
УДК 621.317

Е.Н. Безвесильная, д-р техн. наук
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический ин-т»
(Украина, 03056, Киев, пр-т Победы, 37, корп. 1,
тел. (044) 2793375, e-mail: bezvesilna@mail.ru),

А.Г. Ткачук, аспирант
Житомирский государственный технологический университет
(Украина, 10005, Житомир, ул. Черняховского, 103,
тел. (097) 1675327, e-mail: andrew_tkachuk@i.ua)

Моделирование влияния изменений температуры на величину передаточного коэффициента пьезоэлектрического гравиметра авиационной гравиметрической системы

Рассмотрена математическая модель пьезоэлектрического гравиметра авиационной гравиметрической системы. Выведена и проанализирована передаточная функция гравиметра. Исследована зависимость передаточного коэффициента пьезоэлектрического гравиметра от изменений температуры окружающей среды, проведено соответствующее моделирование.

Розглянуто математичну модель п'єзоелектричного гравіметра авіаційної гравіметричної системи. Виведено та проаналізовано передаточну функцію гравіметра. Досліджено залежність передаточного коефіцієнта п'єзоелектричного гравіметра від зміни температури навколишнього середовища, проведено відповідне моделювання.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пьезоэлектрический гравиметр, ускорение силы тяжести, передаточный коэффициент, пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость.

Процесс гравиметрии включает этапы измерения: на неподвижном основании, на подводной лодке, на надводном судне и на борту самолета. Для определения характеристик гравитационного поля Земли используют авиационную гравиметрическую систему (АГС), чувствительным элементом которой является гравиметр. С помощью АГС можно получить гравиметрическую информацию в труднодоступных районах земного шара гораздо быстрее и с меньшими затратами, чем с помощью других гравиметрических средств или систем.

Эффективность работы АГС в значительной степени обеспечивается выбором гравиметра. Однако результаты измерений ускорения силы тя-

© Е.Н. Безвесильная, А.Г. Ткачук, 2013

жести, полученные с помощью современных гравиметров, имеют большие погрешности. Реально достижимая точность авиационных гравиметрических измерений (3...10) мГал. Но для высокоточных измерений гравитационного поля Земли данная точность авиационных гравиметрических измерений является недостаточной, поскольку другие виды гравиметрических измерений (морские, наземные) способны обеспечить точность в пределах (0,01...1) мГал [1]. Кроме того, быстродействие существующих гравиметров также недостаточно. Большинство из них неавтоматизированны. Обработка результатов измерений выполняется на земле после полета в течение нескольких месяцев.

Поэтому перспективным является использование в качестве чувствительного элемента АГС пьезоэлектрического гравиметра (ПГ) [2], что позволяет повысить точность измерения ускорения силы тяжести до 1 мГал и увеличить быстродействие. Однако, в известной литературе по гравиметрии не исследовано влияние на работу ПГ его собственных параметров, которые изменяются при воздействии внешней среды.

Пьезоэлектрический гравиметр содержит чувствительный элемент, размещенный в герметичном корпусе. Чувствительный элемент ПГ АГС состоит из пьезоэлемента (ПЭ), работающего на деформации сжатия-растяжения, с изоляторами на его торцах и инерционной массы. Для повышения надежности и прочности конструкции чувствительный элемент упруго поджат к основанию винтом. Выход ПГ подключен к входу устройства вычисления выходного сигнала ПГ. Чувствительный элемент ПГ выполнен в виде пьезопластин, склеенных между собой в пьезопакет. Инерционная масса изготовлена из диамагнитных материалов во избежание влияния посторонних магнитных полей [3].

Наиболее оптимальный пьезоматериал для чувствительного элемента ПГ — кварц [3]. Несмотря на малое значение пьезомодуля и относительную диэлектрическую проницаемость этого материала стабильность электромеханических характеристик кварца позволяет использовать его в качестве чувствительного элемента ПГ. Особенностью кварца, обеспечивающей ему преимущество для применения в конструкции ПГ, является отсутствие чувствительности к деформации сдвига и объемной деформации. Кварц обеспечивает измерение только в одном направлении — вдоль измерительной оси, перпендикулярной плоскости установки ПГ.

Работа ПГ заключается в следующем. Ускорение силы тяжести g_z , действующее на ПЭ, преобразуется в механическое напряжение σ , которое численно равно силе G , приходящейся на единицу площади сечения ПЭ. Затем механическое напряжение преобразуется на электродах ПЭ в напряжение. Так выглядит схема прямого преобразования сигнала ускорения силы тяжести в напряжение. Однако, поскольку ПЭ имеет свойство

разряжаться, за период времени 5τ , где τ — постоянная времени, выходное напряжение ПГ не будет соответствовать действительному значению действующего на ПГ ускорения силы тяжести. Поэтому к схеме прямого преобразования сигнала необходимо добавить контур отрицательной обратной связи. В конечном итоге ПЭ одновременно является и чувствительным элементом и силовым компенсатором, что позволяет обеспечить максимальную его упругость, стабильность работы в течение длительного времени и, как следствие, высокую надежность. Вынужденные колебания происходят в колебательной системе ПГ при воздействии на его чувствительную массу ускорения силы тяжести. Рассмотрим колебательную систему ПГ, принципиальная динамическая схема которой представлена на рис. 1. Предложенная схема справедлива при следующих условиях:

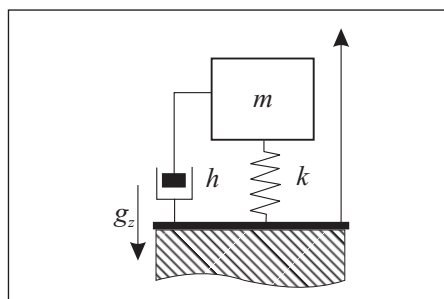


Рис. 1. Схема колебательной системы ПГ

- 1) движение инерционной массы рассматривается в инерциальной системе отсчета и происходит только в одном направлении — вдоль оси, перпендикулярной плоскости установки ПГ;
- 2) вес упругого элемента значительно меньше веса инерционной массы;
- 3) в пределах возможных колебаний сила упругости пропорциональна деформации упругого элемента;
- 4) масса чувствительного элемента, коэффициенты упругости и демпфирования неизменны во времени.

Уравнение движения ПГ, без учета знака g_z , имеет следующий вид:

$$m\ddot{\alpha} + n\dot{\alpha} + k\alpha = mg_z, \quad (1)$$

где m — вес чувствительного элемента; n — коэффициент затухания; k — коэффициент упругости, зависящий от свойств чувствительного элемента; α — перемещение чувствительного элемента. Если разделить уравнение (1) на m , то получим $\ddot{\alpha} + 2\xi\omega_0\dot{\alpha} + \omega_0^2\alpha = g_z$, где ξ — коэффициент демпфирования; ω_0 — собственная частота ПГ.

Используем преобразование Лапласа для уравнения (1):

$$mp^2 X(p) + npX(p) + kX(p) = mA(p), \quad (2)$$

где $X(p)$ и $A(p)$ — преобразования Лапласа для перемещения $\alpha(t)$ и ускорения g_z . Решая уравнение (2) относительно $X(p)$, получаем

$$X(p) = \frac{mA(p)}{mp^2 + np + k}. \quad (3)$$

Введем переменную $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ и обозначим $2\xi\omega_0 = n/m$. Тогда уравнение (3) примет вид

$$X(p) = \frac{A(p)}{p^2 + 2\xi\omega_0 p + \omega_0^2}.$$

Коэффициент демпфирования будем выбирать из следующих соображений [4]. В упругих системах коэффициент демпфирования выбирают в пределах $\xi = 0,6 \div 0,8$. Увеличение данного коэффициента приводит к уменьшению максимальной амплитуды динамической погрешности, однако чрезмерное демпфирование может привести к возрастанию фазовой задержки и времени регулирования. Поэтому выберем $\xi = 0,705$.

Поскольку частота сигнала ускорения силы тяжести равна 0,00175 рад/с, достаточно обеспечить собственную частоту ПГ ω_0 в пределах 0,1 рад/с, чтобы использовать его в качестве фильтра низких частот и отделять от полезного сигнала такие помехи, как влияния вертикального ускорения подвижного основания (преобладающая частота 0,269 рад/с), поступательного виброускорения (преобладающая частота 3140 рад/с) и углового виброускорения (преобладающая частота более 0,1 рад/с) [2].

Итак, конечное уравнение колебательного процесса ПГ имеет вид

$$X(p) = \frac{A(p)}{p^2 + 2 \cdot 0,1 \cdot 0,705 p + 0,1^2} = \frac{A(p)}{0,01(100p^2 + 14p + 1)},$$

а передаточная функция прямого преобразования сигнала ускорения силы тяжести в напряжение —

$$W(p) = \frac{K}{0,01(100p^2 + 14p + 1)} = \frac{100K}{100p^2 + 14p + 1}, \quad (4)$$

где K — коэффициент передачи ПГ.

Формула для определения коэффициента передачи ПГ с учетом силового компенсирования ПЭ имеет вид

$$K = \frac{1}{S} \left[\frac{dS \frac{1}{C_{ПЭ}}}{1 + dS \frac{1}{C_{ПЭ}} \cdot \frac{Yd}{l}} \right], \quad (5)$$

где S — площадь поперечного сечения ПЭ; d — пьезомодуль; $C_{ПЭ}$ — емкость ПЭ; Y — модуль Юнга; l — длина ПЭ. Размерность данной формулы представим в виде

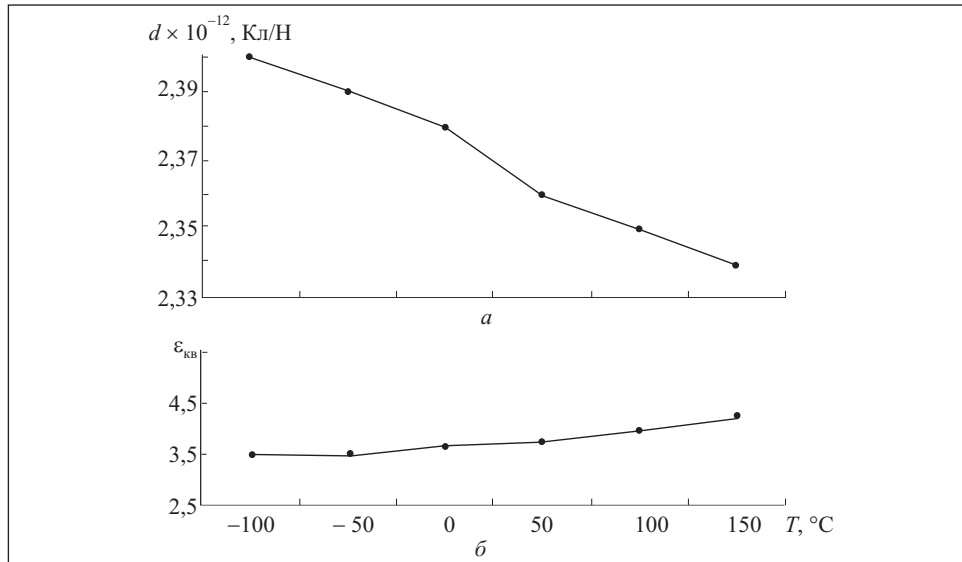


Рис. 2. Графики изменения пьезомодуля кварца (а) и его диэлектрической проницаемости (б) при изменении температуры

$$K = \frac{1}{\text{м}^2} \left[\frac{\frac{\text{Кл}}{\text{Н}} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{\text{В}}{\text{Кл}}}{1 + \frac{\text{Кл}}{\text{Н}} \cdot \text{м}^2 \cdot \frac{\text{В}}{\text{Кл}} \cdot \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{Кл}}{\text{Н}} \cdot \frac{1}{\text{м}}} \right] = \frac{1}{\text{м}^2} \left[\frac{\frac{\text{м}^2 \cdot \text{В}}{\text{Н}}}{1 + \frac{\text{В} \cdot \text{Кл}}{\text{м} \cdot \text{Н}}} \right] =$$

$$= \frac{1}{\text{м}^2} \left[\frac{\frac{\text{м}^2 \cdot \text{В}}{\text{Н}}}{1 + \frac{\text{Дж} \cdot \text{Кл}}{\text{Кл} \cdot \text{м} \cdot \text{Н}}} \right] = \frac{1}{\text{м}^2} \cdot \frac{\text{м}^2 \cdot \text{В}}{\text{Н}} = \frac{\text{В}}{\text{Н}}.$$

Как видно из уравнения (5), коэффициент передачи ПГ зависит от изменений величин пьезомодуля, емкости, длины ПЭ и других параметров. Однако, если при изменении температуры значение модуля Юнга материала ПЭ практически не изменяется, а длина и площадь остаются постоянными, то значения пьезомодуля и емкости претерпевают значительные изменения.

Как известно [5], значение d пьезомодуля кварца уменьшается при возрастании температуры (рис. 2, а). Емкость кварцевого ПЭ при изменении температуры изменяется значительно интенсивнее, чем пьезомо-

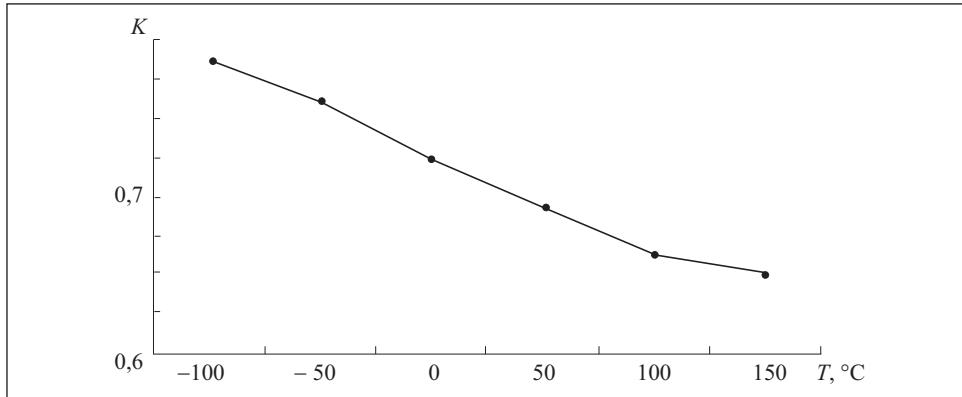


Рис. 3. График влияния изменения температуры на передаточный коэффициент ПГ

дуль, т.е. изменяется диэлектрическая проницаемость кварца, а изменение его емкости происходит вследствие этого изменения:

$$C_{\text{ПЭ}} = \frac{\varepsilon S}{D} = \frac{\varepsilon_{\text{кв}} \varepsilon_{\text{в}} S}{D},$$

где $\varepsilon_{\text{в}}$ — диэлектрическая постоянная вакуума, $\varepsilon_{\text{в}} = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $\varepsilon_{\text{кв}}$ — диэлектрическая проницаемость кварца; D — толщина ПЭ. При температуре от -150 °С до $+576$ °С (точка Кюри для кварца) диэлектрическая проницаемость кварца возрастает от 3,5 до 4,5 (рис. 2, б).

Результаты моделирования влияния изменения упомянутых параметров ПЭ на передаточный коэффициент ПГ представлены в таблице и на рис. 3, из которого видно, что при изменении температуры от -100 °С до $+150$ °С передаточный коэффициент ПГ уменьшается от 0,777 до 0,648, или от 77,7 до 64,8 с учетом (4).

Зависимость передаточного коэффициента ПГ от изменений температуры

T, °C	$\varepsilon_{\text{кв}}$	$d \times 10^{-12}$, Кл/Н	K
-100	3,5	2,4	0,777
-50	3,5	2,4	0,752
0	3,7	2,38	0,718
50	3,8	2,36	0,689
100	4	2,36	0,660
150	4,2	2,34	0,648

Поскольку гравиметрические измерения с помощью ПГ АГС проводятся на борту самолета, диапазон перепада температур необходимо подбирать, исходя из условий эксплуатации ПГ. Как известно [1], температура понижается при возрастании высоты в среднем на один градус при поднятии на 100 м. Температура атмосферы на различной высоте над уровнем моря (при температуре на нулевой высоте 15°C) следующая:

Высота, км	0	0,1	0,5	1	2	5	8	10	15	30
T, °C	15,0	14,67	11,75	8,50	2,00	-17,47	-36,93	-49,90	-56,50	-46,75

Современные пассажирские самолеты летают на высоте 9—10 км. Крейсерская скорость и высота полета жестко связаны, так как плотность воздуха и, следовательно, его сопротивление на различных высотах — различные. Поэтому при скорости 900 км/ч (типовая скорость пассажирских самолетов) такая высота является оптимальной относительно расхода топлива по соотношению сопротивления воздуха и подъемной силы.

Как указано выше, на высоте 10 км температура воздуха составляет -49,90 °C, а на земле — максимум до +50 °C. Поэтому проанализируем изменение передаточного коэффициента ПГ в диапазоне температур от -50 °C до +50 °C. На рис. 3 видно, что в промежутке температур от -100 °C до +150 °C передаточный коэффициент ПГ уменьшается всего на 8 %, а на высоте 9—10 км, на которой в основном проводятся гравиметрические измерения, практически не изменяется. Следовательно, показания ПГ АГС не имеют погрешностей, вызванных влиянием внешней среды, и гравиметр стабильно работает в течение всего измерительного процесса.

Выводы

Результаты выполненных исследований позволили обосновать целесообразность использования ПГ в качестве чувствительного элемента АГС для измерений аномалий ускорения силы тяжести.

Проведенное моделирование зависимости передаточного коэффициента ПГ от изменений температуры позволило установить, что на высоте 9—10 км, на которой проводятся гравиметрические измерения с помощью ПГ АГС, температура окружающей среды не влияет на работу ПГ.

The mathematical model of piezoelectric gravimeter of aviation gravimetric system has been considered. The transfer gravimeter function has been deduced and analyzed. The dependence of the gravimeter piezoelectric gear coefficient on the temperature changing ambient has been researched and the appropriate modeling has been done.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Безвесільна О.М.* Вимірювання прискорень. — Київ : Либідь, 2001. — 261 с.
2. *Патент України 99084, МПК G 01 В 7/00. П'єзогравіметр / О.М. Безвесільна, Ю.О. Подчашинський, А.Г. Ткачук.* — № а2011 13894; Заявл. 25.11.2011; — Опубл. 10.07.2012. Бюл. № 13.
3. *Безвесільна О.М., Тимчик Г.С.* Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: Підручник. — Житомир : ЖДТУ, 2012. — 812 с.
4. *Шарапов В.М.* Пьезоэлектрические датчики / Под ред. В.М. Шарапова. — М. : Техносфера, 2006. — 632 с.
5. *Воловик В.П.* Фізика: Для університетів / В.П. Воловик — Київ, Ірпінь : Перун, 2005. — 864 с.

Поступила 12.02.13

БЕЗВЕСИЛЬНАЯ Елена Николаевна, Заслуженный деятель науки и техники Украины, д-р техн. наук, профессор кафедры приборостроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». В 1972 г. окончила Киевский политехнический ин-т. Область научных исследований — методы измерения механических величин, гравиметрические системы.

ТКАЧУК Андрей Геннадьевич, аспирант кафедры автоматизированного управления технологическими процессами и компьютерных технологий Житомирского государственного технологического университета. Область научных исследований — методы измерения механических величин, гравиметрические системы и гравиметры, системы автоматического управления.