

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(12)

РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
СОБСТВЕННОСТИ

(19) ВУ (11) 11135

(13) С1

(46) 2008.10.30

(51) МПК (2006)

G 01V 7/00

(54) СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

(21) Номер заявки: а 20060958

(22) 2006.09.29

(43) 2008.04.30

(71) Заявитель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(72) Авторы: Джилавдари Игорь Захарович; Тявловский Андрей Константинович (ВУ)

(73) Патентообладатель: Белорусский национальный технический университет (ВУ)

(56) ЮЗЕФОВИЧ А.П., ОГОРОДОВА Л.В. Гравиметрия. - Москва: Недра, 1980. - С. 62-63.

ВУ 6758 С1, 2005.

RU 2055374 С1, 1996.

(57)

1. Способ измерения ускорения свободного падения, при котором возбуждают колебания физического маятника, измеряют среднее значение его периода колебаний T_{cp1} в первом пункте с известным значением ускорения свободного падения g_1 , измеряют среднее значение его периода колебаний T_{cp2} во втором пункте с неизвестным значением ускорения свободного падения g_2 и величину g_2 определяют из выражения

$$g_2 = g_1 - 2g_1 \frac{T_{cp2} - T_{cp1}}{T_{cp2}},$$

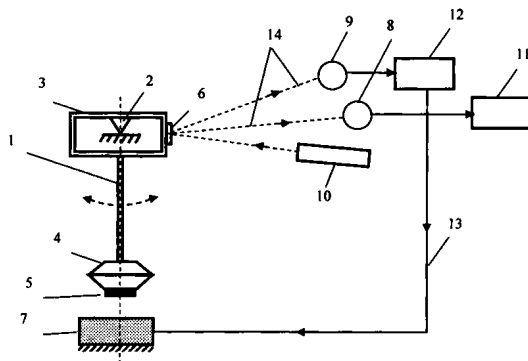
отличающийся тем, что измерения периодов колебаний T_{cp1} и T_{cp2} проводят в режиме автоколебаний физического маятника.

2. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что периоды колебаний T_{cp1} и T_{cp2} физического маятника определяют путем измерения времени τ_1 и τ_2 заданного числа N_1 и N_2 полных

периодов колебаний на соответствующих пунктах, так что $T_{cp1} = \frac{\tau_1}{N_1}$ и $T_{cp2} = \frac{\tau_2}{N_2}$, причем

числа N_1 и N_2 задают, исходя из допустимой погрешности δg_2 , которая удовлетворяет равенству

$$\frac{\delta g_2}{g_2} \approx \delta T \cdot \left(\frac{1}{N_1 \cdot T_{cp1}} + \frac{1}{N_2 \cdot T_{cp2}} \right),$$



ВУ 11135 С1 2008.10.30

где δT - полная случайная инструментальная погрешность однократного измерения интервала времени.

3. Способ по п. 1, **отличающийся** тем, что периоды колебаний T_{cp1} и T_{cp2} физического маятника измеряют при одинаковой амплитуде колебаний.

Изобретение относится к области измерительной техники и может быть использовано при измерениях изменений ускорения свободного падения в различных геодезических пунктах.

Известен способ относительных измерений ускорения свободного падения [1, §27] путем измерения деформаций упругих подвесов, удерживающих пробную массу, под действием этой силы. Основной недостаток этого способа состоит в том, что любые упругие подвесы, независимо от их конструкций, подвержены дрейфу, в результате которого они нуждаются в регулярной калибровке в геодезических пунктах с известным абсолютным значением силы тяжести. После такой калибровки приборы могут сохранять свою потенциальную точность, в лучшем случае, всего несколько часов.

Известен маятниковый способ измерения ускорения свободного падения g [1, §14] между геодезическими пунктами: пунктом определения неизвестного значения g и исходным пунктом с известным значением g - прототип. В этом способе возбуждают свободные колебания физического маятника, задают начальную α_0 и конечную α_N амплитуды колебаний, измеряют в исходном пункте средний период колебаний T_{cp1} затухающих колебаний маятника в пределах выбранного углового интервала, также измеряют в данном угловом интервале средний период колебаний T_{cp2} в определяемом пункте и вычисляют значение ускорения свободного падения g_2 в определяемом пункте по формуле

$$g_2 = g_1 - 2g_1 \frac{T_{cp2} - T_{cp1}}{T_{cp2}}, \quad (1)$$

где g_1 значение ускорения свободного падения в исходном пункте.

Основной недостаток этого способа состоит в низкой точности измерений и сложности процедуры измерений. Этот недостаток обусловлен, главным образом, малым временем измерений, которое, в свою очередь, связано с затуханием колебаний из-за наличия трения.

Поскольку в (1) в качестве измеряемого параметра входит время, погрешность измерения g_2 обусловлена, в конечном счете, погрешностью измерения времени.

Пусть инструментальная погрешность однократного измерения интервала времени равна δT_1 и пусть полное время колебаний в заданном интервале изменения амплитуды $\tau = NT_{cp}$. Отсюда, учитывая, что N - постоянная величина, получим соотношение, связывающее погрешность δT_{cp} измерения T_{cp} и погрешность $\delta \tau$ измерения τ :

$$\frac{\delta T_{cp}}{T_{cp}} = \frac{\delta \tau}{\tau}. \quad (2)$$

При измерении времени τ секундомер включается и выключается один раз (при этом значение измеряемого интервала времени не влияет на погрешность δT). Следовательно, погрешность $\delta \tau = \delta T_1$. Отсюда и из предыдущей формулы имеем

$$\delta T_{cp} = \frac{\delta T_1}{N}. \quad (3)$$

Далее, полагая в формуле (1), что значение g_1 известно точно, учитывая, что $T_{cp1} \approx T_{cp2}$, найдем, что погрешность δg_2 измерения g_2 удовлетворяет равенству:

$$\frac{\delta g_2}{g_2} \approx \frac{\delta T_{cp1}}{T_{cp1}} + \frac{\delta T_{cp2}}{T_{cp2}}. \quad (4)$$

ВУ 11135 С1 2008.10.30

Из формулы (2) имеем $\delta T_{cp1} = \frac{\delta T_1}{N_1}$ и $\delta T_{cp2} = \frac{\delta T_1}{N_2}$, где N_1 и N_2 - число периодов колебаний маятника в первом и втором пунктах. Отсюда и из (4) получим:

$$\frac{\delta g_2}{g_2} \approx \delta T_1 \cdot \left(\frac{1}{N_1 \cdot T_{cp1}} + \frac{1}{N_2 \cdot T_{cp2}} \right), \quad (5)$$

или

$$\frac{\delta g_2}{g_2} \approx \delta T_1 \cdot \left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} \right), \quad (6)$$

где τ_1 и τ_2 - полное время колебаний маятника при измерениях g_1 и g_2 .

В прототипе под погрешностью δT_1 понимают основную погрешность канала изменения времени гравиметра (регистратора) и не учитывают дополнительные погрешности, обусловленные как конструкцией гравиметра, так и влиянием факторов воздействия окружающей среды. Эти дополнительные погрешности в прототипе пытаются учесть введением различного рода поправок к основной погрешности: поправки "за амплитуду", поправки "за плотность окружающей среды", поправки "за температуру" и др. [1, табл. 12, стр. 94-95]. Однако введение этих поправок в прототипе не позволяет исключить влияние соответствующих факторов влияния. При этом, в частности, исключается возможность учета взаимодействия этих погрешностей.

Найдем требование к погрешности гравиметра. Из (4), с учетом того, что $T_{cp1} \approx T_{cp2} = T_{cp}$, следует:

$$\frac{\delta g_2}{g_2} \approx 2 \frac{\delta T_{cp}}{T_{cp}}. \quad (7)$$

При оценках требований к маятниковым гравиметрам исходят из условия достижения погрешности δg порядка 0,01 мГал ($1 \text{ мГал} = 10^{-6} \text{ см/с}^2$). Из формулы (7) следует, что в этом случае, поскольку $g \approx 10^6$ мГал, относительная погрешность измерения периода T_{cp} должна быть не хуже $5 \cdot 10^{-9}$.

Лучшими маятниковыми относительными гравиметрами являлись гравиметры типа "Агат". В этих гравиметрах достигнута минимальная величина $\delta g \approx 8 \cdot 10^{-2}$ мГал [1, стр. 88]. Следовательно, данный способ измерений не может обеспечить требуемую погрешность 0,01 мГал.

Это объясняется тем, что:

в этой формуле не учитывается характер затухания амплитуды, обусловленный трением. Как показано в [2], вид закона затухания амплитуды существенно влияет на поправку "за амплитуду";

трение нестабильно. Оно может заметно изменяться как в процессе одной серии колебаний, так и в промежутке между сериями. Поэтому предсказать и рассчитать влияние трения на величину q с высокой точностью нельзя;

влияние трения и затухания амплитуды в данном способе пытаются уменьшить проведением измерений при малых амплитудах колебаний (обычно 30-40 угловых минут). Известно, однако, что при малых амплитудах колебаний заметно возрастает влияние вибраций основания на значение периода колебаний, так что значения отдельных периодов флуктуируют в пределах (10^{-3} – 10^{-4}) сек;

значения отдельных периодов колебаний подвержены действию не только высокочастотных возмущений типа вибраций, но и возмущениям с большими периодами изменений, например, вследствие нестабильности температуры или нестабильности остаточного давления.

ВУ 11135 С1 2008.10.30

Для того чтобы надежно снизить влияние вибраций до уровня $5 \cdot 10^{-9}$ с требуется время измерений не менее 10^5 с или, примерно, 28 часов непрерывных качаний маятника, в течение которых маятник совершит 10^5 полных колебаний. Чтобы снизить влияние возмущений с большими периодами, время колебаний маятника должно быть еще больше.

Отметим, что, с целью обеспечения необходимого уровня подавления возмущений различного характера и, главным образом, с целью подавления влияния вибраций основания, при измерениях величины g абсолютными баллистическими гравиметрами время измерений доводят до 56 часов [3, стр. 153].

В данном способе измерений время колебаний маятника в заданном интервале амплитуд не превышает 30 минут, в течение которых маятник совершает, примерно, 1800 колебаний.

Для уменьшения влияния вибраций в маятниковых гравиметрах используют два маятника, совершающих колебания в противофазе [1, §23]. Кроме того, "Вследствие большого числа источников погрешностей, их различного влияния (случайного, полусистематического, систематического) определение результирующей погрешности является сложной задачей, которая может быть достаточно уверенно решена на основе большого числа измерений, выполненных приборами разных типов при однородных условиях наблюдений" [1, стр. 95].

Как видим, такой подход существенно усложняет процедуру измерения и, все-таки, не обеспечивает требуемого уровня погрешности.

Таким образом, суммируя, можно сказать, что основной причиной большой погрешности прототипа является малое время измерений.

Задачей изобретения является увеличение точности и упрощение измерений.

Решение этой задачи обеспечивается тем, что в известном способе измерения ускорения свободного падения, в котором возбуждают колебания физического маятника, измеряют среднее значение его периода колебаний T_{cp1} в первом пункте с известным значением ускорения свободного падения g_1 , измеряют среднее значение его периода колебаний T_{cp2} во втором пункте с неизвестным значением ускорения свободного падения g_2 и величину g_2 определяют по формуле

$$g_2 = g_1 - 2g_1 \frac{T_{cp2} - T_{cp1}}{T_{cp2}},$$

измерения T_{cp1} и T_{cp2} проводят в режиме автоколебаний физического маятника.

В частности, в предлагаемом способе периоды колебаний T_{cp1} и T_{cp2} физического маятника определяют путем измерения времени τ_1 и τ_2 заданного числа N_1 и N_2 полных периодов колебаний на соответствующих пунктах, так что $T_{cp1} = \frac{\tau_1}{N_1}$ и $T_{cp2} = \frac{\tau_2}{N_2}$, причем

числа N_1 , N_2 задают, исходя из допускаемой погрешности δg_2 , которая удовлетворяет равенству

$$\frac{\delta g_2}{g_2} \approx \delta T \cdot \left(\frac{1}{T_1 \cdot T_{cp1}} + \frac{1}{T_2 \cdot T_{cp2}} \right), \quad (8)$$

где δT - полная случайная инструментальная погрешность однократного измерения интервала времени.

В частности, в предлагаемом способе периоды колебаний T_{cp1} и T_{cp2} физического маятника измеряют при одинаковой амплитуде колебаний.

Измерение в режиме автоколебаний устраняет влияние как самого трения, так и характера зависимости трения от скорости колебаний на результат измерений, поскольку при автоколебаниях потери энергии маятника на трение полностью компенсируются за счет энергии внешнего источника, независимо от характера трения.

ВУ 11135 С1 2008.10.30

В данном режиме время колебаний маятника становится практически неограниченным. За счет выбора N_1 и N_2 может быть устранено влияние как относительно быстрых, так и относительно медленных флуктуаций и дрейфов на средние значения периодов колебаний. Как следует из формулы (6) это позволяет получить значение g_2 с любой наперед заданной погрешностью.

Понятие "полная случайная инструментальная погрешность" δT , входящая в (8), включает в себя как основную, так и дополнительные погрешности, обусловленные влиянием изменения нестабильности окружающей среды и параметров конструкции гравиметра. В прототипе эти факторы рассматривались лишь в виде поправок к основной погрешности, обусловленной погрешностью регистратора. При этом отсутствовала возможность учета взаимодействия этих погрешностей. В предлагаемом способе такая возможность имеется.

Измерение периодов T_{cp1} и T_{cp2} при одинаковой амплитуде обеспечивает постоянство методической погрешности измерений, обусловленной зависимостью периода от амплитуды. В этом случае отпадает сама необходимость вычисления поправки "за амплитуду". В данном режиме также отпадает необходимость проводить измерения при малых амплитудах колебаний.

На чертеже показана схема управления маятниковым гравиметром, реализующая предлагаемый способ измерений.

Здесь 1 - физический маятник с опорой качения, включающий: опору в виде ребра призмы 2, которая опирается на неподвижную плоскую поверхность, серьгу - 3, груз - 4, постоянный магнит 5, прикрепленный к грузу 4, зеркало - 6, прикрепленное к серьге 3, электромагнит - 7, фотоприемники - 8 и 9, лазер - 10, частотомер-хронометр - 11, блок управления - 12, цепь управления 13, луч 14 лазера, отраженный от зеркала 6 при его двух различных положениях зеркала.

Лазер 10, зеркало 6, фотоприемник 9, блок управления 11, постоянный магнит 5 и электромагнит 7 образуют систему, обеспечивающую мягкий режим возбуждения автоколебаний маятника 1, в котором автоколебания маятника с заданной амплитудой возникают и поддерживаются без внешнего толчка. Амплитуда колебаний маятника задается положением фотоприемника 9.

Данная система работает следующим образом. При колебаниях маятника, если луч 14 лазера, отраженный от зеркала 6, не попадает во входное окно фотоприемника 9, блок управления 11 через цепь 13 включает электромагнит 7, который притягивает маятник с помощью магнита 5 всякий раз, когда маятник подходит к положению равновесия. В случае, когда этот же луч пересекает входное окно фотоприемника 9, блок управления 11 включает электромагнит 7, который притягивает маятник всякий раз, когда маятник отходит от положения равновесия. Таким образом, поддерживается заданная амплитуда колебаний маятника.

Фотоприемник 8 установлен в таком положении, при котором луч 14 лазера 10, отраженный от зеркала 6, попадает в его входное окно лишь тогда, когда маятник находится в положении равновесия. Частотомер - хронометр 11 вместе с лазером 10, зеркалом 6 и фотоприемником 8 образуют систему измерения времени колебаний маятника 1. Частотомер запускается при первом прохождении лучом 14 и останавливается после заданного числа прохождений этим лучом положения равновесия маятника, которое фиксируется фотоприемником 8.

Предлагаемый способ реализуют следующим образом.

1. Задают априори значения N_1 и N_2 , исходя из формулы (8) и заданных значений погрешности δg_2 и полной инструментальной случайной погрешности δT , а также условий $T_{cp1} \approx T_{cp2}$ и $g_1 \approx g_2$. В частности, можно считать, что $N_1 \approx N_2 = N$. Тогда

$$N \approx 2 \frac{\delta T}{T_{cp1}} \cdot \frac{g_1}{g_2}. \quad (9)$$

ВУ 11135 С1 2008.10.30

2. Проводят измерения $T_{\text{ср1}}$ на исходном пункте с известным значением ускорения свободного падения, равным g_1 . Для этого включают блок управления 11. После того как маятник входит в режим автоколебаний с заданной амплитудой колебаний, измеряют время τ_1 полного числа N периодов колебаний и вычисляют среднее значение периода по формуле

$$T_{\text{ср1}} = \frac{\tau_1}{N}. \quad (10)$$

3. Проводят измерения $T_{\text{ср2}}$ в пункте с неизвестным значением ускорения свободного падения g_2 . Для этого включают блок управления 11. После того как маятник входит в режим автоколебаний с той же амплитудой колебаний, как и в первом случае, измеряют время τ_2 полного числа N периодов колебаний и вычисляют среднее значение периода по формуле

$$T_{\text{ср2}} = \frac{\tau_2}{N}. \quad (11)$$

4. Вычисляют значение ускорения свободного падения g_2 по формуле (1), которая в данном случае принимает вид

$$g_2 = g_1 \cdot \frac{2\tau_1 - \tau_2}{\tau_1}. \quad (12)$$

Источники информации:

1. Юзефович А.П., Огородова Л.В. Гравиметрия. - М.: Недра, 1980. - 320 с.
2. Джилавдари И.З. Влияние трения на точность маятникового гравиметра: Материалы Международной научно-практической конференции "Метрологическое обеспечение качества - 2000". - Минск, 2000.
3. Торге В. Гравиметрия. - М.: МИР, 1999. - 429 с.