

О.К. Абрамов
УСТРОЙСТВО ДЛЯ КАЛИБРОВКИ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ
В ПОЛЕ ЗЕМНОГО ТЯГОТЕНИЯ

Предложен способ калибровки акселерометров методом динамических наклонов в поле земного тяготения. Рассматриваются возможности реализации способа путем применения прецизионных аналоговых и цифровых калибровочных установок.

Ключевые слова: акселерометр, калибровка, кодирующее устройство, физический маятник, собственные колебания, измерение, чувствительность, погрешность

1. Введение. В инженерно-сейсмологических исследованиях для изучения характеристик колебаний грунта, оснований, сооружений и конструкций наибольшее применение получили сейсмоакселерометры с пределами измеряемых ускорений от 10^{-3} м/с^2 до нескольких g и в диапазоне измеряемых частот $0,1 \div 20 \text{ Гц}$ [1]. Для исследований по сейсмостойкости ВВ электрооборудования, которые получают развитие во всем мире [2,3], необходимы сейсмоакселерометры малых габаритов, пригодные для установки непосредственно на конструкциях высоковольтных аппаратов, с необходимыми метрологическими показателями в сейсмическом диапазоне измерений.

Аналогичные проблемы существуют и в других областях технических измерений, например виброметрия в машиностроении, измерения на транспорте и т. д. В связи с этим предлагаются многочисленные разработки акселерометров, различающиеся как по принципу действия, так и по возможностям метрологического обеспечения [4].

Потребности практических измерений в сейсмометрии должны быть обеспечены динамическим диапазоном измеряемых ускорений не менее чем в 120 дБ. Естественно, что одним акселерометром (с любыми современными преобразователями) обеспечить такой диапазон весьма сложно. Поэтому реально применяются как акселерометры больших ускорений $\ddot{X} \geq g$ (регистрация сильных движений [1]), так и высокочувствительные акселерометры для измерения $\ddot{X} \leq g$.

Следует отметить, что среди высокочувствительных акселерометров, как правило, различают приборы, предназначенные для измерения либо вертикальных \ddot{X}_A , либо горизонтальных \ddot{X}_H составляющих ускорения. Такие приборы характеризуются явно выра-

женной направленностью своей оси чувствительности.

Кроме того, акселерометры различаются по виду измеряемого ускорения, которое может быть постоянным (статическим) либо переменным во времени (колебательным). В связи с этим определяется АЧХ преобразователя и, следовательно, диапазон частот измеряемых ускорений. Вышеназванные особенности сейсмоакселерометров предопределяют и методы градуировки этих приборов.

2. О калибровке горизонтальных акселерометров. Для горизонтальных сейсмоакселерометров известны методы калибровки вращением в поле силы тяжести [1]. Сущность данного способа калибровки поясняется рисунком 1.

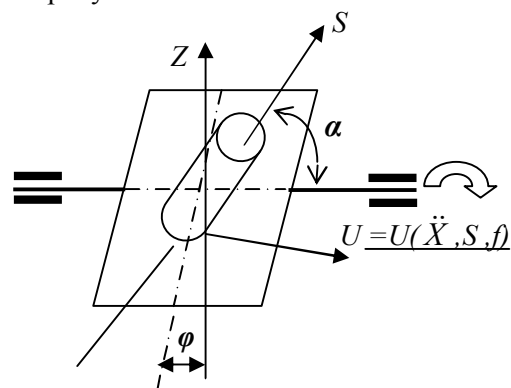


Рисунок 1 – Принцип калибровки акселерометров в поле силы тяжести

Поворот оси чувствительности S акселерометра на угол φ вокруг горизонтальной оси, составляющей некоторый постоянный угол α с осью чувствительности, равносильно воздействию на акселерометр калибровочного сигнала, соответствующего ускорению

$$\ddot{X} = g \cos \varphi \sin \alpha, \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести.

При равномерном вращении акселерометра с угловой скоростью ω измеряемое ускорение будет изменяться по закону

$$\ddot{X}(t) = g \sin \alpha \cos \omega t. \quad (2)$$

В частном случае, когда ось чувствительности акселерометра S перпендикулярна горизонтальной оси вращения (т. е. $\alpha = 90^\circ$), калибровочное ускорение имеет двойную амплитуду $\ddot{X}_{\max} = 2g$. Угловая скорость вращения ω определяется следующими условиями:

$$\begin{cases} \omega_{\min} \geq 2\pi f_{\min}; \\ \omega_{\max} \leq 2\pi f_{\max}, \text{ а также} \\ \omega_{\max} \leq \sqrt{\frac{F_{\text{ц}}}{mr}}, \end{cases}$$

где f_{\min} – нижняя граничная частота АЧХ;

f_{\max} – верхняя граничная частота АЧХ;

$F_{\text{ц}}$ – центробежная сила, приложенная к массе m преобразователя акселерометра на расстоянии r от центра тяжести инерционной массы m до оси вращения.

При вращении акселерометра в поле тяготения на выходе преобразователя формируется синусоидальный сигнал (рисунок 2) с двойной амплитудой напряжения

$$U = S \sin \alpha \cos 2\pi f t. \quad (3)$$

Изменяя частоту вращения по заданному закону, можно определить АЧХ измерительного канала $W=U(f)$. Вопросы нормирования метрологических характеристик сейсмоизмерительной аппаратуры рассмотрены в работе [5].

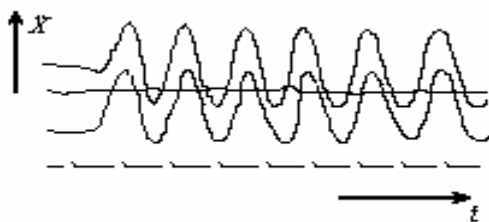


Рисунок 2 – Пример записи, полученной при калибровке на вращательном стенде горизонтальных составляющих акселерометра АПТ – 1. Чувствительность калибруемых каналов составила 7 мм/г при частоте вращения $f = 1,7$ Гц [1] (нижняя дорожка – секундная марка)

3. Метод динамических наклонов в поле земного тяготения. Применение силы земного тяготения для калибровки вертикальных сейсмометров встречает определенные трудности главным образом из-за того, что при вращениях и наклонах поперечная составляющая $\ddot{X}_{\dot{A}}$ калибровочного воздействия значительно превосходит вертикальную $\ddot{X}_{\ddot{A}}$. Тем не менее, в работе [6]

описан метод динамических наклонов в поле земной гравитации, который позволяет производить градуировку вертикальных акселерометров с АЧХ, отличной от нуля. При определенной модификации метода появляется возможность создания несложных установок для калибровки высокочувствительных сейсмоакселерометров с возможностью измерения как осевого (вертикального) коэффициента чувствительности K_B , так и поперечной составляющей K_G .

Гравитационные способы задания калибровочных воздействий основаны на принципе эквивалентности гравитационной и инерционной масс. Отклонение измерительной оси акселерометра на угол φ (рисунок 3) эквивалентно воздействию на неё ускорения $\ddot{X}_{\dot{A}} = g(1 - \cos \varphi)$, а в перпендикулярном к ней направлении – поперечного ускорения $\ddot{X}_{\ddot{A}} = g \sin \varphi$.

В случае, когда $f \ll f_{\max}$, акселерометр рассматривается как линейная безынерционная система, и тогда выходной сигнал его преобразователя находим из уравнения

$$u(t) = K_{\dot{A}} \ddot{X}_{\dot{A}}(t) + K_{\ddot{A}} \ddot{X}_{\ddot{A}} = gK_{\dot{A}}(1 - \cos \varphi(t)) + gK_{\ddot{A}} \sin \varphi(t), \quad (4)$$

где $\varphi(t) = \varphi_0 + A_0(\varphi) \cos 2\pi f t$; φ_0 – угол заданного отклонения; A_0 – амплитуда колебаний; f – частота колебаний.

Выражение (4) с достаточной степенью точности можно представить в виде

$$u(t) = C_0 + C_1 \cos 2\pi f t + C_2 \cos 4\pi f t, \quad (5)$$

$$\text{где } C_0 = g[K_{\dot{A}}(\frac{\varphi_0^2}{2} + \frac{A_0^2}{4}) + K_{\ddot{A}}\varphi_0];$$

$$C_1 = gA_0[K_{\dot{A}}\varphi_0 + K_{\ddot{A}}(1 - \frac{\varphi_0^2}{2})];$$

$$C_2 = \frac{1}{4}gA_0^2[K_{\dot{A}}(1 - \frac{\varphi_0^2}{2}) - K_{\ddot{A}}\varphi_0].$$

Задавая соответствующие значения A_0 и φ_0 , произведем измерение гармоник выходного напряжения C_1 и C_2 на частотах f и $2f$. Определяем коэффициенты осевой K_B и поперечной K_G чувствительности градуируемого акселерометра из выражений:

$$K_{\dot{A}} = (4C_2 + \varphi_0 A_0 C_1) / gA_0^2$$

$$\text{и } K_{\ddot{A}} = (A_0 C_1 - 4\varphi_0 C_2) / gA_0^2. \quad (6)$$

Изменяя φ_0 , A_0 и f , можно провести градуировку акселерометра в требуемых динамическом и частотном диапазонах входных калибровочных воздействий.

Практически установка для калибровки сейсмоакселерометров методом динамических наклонов может быть реализована на основе физического маятника с массой M и приведенной длиной l_s , совершающего свободные колебания вокруг оси вращения (рисунок 4). Период колебаний такого маятника определяется соотношением

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi \sqrt{\frac{l_s}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{gMd}}, \quad (7)$$

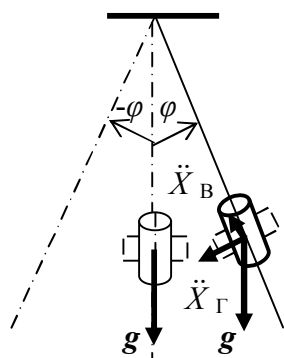


Рисунок 3 – Расчетная схема метода динамических наклонов

Таким образом, данный метод позволяет производить градуировку высокочувствительных вертикальных сейсмоакселерометров в широком диапазоне периодов. Поскольку при этом обеспечивается измерение и поперечной составляющей \ddot{X}_A , то возможна калибровка и горизонтальных акселерометров, которые устанавливаются на маятнике с ориентацией оси чувствительности перпендикулярно оси подвеса маятника, как это показано на рисунках 3 и 4 пунктиром.

4. Техническая реализация и метрологическое обеспечение. При практической реализации установки предполагалось, что калибровке будут подвержены сейсмоакселерометры, специально разработанные для инженерно-сейсмометрических наблюдений на энергообъектах [4].

Масса этих датчиков не превышает величины 0,5 кг, а габаритные размеры – не более 60 x 100 мм. Рабочий диапазон регистрируемых этими приборами частот лежит, как правило, в пределах от 0 до 20 – 30 Гц.

Важной метрологической особенностью акселерометров является наличие у них явно выраженной осевой чувствительности K_B .

где $J = J_0 + Md^2$ – момент инерции физического маятника; J_0 – момент инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести; $M = m_b + m_a$ (m_b – масса маятника вместе с балластным грузом; m_a – масса поверяемого акселерометра, укрепленного на маятнике).

Изменяя m_b , d , а также положение оси вращения, можно подобрать необходимую l_s и, следовательно, период колебаний T маятника.

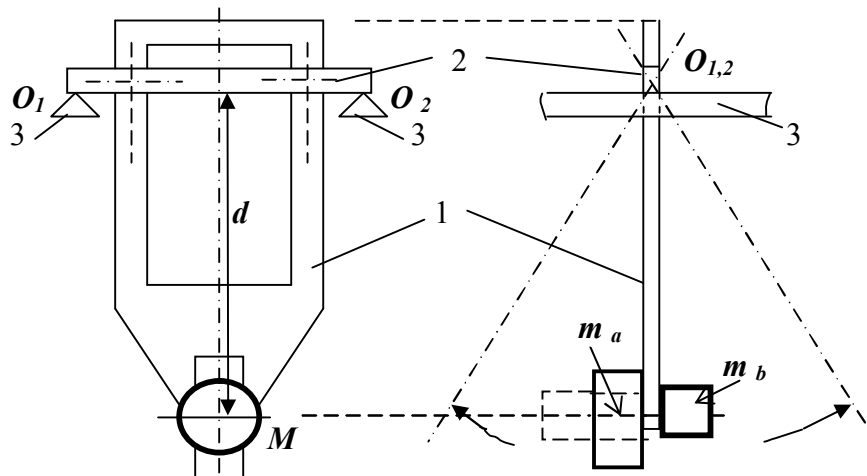


Рисунок 4 – Схема физического маятника для калибровки акселерометров

Присутствие поперечных составляющих K_T в общем случае снижает метрологические параметры акселерометра. Однако в реальных приборах присутствие этих составляющих неизбежно, а выходной сигнал определяется вышеприведенными соотношениями (4) – (6).

Более того, большинство акселерометров (например, с магнитоэлектрическими, индуктивными, пьезоэлектрическими и др. преобразователями) вообще теряют работоспособность при значительных отклонениях положения датчиков от направления оси чувствительности. Следовательно, по предлагаемой методике могут быть калиброваны преимущественно вертикальные высокочувствительные сейсμοприемники акселерометрического типа, допускающие изменение угла наклона измерительной оси к вертикали без нарушения работоспособности не более 0,2 рад и имеющие рабочий диапазон частот 10^{-2} – 10 Гц.

Блок-схема устройства приведена на рисунке 5. Основными функциональными узлами являются:

- система организации калибровочного воздействия;
- система измерения и контроля калибровочного воздействия;

- система измерения выходного сигнала с первичного преобразователя калибруемого акселерометра;
- интерфейс и ЭВМ (IBM совместимый ПК) с соответствующим программно-мате-

матическим обеспечением – т. е. система сбора и обработки поступающей метрологической информации.

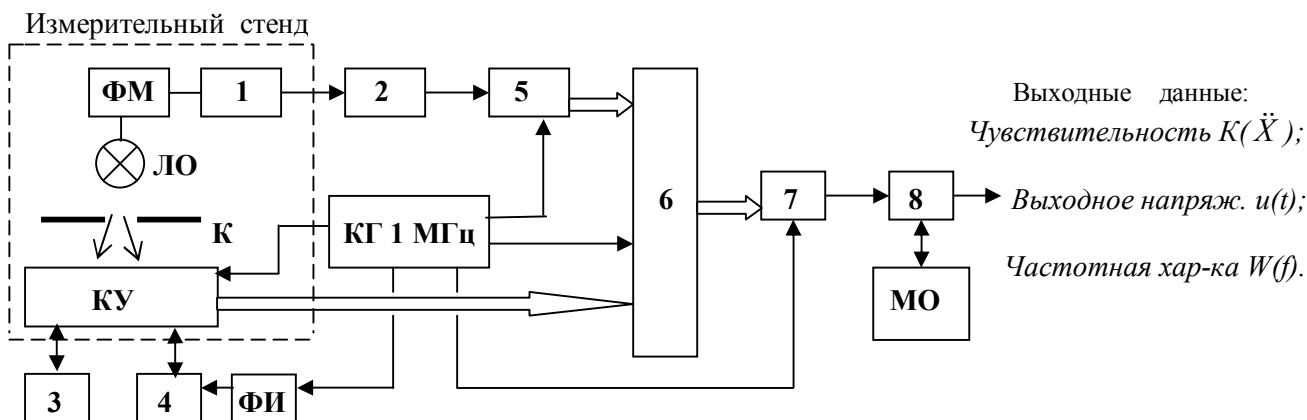


Рисунок 5 – Функциональная схема устройства для калибровки акселерометров методом динамических наклонов: ФМ – физический маятник; ЛО – источник света; К – щель коллиматора; КУ – 8-ми разрядное кодирующее устройство; КГ – кварцевый генератор; ФИ – формирователь счетных импульсов; МО – программно-математическое обеспечение сбора и обработки метрологической информации; 1 – калибруемый акселерометр; 2 – измерительный усилитель; 3 – блок измерения амплитуды маятника; 4 – блок измерения периода маятника; 5 – 8-ми разрядный аналого-цифровой преобразователь; 6 – цифровой мультиплексор; 7 – интерфейс (RS – 232); 8 – ЭВМ

Система, генерирующая на калибруемый акселерометр нормированное ускорение $\ddot{X}(g)$, состоит главным образом из маятника (поз.1 на рисунке 4), изготовленного из тонкой алюминиевой пластины толщиной 0,3 - 0,5 мм методом штамповки. Непосредственно на маятнике укрепляется испытуемый акселерометр и (по необходимости) балластный груз (см. формулу (7) и рисунок 4). Весьма малое затухание колебаний маятника обеспечивается специальной системой подвески. Она состоит из тонкой стальной пластины 2, заточенной книзу (так называемого “ножа”), которая опирается на две стальные призматические опоры 3. Таким образом, в точках подвески O_1 и O_2 (ось вращения ΦM) обеспечивается минимальное трение, что позволяет наблюдать достаточно интенсивные колебания маятника в течении сравнительно длительного промежутка времени. Это даёт возможность проводить необходимые измерения как параметров колебаний маятника (A_0 ; φ_0 ; T), так и выходного напряжения акселерометра $u(t)$ с достаточными метрологическими показателями (в соответствии с формулами (4) – (7)).

Параметры колебаний маятника могут быть измерены традиционными методами с применением обычного секундомера и соответствующих линейных мер. Однако присутствие дополнительных погрешностей субъек-

тивного характера весьма ограничивает метрологическое качество таких измерений. К тому же полностью исключить (или заметно уменьшить) ошибки оператора не всегда удается. Чтобы исключить субъективные погрешности, предлагается автоматизация измерения и контроля параметров калибровочного воздействия.

Основой системы измерения и контроля калибровочного воздействия является 8-ми разрядное кодирующее устройство (КУ).

Действие КУ происходит следующим образом. По внешней образующей, описываемой движением ΦM , располагаются ячейки фотоприемников, а непосредственно на нижнем конце колеблющегося маятника установлен источник света ЛО. С помощью специальной щели К луч формируется в виде узкой полоски света, которая при колебательных движениях маятника засвечивает одну из ячеек с фотоприемниками. Таким образом задается шаг квантования для измерения амплитуды качания $A_0 \Phi M$. По сигналу, поступающему от соответствующих ячеек, на выходе КУ формируется двоично-десятичный код с весами 8-4-2-1. Количество ячеек N и расстояние между соседними фотоприемниками δl_i зависят от максимальной амплитуды колебаний маятника ($A_{0 \max} \leq 0,2$ рад) и от точности определения угла φ .

Предлагаемое кодирующее устройство может рассматриваться как частный случай широко распространенных цифровых преобразователей угла (ЦПУ). Теория и практика построения ЦПУ с различными способами кодирования и примеры технической реализации таких устройств с применением различных преобразователей (в том числе фотоэлектрического типа) освещены в многочисленной технической литературе, например [7]. Отмечается, что полная погрешность преобразования в ЦПУ Δ_{Π} складывается из суммы погрешности квантования $\Delta_{\text{КВ}}$ и погрешности воспроизведения квантовых уровней $\Delta_{\text{У}}$:

$$\Delta_{\Pi} = \Delta_{\text{КВ}} + \Delta_{\text{У}}. \quad (8)$$

При квантовании угловых отклонений маятника погрешность квантования равна:

$$\Delta_{\text{КВ}} = i\Delta_{\varphi} - \varphi,$$

причем

$$\Delta_{\varphi} \left(i - \frac{1}{2} \right) \leq \varphi \leq \Delta_{\varphi} \left(i + \frac{1}{2} \right),$$

где Δ_{φ} – удвоенное наибольшее значение погрешности квантования угла φ .

Погрешность квантования угла может быть представлена как случайная величина $\theta(\varphi)$ и тогда можно определить статистические характеристики этой величины. Найдем математическое ожидание погрешности квантования:

$$\begin{aligned} M[\theta(\varphi)] &= \int_{-i\varphi}^{i\varphi} w(\varphi)\theta(\varphi)d\varphi = \\ &= \frac{\Delta_{\varphi}}{\pi} \sum_{i=1}^N \frac{(-1)^i}{i} \int_{-i\varphi}^{\varphi} w(\varphi) \frac{\sin 2\pi i}{\Delta_{\varphi}} \varphi d\varphi, \end{aligned}$$

где $w(\varphi)$ – плотность распределения величины φ .

При достаточно большом числе уровней квантования среднеквадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D[\varphi]} \geq \Delta_{\varphi},$$

где

$$D[\theta(\varphi)] = \int_{-i\varphi}^{i\varphi} w(\varphi)\theta^2(\varphi)d\varphi - \text{дисперсия}$$

погрешности квантования.

Погрешность воспроизведения уровней квантования $\Delta_{\text{У}}$ формируется под воздействием большого числа внутренних и внешних факторов. Возникновение тех или иных факторов связано с различными физическими явлениями и процессами, происходящими как внутри самого ЦПУ, так и во внешних (в том числе вспомогательных) устройствах измерительной установки [8]. Влиянием этих факторов объясняются основные составляющие погрешности $\Delta_{\text{У}}$:

инструментальная погрешность $\Delta_{\text{ИУ}}$ и *дополнительная* погрешность $\Delta_{\text{ДУ}}$.

Рассмотрим структурный состав погрешности $\Delta_{\text{ИУ}}$. В первом приближении она состоит из двух составляющих – *систематической* и *случайной*. Возникающие во время изготовления механических деталей и узлов неточности, шероховатости, неопределенности в выборе массогабаритных показателей, трудящихся соединений и т. д. порождают возникновение инструментальных погрешностей в механической части ЦПУ; методы установки фотоприемников, разброс их электрических и установочных параметров, выбор типа кодирующих ячеек, стыковка отдельных механических, электрических и электронных узлов устройства также стимулирует возникновение *систематических* инструментальных погрешностей, а изменение параметров в результате эксплуатации придает этим составляющим *переменный* (случайный) характер.

Рассмотрим состав дополнительной погрешности $\Delta_{\text{ДУ}}$. Составляющие этой погрешности возникают из-за обратимых изменений выходных сигналов ЦПУ под воздействием механических (вибрационных, ударных и др.), климатических (температурных, атмосферных и др.), электромагнитных и др. эксплуатационных факторов.

Следует отметить, что при воздействии климатических факторов в структурном составе дополнительной погрешности $\Delta_{\text{ДУ}}$ появляется переменный компонент $\bar{\Delta}_{\text{ДО}}$ в её систематической составляющей, а при воздействии механических факторов возникает переменный (нестационарный) компонент $\tilde{\Delta}_{\text{ДО}}$.

Анализ рассмотренных погрешностей (как инструментальных, так и дополнительных), проведенный в работе [7], показывает, что в реальных ЦПУ погрешности могут быть распределены не только по нормальному закону, но и по многим другим существенно более сложным законам. Знание сущности погрешностей, умение управлять их структурой и определять правильные количественные и качественные соотношения между входящими в нее составляющими (см. [8]), являются основными условиями обеспечения высоких метрологических качеств ЦПУ.

Система измерения выходного сигнала калибруемых акселерометров 1 состоит из специального нормирующего измерительного усилителя 2 и аналого-цифрового преобразователя 5, выполненного по типовой схеме на базе 8-ми разрядной БИС типа 8703 [9].

Измерительная информация, поступающая с кодирующего устройства КУ, с аналого-цифрового преобразователя 5 и др. блоков, поступает в ЭВМ через стандартный интерфейс RS-232. Все тактовые и синхронизирующие импульсы формируются от прецизионного кварцевого генератора с частотой резонанса 1 МГц ($\pm 10^{-6}$).

5. Заключение. Приведенные выше рассуждения о точностных (метрологических) показателях систем калибровки акселерометров в поле земного тяготения носят обобщенный характер, предоставляющие, тем не менее, возможности для создания реальных измерительных систем с приемлемыми метрологическими показателями. При этом необходимо учитывать следующее.

1. В качестве эталонной меры в предлагаемых устройствах используется сила тяжести на земной поверхности $P = m g$. Значение единицы ускорения g силы тяжести в различных точках земной поверхности различно. Для средних широт следует принимать $g = 9,7975 \text{ м/с}^2$.

2. Допускаемая относительная погрешность большинства реальных акселерометров, применяемых в виброметрии, инженерной сейсмометрии, на транспорте и т. д. имеет диапазон значений $\delta = \pm (1,0 \div 10,0) \%$ [1,4,5]. Этими значениями определяется величина задаваемой полной погрешности ЦПУ, при этом число уровней квантования (или количество ячеек фотоприемников) для каждого полупериода колебаний маятника составит

$$N = \frac{\varphi_{\max}}{\Delta\varphi} + 1 \approx \frac{A_{0\max}(\varphi)}{\Delta A_0(\varphi)} + 1.$$

Так, например, при заданных $\varphi_{\max} = 0,2$ рад и $\Delta\varphi = 5 \cdot 10^{-3}$ рад общее число ячеек составит $2N + 1 = 2 \cdot 36 + 1 = 72$. При этом полная относительная погрешность системы измерения калибровочного воздействия составит

$$\delta_{\Pi} \approx 0,05 \%$$

(при доверительной вероятности $P = 0,95$).

3. При определении АЧХ градуируемых акселерометров следует иметь в виду, что получение достаточно интенсивных амплитуд качания ФМ на частотах $f \geq 5 \div 10$ Гц весьма проблематично, поэтому экспериментальные измерения следует ограничить частотами от 10^{-1} до 2–5 Гц. Вычисления АЧХ для более высоких частот можно выполнить аналитически, используя соотношения (4)–(6). Это

тем более оправдано, поскольку большинство акселерометров имеет столообразную АЧХ вплоть до f_{\max} [1,4,5].

4. При определении чувствительности S акселерометров необходимо учитывать, что этот параметр является характеристикой *первичного преобразователя* (т. е. собственно чувствительного элемента). Большинство современных акселерометров могут иметь встроенные корректирующие цепи, цепи обратной связи, предварительные усилители и др. пассивные и активные элементы.

Библиографический список

1. Фремд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. – М.: Наука, 1978. – 176 с.
2. Duarte G., Eggert H. and all. Seismic qualification of modern test and calculation methods/ SIGRE Inf. Conf. Large High Voltage Elec. Syst. Paris, 1984, Par. No 23. p.7.
3. Абрамов О.К. Исследования сейсмостойкости электрооборудования подстанций // Энергетик. № 3. 1992. – С.18 – 20.
4. Абрамов О.К., Мельников А.Ю., Семенчиков В.Д. Перспективные датчики для инженерной сейсмометрии на энергообъектах / Экспресс-информ. Вып. №4. НПИЦентр, 1994. – 22 с.
5. Абрамов О.К. Нормирование метрологических характеристик и показателей надежности сейсмоизмерительной аппаратуры и геофизических измерительных сетей // Вестник РГРТА. Вып. 16. 2005. – С. 57 – 62.
6. Гросул А.Б., Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Применение метода динамических наклонов в поле силы тяжести для градуировки вертикальных сейсмоприемников акселерометрического типа // Сейсмические приборы. Вып. 21. М.: Наука, 1990. – С. 175 – 179.
7. Домрачев В.Г., Мейко Б.С. Цифровые преобразователи угла. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 328 с.
8. Абрамов О.К. О внутренних и внешних источниках погрешностей средств измерений // Вестник РГРТУ. Вып. 21, 2007. – С.31 – 39.
9. Рафикузаман М. Микропроцессоры и машинное проектирование микропроцессорных систем: Кн. 2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 288 с.