

В. А. ЧЕРНЫШЕВ

(Новосибирск)

ВЫБОР ПРИНЦИПА РЕГИСТРАЦИИ СМЕЩЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ МАССЫ В АКСЕЛЕРОМЕТРАХ

Рассматриваются принципы регистрации смещения сейсмической массы по положению и скорости. Показывается преимущество первого при высокоточных измерениях низкочастотных ускорений.

Повышение точности измерений было и остается одной из основных целей новых разработок в приборостроении и, в частности, в области теории и техники измерения ускорений. На определенном этапе таких разработок препятствием для дальнейшего повышения точности измерения ускорений являются тепловые шумы первичного преобразователя датчика. Для уменьшения их величины можно воспользоваться известными способами — понижением температуры корпуса датчика и его вакуумированием. Однако эти способы дороги и требуют усложнения конструкции датчика, увеличения его веса и габаритов. По условиям измерений подобные «усовершенствования» датчика не всегда могут быть возможными. В таких случаях важное значение для повышения точности измерений имеет используемый способ преобразования параметров движения сейсмической массы датчика в электрический сигнал. Существенное повышение точности измерения ускорений может быть достигнуто, как показано в данной работе, правильным выбором принципа регистрации смещения сейсмической массы акселерометра в зависимости от частотного диапазона измеряемых ускорений.

Существующие приборы сейсмического типа, предназначенные для измерения ускорений, можно подразделить на два класса, положив в основу классификации принцип регистрации смещения сейсмической массы. Смещение сейсмической массы регистрируется либо путем измерения ее положения относительно нуля прибора, либо путем измерения скорости ее относительного движения. Примером приборов первого класса может служить гравиметр [1] — датчик ускорения силы тяжести с фотоэлектрическим преобразователем перемещения сейсмической массы. Среди приборов второго класса наиболее типичным, особенно при измерении низкочастотных ускорений, является магнитоэлектрический датчик [2].

При измерении любого параметра движения сейсмической массы акселерометра — относительной скорости или относительного перемещения — на входе вторичного преобразователя, кроме полезного сигнала

ла, имеется шумовая составляющая, обусловленная тепловыми флюктуациями среды. Перемещение Y и скорость \dot{Y} , поступающие на вход вторичного преобразователя, в общем случае имеют вид:

$$Y = y + \delta; \quad \dot{Y} = \dot{y} + v, \quad (1)$$

где y и \dot{y} — перемещение и скорость относительного движения сейсмической массы, вызванного действием измеряемого ускорения;

δ и v — относительное смещение и относительная скорость движения сейсмической массы, обусловленного тепловыми флюктуациями среды.

Рассмотрим, к примеру, механическую линейную колебательную систему. Относительное смещение ее массы, вызванное измеряемым ускорением, определяется [3]

$$y = y_0 \cos(\omega t - \varphi), \quad (2)$$

где

$$y_0 = \frac{\ddot{\xi}_0}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + (2\beta_1 \omega_1 \omega)^2}};$$

$\ddot{\xi}_0$ — амплитуда измеряемого ускорения;

ω — круговая частота измеряемого ускорения;

$\omega_1 = \sqrt{\frac{C}{m}}$ — круговая частота свободных колебаний системы;

$\beta_1 = \frac{h}{2\sqrt{Cm}}$ — степень успокоения;

t — время;

φ — сдвиг фаз.

Из (2) скорость относительного движения массы равна

$$\dot{y} = -y_0 \omega \sin(\omega t - \varphi). \quad (3)$$

Из (2) и (3) для квадратов амплитудных значений y^2 и \dot{y}^2 имеем:

$$\begin{aligned} y^2 &= y_0^2; & \dot{y}^2 &= y_0^2 \omega^2, \\ \overline{y^2} &= \overline{y_0^2}; & \overline{\dot{y}^2} &= \overline{y_0^2 \omega^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для нахождения величины флюктуационного смещения сейсмической массы воспользуемся теоремой о равномерном распределении теории равновесных состояний [4] в следующей форме:

$$\frac{C \overline{\delta^2}}{2} = \frac{k T}{2}, \quad (5)$$

где C — жесткость пружины;

δ — флюктуация положения сейсмической массы;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Предположим, что статистическое среднее флюктуации равно $\bar{\delta}=0$; тогда из (5) величина среднего квадрата флюктуационного смещения определится выражением

$$\bar{\delta}^2 = \frac{k T}{C}. \quad (6)$$

Для нахождения величины флюктуации относительной скорости движения сейсмической массы теорему о равномерном распределении теории равновесных состояний запишем в виде

$$\frac{m \bar{v}^2}{2} = \frac{k T}{2}, \quad (7)$$

где m — масса;

v — скорость флюктуационного движения сейсмической массы.

Если статистическое среднее скорости флюктуационного движения равно $\bar{v}=0$, то из (7) получим выражение для величины среднего квадрата скорости флюктуационного движения сейсмической массы

$$\bar{v}^2 = \frac{k T}{m}. \quad (8)$$

Обозначим $\ddot{\xi}_{\text{пор } y}$ и $\ddot{\xi}_{\text{пор } \dot{y}}$ пороговые величины ускорения, измеряемого акселерометрами соответственно с регистрацией положения и скорости относительного движения сейсмической массы. Тогда из сопоставления (6) и (8) с соответствующими выражениями (4) и с учетом (2) и (3) получим:

$$\frac{(\ddot{\xi}_{\text{пор } y})^2}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + (2\beta_1 \omega_1 \omega)^2} = \frac{k T}{C}; \quad \frac{(\ddot{\xi}_{\text{пор } \dot{y}})^2 \omega^2}{(\omega^2 - \omega_1^2)^2 + (2\beta_1 \omega_1 \omega)^2} = \frac{k T}{m}, \quad (9)$$

откуда находим

$$\left(\frac{\ddot{\xi}_{\text{пор } y}}{\ddot{\xi}_{\text{пор } \dot{y}}} \right)^2 = \frac{\omega^2}{\omega_1^2}. \quad (10)$$

Окончательный результат запишем в форме

$$\frac{\ddot{\xi}_{\text{пор } y}}{\ddot{\xi}_{\text{пор } \dot{y}}} = \frac{\omega}{\omega_1}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что при измерении ускорений с частотами $\omega < \omega_1$ регистрация смещения сейсмической массы путем измерения ее положения относительно нуля обеспечивает более низкий порог чувствительности акселерометра, чем регистрация путем измерения скорости ее относительного движения.

Полученный результат можно объяснить следующим образом. При частотах измеряемого ускорения, меньших, чем собственная частота акселерометра, кинетическая энергия тепловых флюктуаций больше соответствующей кинетической энергии вынужденных колебаний сейсмической массы. Потенциальная же энергия тепловых флюктуаций в этом

частотном диапазоне меньше соответствующей потенциальной энергии пружины.

Полученный выше результат справедлив, когда внутренняя энергия сейсмической системы является постоянной величиной. В реальном случае при импульсе макроскопического движения \vec{P} системы относительно среды, не равном нулю, внутренняя энергия системы вообще не остается постоянной. Для анализа флюктуаций интересующих нас величин теория равновесных состояний может быть использована только как приближенная, а строгое решение правильного выбора принципа регистрации смещения сейсмической массы в зависимости от частотного диапазона измеряемого ускорения следует находить с привлечением теории неравновесных состояний.

ВЫВОД

Для равновесных систем минимальный порог чувствительности сейсмического прибора, предназначенного для измерения ускорений, зависит от принципа регистрации смещения массы и при измерении низкочастотных ускорений достигается при использовании регистрации путем измерения положения сейсмической массы относительно нуля прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Попов. Кварцевый гравиметр для морских наблюдений.— Труды Ин-та физики Земли АН СССР, вып. 8, М., 1959.
2. К. Б. Карандеев, Л. Д. Гик, В. Н. Некуряшев, И. Г. Митюхин, А. И. Пинчук, В. П. Репин, Ю. Н. Солодкин. Корректированные виброизмерительные приборы с магнитоэлектрическими датчиками.— Передовой научно-технический и производственный опыт, № 18—65—1072/66. М., ГОСИНТИ, 1965.
3. Л. Д. Гик, К. Б. Карандеев. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
4. Я. П. Терлецкий. Статистическая физика. М., изд-во «Высшая школа», 1966.

*Поступила в редакцию
14 июня 1966 г.*