

Л. Д. ГИК

(Новосибирск)

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГЕНЕРАТОРНЫХ ВИБРОДАТЧИКОВ

При измерении малых вибраций объектов, имеющих небольшую массу, сигнал вибродатчика оказывается незначительным. Поэтому потери должны быть минимальными, чтобы мощность, получаемая электроизмерительным прибором, превосходила шумы усилительных каскадов. В случаях, когда потребление энергии от исследуемого объекта в явном виде не лимитируется, по возможности полное использование ее все же остается желательным, так как приводит к упрощению электроизмерительного устройства. В связи с этим задача повышения чувствительности вибродатчиков является актуальной.

Генераторные вибродатчики не содержат внутренних источников питания, поэтому чувствительность их определяется энергией, потребляемой от объекта измерения, коэффициентом полезного действия, имеющим место при преобразовании механической энергии в электрическую, и согласованием параметров датчика и электрической цепи. Анализ возможности увеличения к. п. д. датчика в целях обеспечения необходимой чувствительности при минимальной нагрузке на объект измерения и составляет основное содержание данной статьи.

Современные датчики вибраций в подавляющем большинстве случаев строятся в виде сейсмических систем и преобразователей механических перемещений в электрический сигнал [1] (назначением первых является создание искусственной «опорной» точки, относительно которой производится измерение движения исследуемого объекта). Таким образом, с энергетической точки зрения сейсмический вибродатчик состоит из двух преобразователей — преобразователя энергии ускоренного механического движения

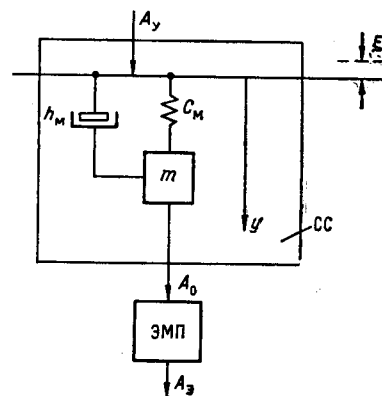


Рис. 1.

в энергию относительного движения сейсмической массы и преобразователя механической энергии относительного движения массы в электрическую. Блок-схема такого датчика показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: СС — сейсмическая система (C_M — жесткость; m — масса; h_M — демпфер сейсмической системы); ЭМП — электроме-

ханический преобразователь; A_y — энергия, сообщаемая датчику за счет ускоренного движения исследуемого объекта; A_o — энергия относительного движения сейсмической массы; A_s — электрическая энергия, снимаемая с выхода датчика. Действие корпуса датчика не учтено, так как он представляет бесполезную нагрузку на объект измерения и его масса должна быть по возможности минимальной.

Электромеханический преобразователь может воспринимать энергию в одной из двух форм — потенциальной или кинетической. В зависимости от этого свойства датчика оказываются существенно различными.

Сначала рассмотрим вариант датчиков, в которых используется потенциальная энергия. Как известно, потенциальная энергия пропорциональна квадрату относительного перемещения объекта;

$$A_{s(n)} = \frac{1}{2} C_s y^2. \quad (1)$$

Здесь C_s — коэффициент пропорциональности, имеющий смысл упругости.

При этом восприятие потенциальной энергии от сейсмической системы в форме (1) сопровождается обратной силовой реакцией, равной

$$F_s = -\frac{d}{dy} A_{s(n)} = C_s y. \quad (2)$$

Таким образом, применение электромеханического преобразователя, использующего потенциальную энергию сейсмической системы, эквивалентно введению в сейсмическую систему дополнительной пружины с жесткостью C_s . С учетом этой жесткости дифференциальное уравнение сейсмического датчика [2] может быть записано так:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + h_m \frac{dy}{dt} + (C_m + C_s) y = m \frac{d^2 \xi}{dt^2}. \quad (3)$$

Решение уравнения для случая, когда входное воздействие имеет форму синусоиды $\xi = \xi_0 \sin \omega_0 t$, может быть представлено [2]

$$y_0 = \frac{\xi_0}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - j 2\beta_0 \frac{\omega_0}{\omega}} = \xi_0 \nu. \quad (4)$$

Здесь $\omega_0 = \sqrt{\frac{C_m + C_s}{m}}$ — собственная частота;

$\beta_0 = \frac{h}{2 \sqrt{(C_m + C_s)m}}$ — степень успокоения;

$\nu = \frac{1}{1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 - j 2\beta_0 \frac{\omega_0}{\omega}}$ — комплексная частотная характеристика сейсмической системы.

Энергию, потребляемую датчиком от источника измеряемых вибраций, можно выразить

$$A_y = \int F_s d\xi = \int [(C_m + C_s) y + h \dot{y}] d\xi,$$

где F_z — суммарное силовое воздействие датчика на объект измерения.
Для рассматриваемого случая гармонического движения

$$y = \xi v \text{ и } \dot{y} = j \omega y = j \omega \xi v,$$

поэтому

$$A_y = [(C_m + C_s) + j \omega h] v \int \xi d\xi = \frac{1}{2} [(C_m + C_s) + j \omega h] y \xi. \quad (5)$$

Потери в сейсмической системе датчика можно выразить отношением энергии на выходе электромеханического преобразователя к энергии, затрачиваемой измеряемым объектом:

$$\eta_{п} = \frac{A_{э(n)}}{A_{y(n)}} = \frac{\frac{1}{2} C_s y^2}{\frac{1}{2} [(C_m + C_s) + j \omega h] y \xi} = \frac{C_s}{C_m + C_s + j \omega h} v. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает, что с энергетической точки зрения режим акселерометра не выгоден, так как модуль частотной характеристики v , которому пропорциональна выходная энергия сейсмической системы, оказывается при $\omega \ll \omega_0$ очень малой величиной

$$|v| \approx \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2.$$

В режиме виброметра потери также неизбежны, так как при введении значительного успокоения $\omega_0 h_m \approx C_m + C_s$, что совершенно обязательно в послерезонансном режиме, отношение $C_s : (C_s + C_m + j \omega h_m)$ оказывается малым.

Рассмотрим конкретный пример. Из преобразователей, воспринимающих потенциальную энергию, наиболее широко используются пьезоэлектрические. Конструкция типового варианта такого датчика показана на рис. 2. На исследуемом объекте ИО укреплен пьезоэлемент C , являющийся одновременно и электромеханическим преобразователем, и пружиной сейсмической системы; к нему крепится масса m . В дальнейшем будут приняты следующие обозначения: Δ — толщина пьезоэлемента; S — площадь поперечного сечения; ϵ — диэлектрическая проницаемость. Для определения к.п.д. $\eta_{п}$ необходимо найти отношение «механической» и «электрической» жесткости преобразователя.

Действующая на пьезоэлемент сила F_z уравнивается механической силой упругой деформации F_m и силой обратной электрической реакции F_s :

$$F_z = F_m + F_s.$$

Первая составляющая на основании закона Гука может быть записана следующим образом:

$$F_m = E \frac{S}{\Delta} y = C_m y, \quad (7)$$

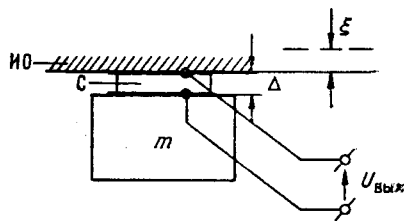


Рис. 2.

где E — модуль упругости пьезокристалла.
Вторая составляющая может быть выражена

$$F_3 = E \frac{S}{\Delta} y' = C_M y'. \quad (8)$$

Здесь y' — удлинение кристалла, которое имело бы место при наличии электрического и при отсутствии механического воздействий на него.
Для пьезопреобразователей

$$y' = aU, \quad (9)$$

где a — пьезомодуль;
 U — электрическое напряжение, подведенное к кристаллу и равное

$$U = \frac{q}{C} = \frac{a F_\Sigma}{\epsilon \frac{S}{\Delta}}. \quad (10)$$

Производя далее несложные преобразования с выражениями (7) — (10), находим

$$\frac{F_\Sigma}{y} = C_M + C_3 = \frac{C_M}{1 - \frac{\epsilon}{a^2 E}},$$

откуда

$$\frac{C_3}{C_M + C_3} = \frac{a^2 E}{\epsilon}. \quad (11)$$

Далее, необходимо учесть, что пьезодатчики всегда работают в до-резонансном режиме, а успокоение в них не вводится, поэтому выражение (6) упрощается:

$$\frac{A_3}{A_y} = \frac{C_3}{C_M + C_3} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 = \eta_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 = \frac{a^2 E}{\epsilon} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2. \quad (12)$$

Из закона сохранения энергии следует, что коэффициент η_0 , характеризующий качество материала пьезоэлемента, не может быть более единицы, поэтому степень приближения η_0 к единице определяет использование резерва мощности датчика. Величина этого коэффициента для трех материалов, нашедших применение в виброметрии, приведена в таблице.

Материал	$a, \text{к/н}$	$\epsilon, \text{ф/м}$	$E, \text{н/м}^2$	$\eta_0 = \frac{a^2 E}{\epsilon}$
Кварц	$2,1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$8 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^{-4}$
Сегнетова соль	$3 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$4,2 \cdot 10^{10}$	0,17
Титанат бария	$1 \cdot 10^{-10}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{11}$	0,01

Из таблицы видно, что удовлетворительными свойствами с точки зрения преобразования энергии обладает только сегнетова соль. Энергетические свойства этого материала теоретически могут быть улучшены всего лишь в 6 раз. Это значит, что напряжение датчика, пропорциональное квадратному корню из мощности, при использовании сегнетовой соли всего лишь в $\sqrt{6} \approx 2,5$ раза менее идеально возможного. Поэтому, если по условиям эксплуатации — в зависимости от температурного диапазона, влажности и т. д. — применение сегнетовой соли допустимо, то акселерометр на ее основе будет с энергетической точки зрения весьма близок к идеально возможному.

Однако сегнетова соль обладает плохими эксплуатационными характеристиками. В этом отношении значительно лучше титанат бария и кварц, хотя у них и очень мал коэффициент η_0 . Так, при использовании титаната бария выходное напряжение составляет $\sqrt{\eta_0} = 0,1$ от идеально возможного, а при использовании кварца всего лишь $\sqrt{\eta_0} = 0,026$. Поэтому совершенствование пьезоэлектрических свойств материалов еще имеет большие возможности.

Потери, обусловленные «акселерометрическим» режимом работы, у пьезодатчиков тоже весьма значительны. Так, ввиду малого успокоения верхняя граничная частота ω_b обычно составляет не более 0,3 от собственной частоты сейсмической системы ω_0 . Если нижняя граничная частота должна составлять 0,01 от ω_b , то потери, вызванные малой величиной $|v| = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2$, на средней частоте составляют уже 30^2 , а на нижней 300^2 . Это значит, что э. д. с. датчика при использовании титаната бария в качестве материала пьезоэлемента составляет лишь 0,3% на средней частоте и 0,03% на нижней граничной частоте от той величины, которая должна была бы иметь место при преобразовании механической энергии в электрическую без потерь. Таким образом, использование пьезоакселерометров в высокочувствительных виброизмерительных устройствах широкого диапазона частот не выгодно*.

Следует оговорить, что «потери» в разомкнутом (нагруженном на очень большое сопротивление) пьезоэлектрическом датчике являются условными. Датчик потребляет лишь реактивную мощность, т. е. в среднем он отдает исследуемому объекту столько же энергии, сколько и потребляет. Но периодическое «потребление» и «возврат» энергии искажают исследуемый процесс. Поэтому имеет смысл говорить о минимуме временно отбираемой энергии и, следовательно, о наиболее полном «использовании» ее.

Выражение (12) после подстановки в него значения энергии $A_y = \frac{m \xi^2}{2}$, затрачиваемой объектом измерения на приведение в движение акселерометра, можно привести к виду

$$m = A_y \frac{\epsilon}{a^2 E} \omega_0^2 \frac{1}{\xi^2}, \quad (13)$$

который можно рассматривать как исходный для проектирования оптимального с энергетической точки зрения пьезоэлектрического акселерометра. В самом деле, из (13) можно непосредственно получить ответ о минимально необходимой массе датчика m , обеспечивающей получение

* Если же чувствительность не является решающим фактором, то применение пьезоакселерометров может оказаться оптимальным благодаря другим положительным качествам этих датчиков, что часто и имеет место.

заданной электрической энергии $A_э$ для избранного материала пьезоэлемента $\frac{\varepsilon}{a^2 E}$ и для заданного диапазона измеряемого параметра как по амплитуде ξ , так и по частоте (верхняя граница частотного диапазона обычно не должна превышать $\frac{1}{3} \omega_0$).

Зная минимально возможную величину массы m , следует определить соответствующую жесткость пьезоэлемента $C = \omega_0^2 m$, которая определяет оптимальное отношение площади сечения и толщины кристалла $\frac{S}{\Delta} = \frac{1}{E} C$. Выбор из конструктивных соображений S или Δ позволяет однозначно установить все остальные параметры датчика.

Теперь перейдем к рассмотрению варианта датчиков, в которых используется кинетическая энергия сейсмической системы. Здесь удобнее пользоваться выражениями для мощности. Так, мощность, получаемая от датчика, может быть выражена

$$P_{э(к)} = h_э \dot{y}^2, \quad (14)$$

где h — коэффициент пропорциональности, имеющий смысл коэффициента демпфирования;

\dot{y} — скорость относительного движения массы.

Потребление мощности от датчика вызывает обратную силовую реакцию на сейсмическую массу, равную

$$F_э = \frac{P_{э(к)}}{\dot{y}} = h_э \dot{y}.$$

С учетом этой силы уравнение движения сейсмической системы может иметь вид

$$m \frac{d\dot{y}}{dt} + (h_m + h_э) \dot{y} + C \int \dot{y} dt = m \frac{d\xi}{dt}.$$

При этом мощность, затрачиваемая исследуемым объектом на приведение в движение сейсмической массы, равна

$$P_{y(к)} = F_\Sigma \dot{\xi} = [(h_m + h_э) \dot{y} + C y] \dot{\xi}.$$

Для гармонического движения можно записать:

$$\dot{y} = \xi v \quad \text{и} \quad y = \frac{\dot{y}}{j \omega}.$$

Учитывая это, отношение выходной мощности ко входной — к. п. д. датчика — можно выразить

$$\eta_k = \frac{P_{э(к)}}{P_{y(к)}} = \frac{h_э}{h_m + h_э + \frac{C}{j \omega}} v. \quad (15)$$

Из (15) следует, что при

$$h_э > h_m \quad (16)$$

и

$$h_э > \frac{C}{\omega} \quad (17)$$

к. п. д. датчика η_k имеет предельно возможную величину, близкую к единице. Выполнение условия (16) обычно не вызывает затруднений, так как в магнитоэлектрических датчиках механическое успокоение h_m незначительно. Условие (17) автоматически выполняется в режиме виброметра (в диапазоне частот выше резонанса). Отсюда следует вывод, что сейсмические вибродатчики, имеющие электромеханические преобразователи, в которых используется кинетическая энергия сейсмической системы, в послерезонансной области частот с энергетической точки зрения близки к идеальным. Поэтому в режиме виброметра датчики с использованием кинетической энергии имеют преимущество перед датчиками, использующими потенциальную энергию. Однако в режиме акселерометра ($\omega < \omega_0$) первые теряют преимущество, так как в дорезонансной частотной области их к. п. д. резко падает. В самом деле, при $\omega < \omega_0$ выражение (5) может быть упрощено:

$$\eta_k = j \frac{h}{C} \frac{\omega^3}{\omega_0^2} = j 2\beta_0 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^3, \quad (18)$$

т. е. потери энергии в дорезонансной зоне у этих датчиков пропорциональны третьей степени частоты, в то время как у датчиков, основанных на использовании потенциальной энергии, потери возрастали менее интенсивно — пропорционально второй степени частоты.

В качестве примера датчиков, использующих кинетическую энергию сейсмической системы, рассмотрим систему с магнитоэлектрическим преобразователем. Конструктивная схема датчика показана на рис. 3, где приняты обозначения: K — катушка; R_i — ее внутреннее сопротивление; R_H — сопротивление внешней нагрузки; C — пружина. Роль сейсмической массы здесь играет постоянный магнит; катушка жестко связана с объектом измерения. Такой выбор не случаен. Масса, жестко связанная с объектом (в данном случае катушка и корпус), является бесполезным «потребителем» кинетической энергии, поэтому желательно конструировать датчик так, чтобы эта масса была по возможности минимальной. Поскольку в магнитоэлектрических преобразователях масса катушки намного меньше массы магнитной системы, то с энергетической точки зрения к исследуемому объекту выгоднее жестко присоединять именно ее.

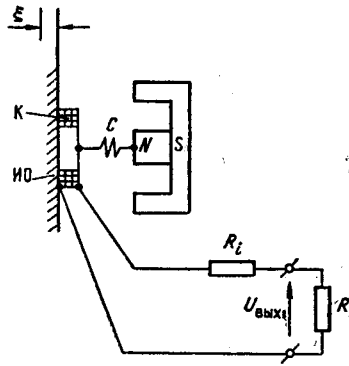


Рис. 3.

Коэффициент демпфирования, обусловленный действием электро-механического преобразователя, определяется выражением

$$h_3 = \frac{F_3}{y} = \frac{1}{y} B l I = \frac{(B l)^2}{R_i + R_H}.$$

Общеизвестным условием отдачи максимальной мощности электрическим генератором является равенство $R_H = R_i$. Для этого случая

$$h_3 = \frac{(B l)^2}{2R_i}. \quad (19)$$

Поскольку магнитоэлектрические датчики всегда выполняются в виде катушки, расположенной в зазоре магнитопровода, то (19) можно преобразовать, подставив в него

$$l = l_0 n \quad \text{и} \quad R_l = \rho \frac{l_0 n}{S_0}.$$

Здесь l_0 — длина одного витка;
 S_0 — площадь поперечного сечения провода;
 n — число витков;
 ρ — удельное сопротивление проводника.
 В результате подстановки имеем

$$h_3 = \frac{1}{2} \frac{B_s^2 V_3}{\rho}, \quad (20)$$

где V_3 — объем воздушного зазора;
 B_s — индукция в нем.

Наконец, можно выразить магнитную индукцию как функцию параметров магнита и магнитопровода. Для этого, аппроксимируя кривую размагничивания эллипсом

$$B^2 + \left(\frac{B_s}{H_c} H \right)^2 = B_s^2,$$

можно привести (20) к виду

$$h_3 = \frac{1}{2\rho} \frac{\mu_0 B_s^2 R_3}{\frac{1}{S_m^2} + \left(\frac{B_s}{H_c} \frac{1}{l_m} R_3 \right)^2}. \quad (21)$$

Здесь B_s , H_c , S_m , l_m — соответственно остаточная индукция, коэрцитивная сила, площадь сечения и длина магнита;

R_3 — магнитное сопротивление зазора.

Оптimum выражения (21) будет иметь место при $\frac{\partial h_3}{\partial R_3} = 0$. Выполняя дифференцирование, находим

$$R_3 (\text{опт}) = \frac{H_3}{R_s} \frac{l_m}{S_m}.$$

Подставляя это значение последовательно в (20) и (14), получаем

$$F_3 = \frac{\mu_0}{4} B_s H_c V_m \frac{1}{\rho} y^2. \quad (22)$$

Из (22) следует, что при названных выше оптимальных значениях параметров датчика выходная мощность пропорциональна удельной магнитной энергии $B_s H_c$, объему постоянного магнита V_m и обратно пропорциональна удельной проводимости провода катушки ρ . Поскольку $B_s H_c$ и $\frac{1}{\rho}$ определяются свойствами имеющихся материалов и не могут выбираться большими, чем величины, достигнутые техникой электрических материалов, то единственной возможностью конструктора

обеспечить требуемую мощность P_y на выходе датчика при заданных параметрах вибрации ξ является выбор соответствующих размеров магнита V_m .

Выражение (20) по аналогии с (13) можно представить в виде

$$m = V \gamma = 4P_y \rho \frac{\gamma}{B_s H_c} \frac{1}{\xi^2}. \quad (23)$$

Здесь m — масса, а γ — плотность магнита (для упрощения вся магнитная система представляется образованной только постоянным магнитом).

Используя (23), можно определить минимально возможную массу магнитоэлектрического датчика m как функцию требуемой электрической мощности при заданных вибрациях для имеющихся магнитных материалов. Однако есть существенная разница между ролями, которые играет масса m в датчике рис. 2 и в датчике рис. 3. В первом случае механическая нагрузка на объект измерения непосредственно пропорциональна массе. Во втором случае масса определяет только статическую нагрузку на объект (точнее, нагрузку в частотном диапазоне акселерометра). В режиме виброметра имеет место динамическая нагрузка

$$F_y = \frac{P_y}{y} = \frac{\mu_0}{4} B_s H_c V_m \frac{1}{\rho} y, \quad (24)$$

которая, как видно из (24), определяется полной энергией магнита $B_s H_c V$ и не зависит от массы последнего.

Поскольку, как уже было указано, в режиме виброметра к. п. д. магнитоэлектрических датчиков близок к единице, то выражение (22) определяет одновременно и мощность, потребляемую от объекта измерения P_y . Поэтому, если мощность P_y является минимальной для нормальной работы электрической схемы, то датчик реализует предельные возможности измерения.

Таким образом, вибродатчики с преобразователями, использующими кинетическую энергию сейсмической системы, например магнитоэлектрические, в режиме виброметра могут быть с энергетической точки зрения близкими к идеальным, т. е. они могут работать без потери мощности, преобразовывая энергию, отбираемую от объекта измерения, в электрическую. Датчики, имеющие преобразователи, использующие потенциальную энергию, например пьезоэлектрические, отдают в цепь измерения лишь часть потребляемой энергии, доля которой оказывается особенно малой в режиме акселерометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иорш. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
2. Л. Д. Гик. Измерение ускорений. Новосибирск, «Наука», 1966.

Поступила в редакцию
12 января 1967 г.