильность вследствие автокомпенсации воздействия вариаций температуры. На этом же кристалле один из шести диодов используется для измерения температуры кристалла, для обеспечения дополнительной коррекции показаний акселерометра от вариаций температуры. Полная принципиальная схема преобразователя представлена на рис. 3. На выходе описанного преобразователя появляется напряжение, пропорциональное разности величин измерительных дифференциальных емкостей. Это напряжение подается на АЦП типа AD73360, который содержит шесть синхронных каналов с разрешением не менее 20 дв. разрядов. АЦП выдает результаты в контроллер прибора с частотой 10 Гц. В контроллере результаты работы АЦП усредняются на интервале времени, задаваемом программно из центрального компьютера КА или по командам с Земли.

Как уже отмечалось, прибор содержит четыре двухкоординатных чувствительных элемента. Это означает, что в блоке используется восемь плат электронных преобразователей, к которым предъявляются столь же высокие требования, как и к механическим чувствительным элементам: идентичность характеристик, их стабильность во времени.

Величина собственных шумов емкостного преобразователя определяет чувствительность образца в целом, поскольку собственные тепловые шумы механических систем относительно невелики. Оценку этих равновесных тепловых шумов можно получить из следующих соотношений. Величина минимально обнаружимого ускорения, действующего на механический осциллятор, определяется выражением [3]:

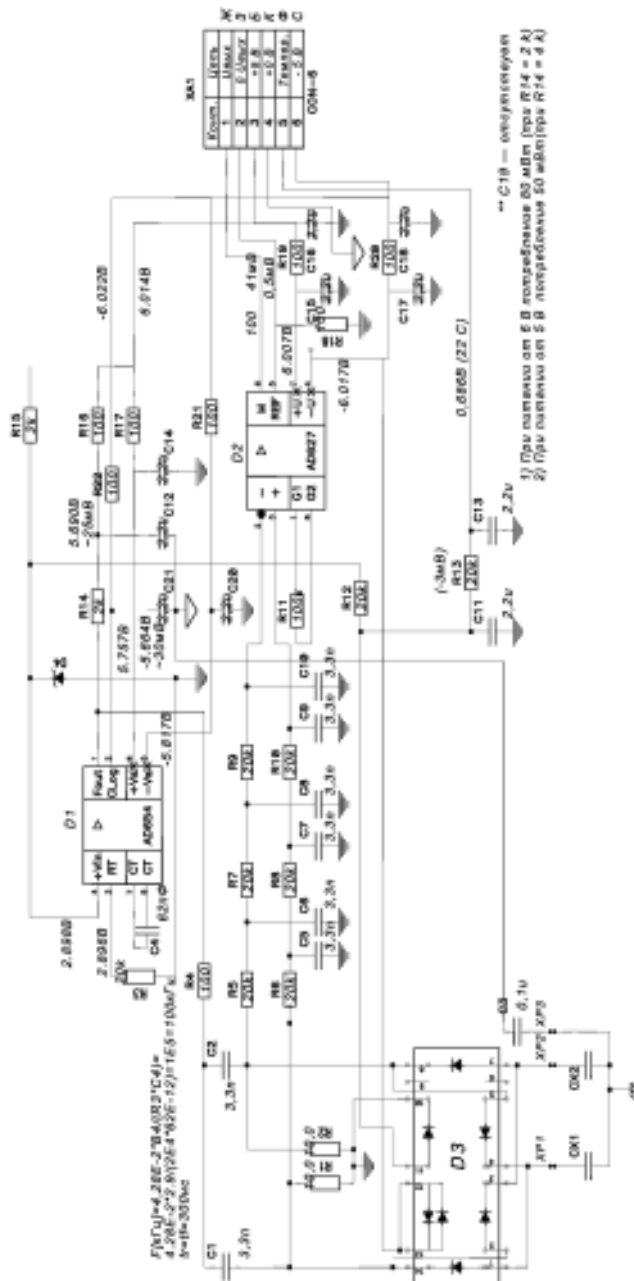


Рис. 3. Принципиальная схема преобразователя

(6)

где ω_0 — собственная частота осциллятора, χ — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, m — величина пробной массы осциллятора. Собственную частоту осциллятора можно оценить таким образом. Если отклонение пробной массы под действием максимального для данного диапазона ускорения a_{max} составляет величину d/n , где d — зазор в измерительной емкости электронного преобразователя, а n — число, которое обычно составляет 3–5 (т. е. максимальное отклонение составляет 1/3–1/5 величины зазора), то в статике

$$\frac{d}{n} = \frac{m a_{max}}{K}. \quad (7)$$

Так как жесткость $K = m\omega_0^2$, то из соотношения (7) получаем собственную частоту:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{n a_{max}}{d}}. \quad (8)$$

Подстановка (8) в (6) дает требуемое соотношение:

$$\Delta a_{min} \approx \sqrt{\frac{\chi T n a_{max}}{m d}}. \quad (9)$$

Для чувствительного элемента малых ускорений (ЧЭМУ) $a_{max} = 10^{-2} \text{ м/с}^2$, $m = 4 \text{ г}$, $d = 50 \text{ мкм}$, $n = 3$. Следовательно, для $T = 300 \text{ К}$ $\Delta a_{min} \approx 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2$.

Из соотношения (9) видно, что увеличение массы m и зазора d может снизить Δa_{min} , увеличив тем самым чувствительность. Однако специфика космических экспериментов далеко не всегда позволяет значительно повысить массу, а увеличение зазора приводит к проблемам с преобразователем малых механических перемещений, поскольку $\Delta U \sim A \Delta C / C \approx A \Delta x / d$. Здесь ΔU — изменение выходного напряжения с преобразователя, A — размерный коэффициент преобразования «относительное изменение рабочей емкости $\Delta C / C$ — изменение выходного напряжения ΔU ». С увеличением зазора d уменьшается величина ΔU . Условие измерения — $\Delta U \geq \Delta U_{фл.}$, где $\Delta U_{фл.}$ — флуктуации преобразователя. Природа этих флуктуаций связана с классическими

тепловыми шумами, с дробовыми или рекомбинационными шумами в генераторных схемах. Собственный шум преобразователя составляет несколько микровольт в диапазоне частот около 1 Гц. С продвижением в область больших периодов, в область квазистатических измерений основную роль будут играть дрейфовые процессы в преобразователе, температурные (не путать с тепловыми) флуктуации. Проведенные эксперименты показали, что для данного преобразователя спектральная плотность мощности флуктуаций выходного напряжения в области частот 10^{-2} –1 Гц составляет около 10^{-11} В²/Гц, что позволяет в принципе вести измерения на уровне чувствительности $2,5 \cdot 10^{-8}$ м/с².

Параметры прибора и влияние различных факторов на точность

Влияние вариаций внешней температуры

Влияние вариаций температуры отражается прежде всего на изменении величины механической жесткости осциллятора. Для подавляющего числа материалов величина термоупругого коэффициента, определяющего изменение упругих модулей с температурой, составляет $\beta \approx 10^{-4}$ 1/°С. При этом кажущееся изменение измеряемого ускорения аппарата при вариации температуры ΔT определяется из очевидного соотношения:

$$\Delta a \approx a \beta \Delta T.$$

При $\Delta t = 100$ °С ошибка в измерении ускорения a составит ~1 %.

Поскольку в рассматриваемом варианте прибора будет использована схема преобразователя с дифференциальными емкостями, с учетом эффекта компенсации степень влияния вариаций температуры непосредственно на измерительные емкости из-за изменения рабочего зазора вследствие теплового расширения пробной массы уменьшается: $\Delta a \approx a \cdot 10^{-3} \Delta t$ (при условии, что зазор $d \sim 50$ мкм).

Если же пробная масса и диэлектрическое основание изготовлены из одного материала, то этот эффект уменьшается настолько, что становится пренебрежимо малым и его можно не учитывать.

Необходимо отметить, что измерение изменений внешней температуры с помощью специального датчика температуры и учет этого в программах обработки информации существенно снизит ошибки, вызванные влиянием температурных вариаций.

Обратное динамическое влияние датчика малых перемещений на механическую чувствительную систему

Сила, действующая на пробную массу, определяется величиной электростатического притяжения ее к статорным обкладкам. Одна обкладка притягивает пробную массу с силой $F = S u^2 / 8\pi d^2$, где S — площадь статорной обкладки, u — напряжение на измерительном конденсаторе, d — зазор.

При $S \approx 0,7 \text{ см}^2$, $u \approx 5 \text{ В}$, $d \approx 50 \text{ мкм}$, $F = 0,3 \text{ дин}$, что для более «мягкой» системы приведет к смещению пробной массы на величину $x = F/m\omega_0^2 \approx 0,3/6 \cdot 4 \cdot 10^4 \approx 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

Если учесть, что с противоположной стороны действует близкая по величине и противоположно направленная сила, то погрешность в определении ускорения из-за неучета обратного динамического воздействия составит величину

$$\Delta a \approx (F/m \omega_0^2) 2a/d = (su^2/4\pi d^3 m \omega_0^2) a \approx 5 \cdot 10^{-4} a.$$

Влияние дрейфа упругого элемента датчика микроускорений

Для большинства известных материалов величина дрейфа «нуль — пункта» зависит от нагрузки, а следовательно, и от величины ускорения, и в относительных единицах $\Delta a/a < 10^{-6} \text{ 1/сут}$ [4]. Это означает, что в случае измерения ускорений космического аппарата при выключенных двигателях и не при движении в плотных слоях атмосферы, т. е. когда ускорения не превышают величины $a < 10^{-3}g$, дрейф упругого элемента чувствительной системы не будет превышать $10^{-9}g/\text{сут}$, что представляет малую величину, которой можно пренебречь. Большие же величины ускорений, как правило, непродолжительны, поэтому ошибка из-за дрейфа упругого элемента будет небольшой. Рассмотрим для примера гипотетический случай, когда аппарат движется с ускорением $20g$ в течение часа. Ошибка из-за дрейфа нуля прибора при этом не превысит $10^{-6}g$.

Упругий элемент механического осциллятора чувствительной системы перед установкой в прибор должен пройти термическую обработку по специальной методике для уменьшения дрейфовых явлений, в том числе и в начальный, установочный период времени работы прибора.

Методика эталонирования чувствительных элементов

Достаточно сложной проблемой являются испытания и эталонирование прибора для определения его калибровочных ко-

эффициентов в земных условиях. Надо отметить, что эталонирование ЧЭБУ и ЧЭМУ имеют свою специфику. Эталонирование производится методом наклонов, так что измеряется проекция ускорения свободного падения на ось чувствительности прибора. При эталонировании ЧЭБУ методом наклонов не удастся охватить весь диапазон, поскольку очевидно, что максимальное ускорение при этом может составить только 10 м/с^2 или $1g$. Эталонирование в диапазоне $10\text{--}200 \text{ м/с}^2$ можно обеспечить только с помощью центрифуги, однако получить высокую точность такой калибровки достаточно сложно. Необходимо не только контролировать с высокой точностью величину угловой скорости центрифуги, но и быть уверенным в постоянстве ее геометрических размеров. Неконтролируемые угловые деформации конструкции крепления датчика при изменении угловой скорости центрифуги могут привести к значительным ошибкам в определении констант эталонирования. Определение калибровочных коэффициентов в этом диапазоне с помощью измерений на центрифуге возможно, но с невысокой точностью 3–8 %. Эталонирование в диапазоне $(2 \cdot 10^{-3}\text{--}10) \text{ м/с}^2$ осуществляется, как уже отмечалось, методом наклонов.

Был разработан специальный стенд. Он представляет собой поворотное устройство от теодолита, установленное на наклонномерной плите. На поворотном устройстве крепится датчик (рис. 4). Наклономерная плита имеет микрометрические винты, с помощью которых можно наклонять плиту по двум взаимно перпендикулярным направлениям. Шаг установочных винтов 0,5 мм, расстояние между винтами $l = 250 \text{ мм}$. С помощью отсчетного устройства на лимбе теодолита с нониусом можно задавать любой угол наклона с точностью 0,1 град. дуги или $\sim 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$.

Один оборот установочного винта на плите вызывает наклон плиты, а значит и эталонируемого датчика, на угол $2 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$. Эта величина соответствует ускорению $\sim 2 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$. С помощью установочного винта легко задавать наклоны, которые соответствуют ускорению $2 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$ ($\sim 1/10$ оборота винта), и обеспечить тем самым весь требуемый диапазон для ЧЭБУ.

Что касается эталонирования ЧЭМУ, то обеспечение всего диапазона, вплоть до 10^{-7} м/с^2 , представляет очень сложную задачу. Для этого необходимо наклонить плиту на угол 10^{-8} рад или 2 угл. мс. Это задача практически не выполнима в земных

условиях. Во-первых, трудно найти исполнительный механизм, позволяющий задавать столь малые наклоны из-за деформаций в самом механизме. Во-вторых, шумовой фон наклонов земной поверхности, даже в условиях заглубленных на десятки метров фундаментом, обычно превышает эту величину. В геофизических исследованиях уникальные наклономерные платформы, установленные в штольне на 30-метровой глубине, позволяют проводить эталонирование высокочувствительных наклономеров с ошибкой $(2-3) \cdot 10^{-2}$ угл. с или $(1-1,5) \cdot 10^{-7}$ рад. Шумовой фон наклонов на фундаментах приповерхностного заложения может достигать 0,1 сек. дуги или $5 \cdot 10^{-7}$ рад. С помощью отсчетного устройства на установочном винте разработанной установки можно задавать наклон с точностью $3 \cdot 10^{-6}$ рад. Переход к меньшим углам осуществляется с помощью линейной интерполяции.

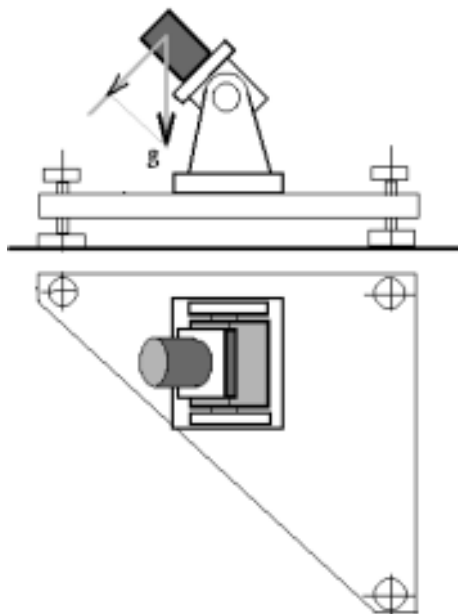


Рис. 4. Стенд для эталонирования датчиков методом наклона

Результаты эталонирования каждого датчика приводятся в графическом виде и в виде таблиц.

Результаты эталонирования чувствительных элементов

Были разработаны и созданы специальные модели датчиков для проведения испытаний. Модель представляет собой (рис. 5) двухкоординатный чувствительный элемент с пробной массой I , помещенный в цилиндр из жесткого пенопласта 2, являющийся пассивным термостатом. Через специальную переходную плату 3 измерительные емкости датчика с помощью разъема 4 соединяются с электронной платой преобразователя 5 «перемещение – изменение выходного напряжения». Неподвижный цилиндр чувствительного элемента 8 вклеен в трубку 7 из молибденового стекла. Пенопластовый цилиндр с датчиком помещен в цилиндрический корпус 6 из алюминиевого сплава АМГ-6. Крепежные отверстия на корпусе предназначены для крепления модели через переходную пластину на поворотном устройстве. С помощью поворотного устройства проводилась калибровка модели датчика методом наклонов. Наклону модели на угол α соответствует изменение проекции вектора ускорения силы тяжести на ось чувствительности прибора: $G_{\alpha} = G_0 \sin \alpha$.

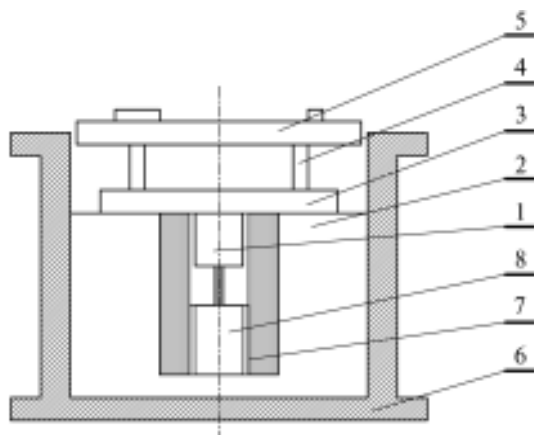


Рис. 5. Модель датчика для проведения испытаний чувствительных элементов

Результаты калибровки ЧЭБУ

Результаты калибровки модели датчика с ЧЭБУ приведены в табл. 1 и на графике (рис. 6). Калибровка проводилась в диапа-

зоне ($\pm G$), показания регистрировались через 10° . В табл. 1 приведены значения задаваемых углов наклона в градусах и радианах, показания выходного напряжения с датчика с точностью до 0,1 мВ, величина проекции ускорения свободного падения (в m/c^2) на ось чувствительности датчика, соответствующая каждому углу наклона.

Тангенс угла наклона аппроксимирующей линейной функции калибровочной кривой $\sim 16,93 \text{ мВ} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$. Это и есть коэффициент преобразования «изменение проекции G — изменение выходного напряжения» модели датчика. Преобразователь позволяет вести наблюдения в диапазоне $\pm 5 \text{ В}$. Это означает, что с помощью данной модели датчика можно вести наблюдения в диапазоне $\pm 30G$. Отступление от линейности во всем диапазоне не превышает 2 % (ряд 3 на том же графике).

Таблица 1

Результаты калибровки модели датчика с ЧЭБУ

Угол наклона		Проекция G , m/c^2	$U_{\text{вых}}$, мВ	Линейная ап- проксимация, мВ	Разность $U_{\text{вых}}$ и линейной аппроксима- ции, $mB \cdot 10$
град	рад				
-90	-1,57075	-9,81	169,4	165,0699	-43,3007
-80	-1,39622	-9,66089	166,5	162,561	-39,3904
-70	-1,22169	-9,21826	158,5	155,113	-33,8704
-60	-1,04717	-8,49556	145,8	142,9522	-28,478
-50	-0,87264	-7,51473	128,2	126,4482	-17,5183
-40	-0,69811	-6,30559	107,4	106,1023	-12,977
-30	-0,52358	-4,90487	83,3	82,53276	-7,67244
-20	-0,34906	-3,35512	56,9	56,45564	-4,44357
-10	-0,17453	-1,70344	28,4	28,66326	-2,632552
0	0	0	0	0	0
10	0,174528	1,703439	-28,8	-28,6633	1,367448
20	0,349056	3,355123	-57	-56,4556	5,443568
30	0,523583	4,904869	-82,4	-82,5328	-1,32756
40	0,698111	6,305592	-105,8	-106,102	-3,023
50	0,872639	7,514734	-125,8	-126,448	-6,48169
60	1,047167	8,495558	-142,1	-142,952	-8,52201
70	1,221694	9,218264	-153,6	-155,113	-15,1296
80	1,396222	9,660894	-160,8	-162,561	-17,6096
90	1,57075	9,81	-162,8	-165,07	-22,6993

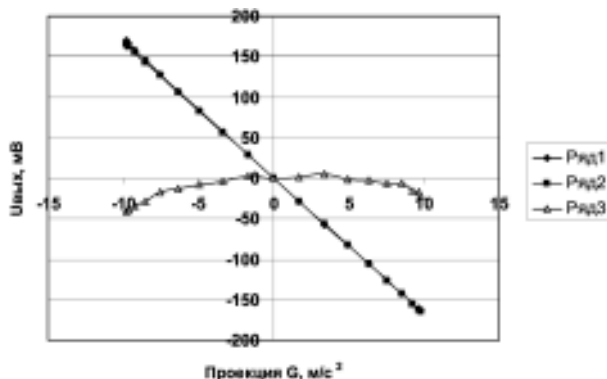


Рис. 6. Результат калибровки датчика с ЧЭБУ: ряд 1 — зависимость выходного напряжения датчика от величины проекции G на ось чувствительности; ряд 2 — линейная аппроксимация; ряд 3 — разность между двумя первыми рядами, умноженная на 10

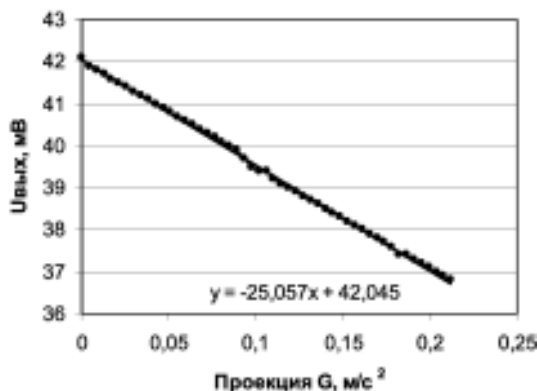


Рис. 7. Результаты калибровки датчика с ЧЭБУ в малом диапазоне наклонов

Для калибровки в малом диапазоне использовалась наклонномерная плита. Измерения велись с шагом $4,32 \cdot 10^{-4}$ рад (около 1,5 угл. мин), чему соответствовал поворот установочного винта плиты на 0,2 оборота (72°). При этом проекция ускорения свободного падения на ось чувствительности изменялась на величину $\sim 4,238 \cdot 10^{-3}$ м/с². В табл. 2 и на рис. 7 приведены результаты

калибровки модели датчика в малом диапазоне наклонов. Получена в высокой степени линейная зависимость «выходное напряжение — угол наклона».

Таблица 2

Результаты калибровки модели датчика в малом диапазоне наклонов

№	Проекция G , м/с ²	$U_{\text{вых}}$, мВ	№	Проекция G , м/с ²	$U_{\text{вых}}$, мВ
0	0	42,1	25	0,105948	39,4
1	0,004238	41,9	26	0,110186	39,2
2	0,008476	41,8	27	0,114424	39,1
3	0,012714	41,7	28	0,118662	39
4	0,016952	41,6	29	0,1229	38,9
5	0,02119	41,5	30	0,127138	38,8
6	0,025428	41,4	31	0,131376	38,7
7	0,029665	41,3	32	0,135613	38,6
8	0,033903	41,2	33	0,139851	38,5
9	0,038141	41,1	34	0,144089	38,4
10	0,042379	41	35	0,148327	38,3
11	0,046617	40,9	36	0,152565	38,2
12	0,05085	40,8	37	0,156803	38,1
13	0,055093	40,7	38	0,161041	38
14	0,059331	40,6	39	0,165279	37,9
15	0,063569	40,5	40	0,169517	37,8
16	0,067807	40,4	41	0,173755	37,7
17	0,072045	40,3	42	0,177993	37,6
18	0,076283	40,2	43	0,182231	37,4
19	0,08052	40,1	44	0,186468	37,4
20	0,084758	40	45	0,190706	37,3
21	0,088996	39,9	46	0,194944	37,2
22	0,093234	39,7	47	0,199182	37,1
23	0,097472	39,5	48	0,20342	37
24	0,10171	39,4	49	0,207658	36,9
			50	0,211896	36,8

«Поперечная» чувствительность модели датчика определяется прежде всего геометрией датчика — неперпендикулярностью ее осей чувствительности, а также отступлением от цилиндричности упругого элемента модели прибора. В данном случае результаты измерений показали, что относительная величина поперечной чувствительности не превышает $1,1 \cdot 10^{-3}$, т. е. 0,11 %.

Калибровка чувствительного элемента малых ускорений — ЧЭМУ методом наклонов

Принципиально используемый метод не отличается от метода наклонов, который применялся при калибровке ЧЭБУ. Однако в этом случае поворотное устройство от теодолита с отсчетным лимбом слишком грубо и приходится использовать только наклонномерную плиту в виде равнобедренного прямоугольного треугольника, в вершинах которого находятся регулировочные винты с шагом 0,5 мм. На плите устанавливается ЧЭМУ, так что ось его симметрии вертикальна, причем пробная масса находится в нижней части. Оси чувствительности ЧЭМУ расположены в плоскости, перпендикулярной его оси симметрии. При одном обороте установочного винта проекция ускорения свободного падения на ось чувствительности изменяется на $2,16 \cdot 10^{-3}G$ или на $2,12 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$.

На рис. 8 и в табл. 3 приведены результаты калибровки ЧЭМУ в достаточно большом диапазоне: $(0,01-0,24) \text{ м/с}^2$. Наклоны плиты проводились с угловым шагом, соответствующим изменению проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности датчика, $0,0106 \text{ м/с}^2$ (1/2 оборота установочного винта). Зависимость выходного напряжения от величины проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности является линейной функцией. Крутизна преобразования $P \approx 49,6 \text{ В} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^2$. Следовательно, изменению величины ускорения вдоль оси чувствительности на 10^{-7} м/с^2 соответствует изменение выходного напряжения с преобразователя на $\sim 5 \text{ мкВ}$.

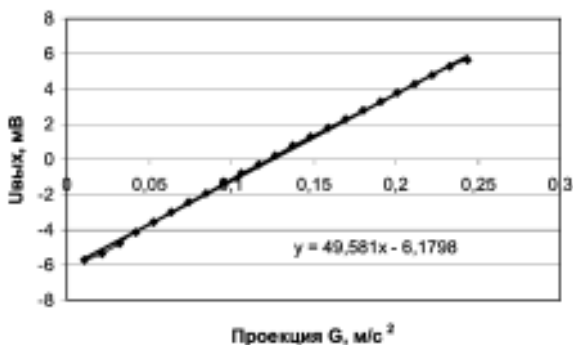


Рис. 8. Результаты калибровки датчика с ЧЭМУ

Таблица 3

Результаты калибровки модели датчика с ЧЭМУ

№	Проекция G , м/с^2	$U_{\text{вых}}$, мВ	№	Проекция G , м/с^2	$U_{\text{вых}}$, мВ
1	0,010584	-5,74	13	0,137592	0,76
2	0,021168	-5,37	14	0,148176	1,28
3	0,031752	-4,77	15	0,15876	1,78
4	0,042336	-4,16	16	0,169344	2,28
5	0,05292	-3,58	17	0,179928	2,78
6	0,063504	-3	18	0,190512	3,29
7	0,074088	-2,44	19	0,201096	3,77
8	0,084672	-1,9	20	0,21168	4,27
9	0,095256	-1,35	21	0,222264	4,77
10	0,10584	-0,81	22	0,232848	5,26
11	0,116424	-0,27	23	0,243432	5,61
12	0,127008	0,24			

Для калибровки в малом диапазоне изменений действующих ускорений с помощью простого приспособления задавались углы наклона с шагом 0,01 оборота, или $2,16 \cdot 10^{-5}$ рад. Трудности такой калибровки связаны, во-первых, с относительно большой ошибкой задания столь малых углов из-за неидеальной чистоты резьбы на регулировочных винтах, а во-вторых, — с высоким уровнем сейсмических шумов, в основном техногенного происхождения, и шумовым фоном наклонов. Измерения на этом этапе проводились еще не на специальном фундаменте, а на лабораторном столе, поэтому точность задания углов в 5–10 угл. с является практически предельной из-за деформационных процессов. Результаты этой калибровки одного из ЧЭМУ приведены на рис. 9 и табл. 4.

Таблица 4

Результаты калибровки модели датчика с ЧЭМУ в малом диапазоне (с шагом $2,16 \cdot 10^{-4}$ м/с^2)

№	Проекция G , м/с^2	$U_{\text{вых}}$, мВ	№	Проекция G , м/с^2	$U_{\text{вых}}$, мВ
1	0	-13,3	7	0,001059	0
2	0	-13,3	8	0,001271	2,35
3	0,000212	-10,8	9	0,001483	5,1
4	0,000424	-7,8	10	0,001695	7,9
5	0,000636	-4,95	11	0,001907	11,1
6	0,000848	-2	12	0,002119	13,7

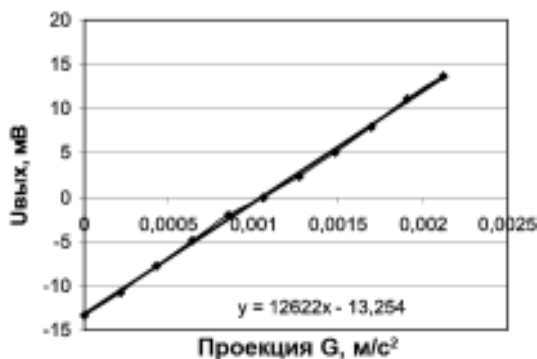


Рис. 9. Калибровка датчика с ЧЭБУ в малом диапазоне

Возможности задания и измерения малых ускорений, даже при эталонировании на специальных заглубленных фундаментах, ограничены. В первую очередь это связано с тем, что измерения происходят в наземной лаборатории, где всегда присутствуют сейсмические шумы. Следуя работе [5], минимально обнаружимое на фоне сейсмических шумов ускорение определяется соотношением:

$$\Delta a_{\min} \approx \sqrt{\frac{B}{2T}}. \quad (10)$$

Здесь T — время измерения, B — размерный коэффициент, характеризующий уровень сейсмических шумов в данном месте. Наиболее широкий участок спектра микросейсм, построенный по прямым наблюдениям, приведен в [6]. Близкая к экспериментальной зависимость спектральной плотности квадрата амплитуды микросейсмических колебаний от частоты имеет вид

$$A_{\omega}^2 = B \frac{1}{\omega^4}. \quad (11)$$

Типичный уровень микросейсмических шумов соответствует $B = 2 \cdot 10^{-9} \text{ см}^2/\text{с}^3 = 2 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2/\text{с}^3$. Подставляя это значение B в (10) и полагая $T = 1$ с, получим оценку шумового фона ускорений, определяемого микросейсмическими колебаниями на Земле:

$$\Delta a_{\min} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}^2.$$

Кроме того, необходимость создания устройств для задания столь малых углов наклона также проблематична. Например,

для того чтобы получить изменение проекции ускорения свободного падения на ось чувствительности 10^{-7} м/с², необходимо задать угол около 10^{-8} рад или 2 угл. мс. Даже для рычага длиной 1 м для получения такого изменения угла наклона необходимо задать механическое перемещение его конца на величину 10^{-8} м или 100 \AA , что практически невозможно, если вспомнить о деформациях самого рычага и других элементов конструкции.

Это — общая проблема эталонирования геофизических приборов, которая решается простым способом. Калибровка проводится для относительно больших значений углов или ускорений и линейно продолжается в область малых значений. Это законная операция, поскольку нелинейности проявляются в основном при больших значениях измеряемых величин.

2. Наклономер

Чувствительный элемент акселерометра, установленный так, что его оси чувствительности лежат в плоскости, перпендикулярной к местной гравитационной вертикали, является двухкоординатным наклономером, поскольку при наклоне датчика на его оси чувствительности действует проекция вектора ускорения свободного падения.

Диапазон измеряемых наклонов с помощью ЧЭМУ составит $\alpha \approx a_{max}/g_M \approx 3 \cdot 10^{-3}$ рад или ~ 10 угл. мин, а разрешающая способность $\sim 3 \cdot 10^{-8}$ рад или $6 \cdot 10^{-3}$ угл. с.

Чтобы после посадки аппарата с помощью ЧЭМУ вести наблюдения вариации наклонов, необходимо предварительно выставить его так, чтобы наклономер оказался в рабочем диапазоне, т. е. с точностью ± 6 угл. мин.

Измерения наклонов с помощью ЧЭБУ можно вести во всем диапазоне углов первоначальной установки аппарата, но разрешающая способность, естественно, ниже и составляет $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ рад или 1 угл. мин. С такой точностью с помощью ЧЭБУ можно определить угловое положение аппарата после посадки и в дальнейшем следить за его угловыми вариациями.

3. Сейсмометр

Оценки сейсмической активности Марса, проведенные по разным методикам, позволяют предполагать — для того, чтобы

зафиксировать марсотрясения с ориентировочной частотой более 100 случаев в год, необходимо измерять ускорения колебаний поверхности 10^{-6} – 10^{-7} м/с² в диапазоне частот (0,1–1) Гц.

Вертикальную составляющую сейсмических колебаний можно будет измерять только с помощью чувствительного элемента больших ускорений — ЧЭБУ. Поскольку частота p сейсмических колебаний поверхности много меньше собственной частоты ω_0 колебаний механического осциллятора, то амплитуда колебаний пробной массы $x \approx Ap^2/\omega_0^2$, где A — амплитуда сейсмических колебаний на частоте p . Минимальные измеряемые ускорения поверхности при этом определяются соотношением:

$$W_{\min} \approx \omega_0^2 x_{\min}$$

Если $x_{\min} \sim 10^{-6} \cdot 0,5 d$, то $W_{\min} \approx 2 \cdot 10^{-4}$ м/с². Увеличить чувствительность при измерении вертикальных сейсмических колебаний возможно, уменьшив жесткость упругого элемента. Если диаметр упругого элемента — стержня уменьшить до 0,8 мм, то разрешение сейсмометра будет $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ м/с².

Горизонтальные сейсмические колебания можно измерять и с помощью чувствительного элемента малых ускорений (ЧЭМУ), если, как и в случае наклономера, он выставлен в рабочий диапазон. При этом разрешение по ускорениям колебаний поверхности составит $\sim 10^{-8}$ м/с².

Предельное разрешение, определяемое тепловыми равновесными флуктуациями механического осциллятора чувствительного элемента, составляет величину, всего в три раза меньшую: $\sim 3 \cdot 10^{-9}$ м/с².

Чувствительные элементы были испытаны на специальных стендах переменных вертикальных и горизонтальных ускорений в области частот от 0,1 до 20 Гц, в результате чего были подтверждены основные характеристики датчиков как сейсмометров.

Литература

1. Таблицы физических величин. М.: Атомиздат, 1976. 1005 с.
2. Кей Дж., Лэби Т. Таблицы физических и химических постоянных. М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1962. 246 с.
3. Брагинский В.Б., Манукин А.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах. М.: Наука, 1974. 136 с.

4. *Попов Е.И.* Определение силы тяжести на подвижном основании. М.: Наука, 1967. 216 с.
5. *Гусев Г.А., Манукин А.Б.* Предельная чувствительность гравиинерциальных приборов при измерении квазистатических процессов. // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1985. № 9. С. 90–95.
6. *Fix J.E.* Ambient earth motion in the period range from 0,1 to 2560 sec. // Bull. Soc. Am. 1972. N. 62. P. 1753.