

$$S_{Z_i}^{Y_{\text{пер}}} = -\frac{Z_i}{Z_{\text{кз,кз}}}; \quad S_{Y_k}^{Y_{\text{пер}}} = -\frac{Y_k}{Y_{\text{кз,кз}}}; \quad (10)$$

$$S_{Z_i}^{Z_{\text{вх}}} = \frac{Z_i}{Z_{\text{кз,х.х}}} - \frac{Z_i}{Z_{\text{х.х,х.х}}}; \quad S_{Y_k}^{Z_{\text{вх}}} = \frac{Y_k}{Y_{\text{кз,х.х}}} - \frac{Y_k}{Y_{\text{х.х,х.х}}}; \quad (11)$$

$$S_{Z_i}^{Y_{\text{вх}}} = \frac{Z_i}{Z_{\text{х.х,кз}}} - \frac{Z_i}{Z_{\text{кз,кз}}}; \quad S_{Y_k}^{Y_{\text{вх}}} = \frac{Y_k}{Y_{\text{х.х,кз}}} - \frac{Y_k}{Y_{\text{кз,кз}}}. \quad (12)$$

В (8) — (12)  $Z_{\text{х.х,кз}}$  — это сопротивление со стороны точек  $a-a$  при разомкнутых зажимах 1—1 и короткозамкнутых зажимах 2—2;  $Y_{\text{х.х,кз}}$  — проводимость между точками  $b-b$  в том же режиме входных и выходных зажимов;  $Z_{\text{х.х,х.х}}$  — сопротивление со стороны точек  $a-a$  при холостом ходе на входе и выходе цепи;  $Y_{\text{х.х,х.х}}$  — проводимость между точками  $b-b$  в том же режиме;  $Z_{\text{кз,кз}}$  — сопротивление со стороны точек  $a-a$  при коротком замыкании на входе и выходе цепи;  $Y_{\text{кз,кз}}$  — проводимость между точками  $b-b$  в том же режиме.

Полученные соотношения (4), (5) и (8) — (12) указывают метод измерения чувствительности функции лестничной цепи к изменению любого ее элемента. При этом для определения чувствительности передаточных функций необходимо одно измерение входного иммитанса в определенном режиме цепи, а для определения чувствительности входной функции цепи требуются два измерения входных иммитансов. Отметим, что предложенный в [4] метод измерения чувствительности передаточной функции требует двух измерений передаточных функций в различных режимах на концах цепи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. В. Зе ля х. Основы общей теории линейных электрических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1951.
2. Г. Б о д е. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью. М., Изд-во иностр. лит., 1948.
3. Э. В. Зе ля х. К теории рабочего затухания. — Электросвязь, 1941, № 1.
4. М. Л. Б ы х о в с к и й. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М., Изд-во АН СССР, 1958.

Поступила в редакцию  
1 октября 1970 г.

УДК 531.768.068.9

А. Е. СИНЕЛЬНИКОВ  
(Ленинград)

#### ОБРАЗЦОВЫЙ АКСЕЛЕРОМЕТР

Для передачи размера единицы измерения от высшего звена поверочной схемы к образцовым и рабочим установкам, а также для проверки рабочих средств измерения методом сличения используются образцовые акселерометры. Эти приборы наряду с высокой точностью измерения в статическом режиме должны обладать хорошими динамическими свойствами, т. е. постоянным уровнем амплитудно-частотной характеристики и линейностью фазочастотной характеристики при высокой стабильности обеих характеристик.

Для измерения постоянных и низкочастотных ускорений применяются различные типы акселерометров, однако известные принципы не могут быть использованы при построении образцового акселерометра. Так, простейшие одномассовые акселерометры [1]

не обладают достаточными точностью и частотным диапазоном измерений. Лучшими характеристиками обладают акселерометры компенсационного типа [2], но их частотный диапазон недостаточно широк; пьезоэлектрические акселерометры имеют значительный частотный диапазон, но не отличаются высокой точностью и не измеряют постоянные ускорения.

Ниже на примере маятникового прибора рассматривается принцип действия и теория акселерометра [3], удовлетворяющего предъявляемым к образцовым акселерометрам требованиям. Принципиальная схема акселерометра приведена на рис. 1. Прибор состоит из подвижной системы, на которой укреплены катушки преобразователя угла 1, преобразователя скорости поворота 2 и преобразователя момента 3. Подвижная система выполняется неуравновешенной, вследствие чего реагирует на ускорение, действующее вдоль оси  $x$ . При повороте подвижной системы вокруг оси  $OO$  в результате действия измеряемого ускорения с катушки преобразователя угла 1 (в рассматриваемом случае индуктивного преобразователя) сигнал поступает на усилитель  $Y_1$  и после усиления и выпрямления фазочувствительным выпрямителем ФВ в катушку обратной связи магнитоэлектрического преобразователя момента 3. На эту же катушку подается и усиленное усилителем  $Y_2$  напряжение с выхода катушки преобразователя угловой скорости 2. Как будет показано далее, при соответствующем включении катушки преобразователя 3 величина тока в ней строго пропорциональна значению измеряемого ускорения.

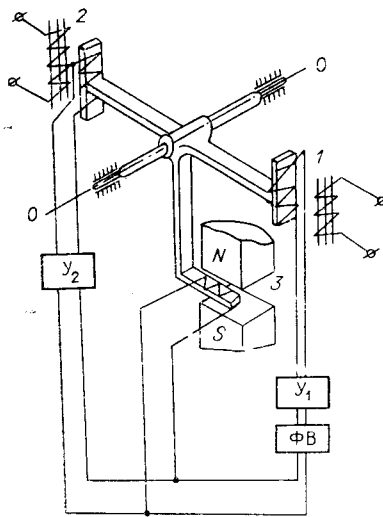


Рис. 1.

Структурная схема прибора приведена на рис. 2. На ней приняты обозначения:  $a$  — измеряемое ускорение;  $m$  — масса приведенного математического маятника;  $r_{вх}$  — плечо приведенного математического маятника;  $F_{вх}, F_{пр}$  — действующая и противодействующая силы;  $M_{вх}, M_{пр}, \Delta M$  — действующий, противодействующий и разностный моменты;  $r_{пр}$  — плечо действия противодействующей силы;  $I$  — момент инерции подвижной системы;  $h$  — коэффициент демпфирования;  $M_0$  — противодействующий момент токоподводов;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\varphi$  — угол поворота подвижной системы;  $K_1, K_2$  — коэффициенты преобразования преобразователей 1 и 2;  $K_y, K_{yg}$  — коэффициенты усиления усилителей  $Y_1$  и  $Y_2$ ;  $U_y, U_g$  — напряжения на выходе катушек преобразователей 1 и 2;  $U_y, U_{yg}$  — напряжения на выходе усилителей  $Y_1$  и  $Y_2$ ;  $K_{п}$  — коэффициент противо-э. д. с.;  $L, R$  — индуктивность и сопротивление цепи катушки обратной связи;  $i_{о.с.}$  — ток в цепи катушки обратной связи;  $B, l$  — индукция в зазоре и длина провода катушки обратной связи преобразователя 3.

Следуя структурной схеме (см. рис. 2), составим систему уравнений для прибора в операторной форме:

$$(Ip^2 + hp + M_0 + mgr_{вх})\varphi = mr_{вх}a - Blr_{пр}i_{о.с.}; \quad (1)$$

$$(Lp + R)i_{о.с.} = (K_1K_y + K_2K_{yg}p + K_{п}p)\varphi.$$

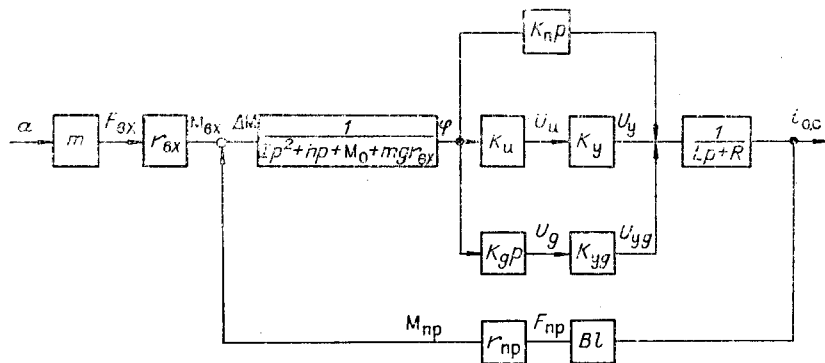


Рис. 2.

В статическом режиме

$$(i_{o.c})_{ст} = \frac{m}{Bl} \frac{r_{вх}}{r_{пр}} a. \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что все коэффициенты, входящие в выражение (2), являются величинами постоянными. Это обуславливает высокую точность прибора. Нормированная передаточная функция прибора:

$$W_H(p) = \frac{\frac{i_{o.c}}{a}}{\left(\frac{i_{o.c}}{a}\right)_{ст}} = \frac{\omega_0^2 + 2np}{p^2 + 2np + \omega_0^2}, \quad (3)$$

где

$$n = \frac{Blr_{пр} K_g K_{yg}}{2IR}; \quad \omega_0^2 = \frac{Blr_{пр} K_H K_y}{IR}. \quad (4)$$

Функция (3) получена при условиях:

$$Blr_{пр} K_g K_{yg} \gg hR + Blr_{пр} K_H; \quad Blr_{пр} K_H K_y \gg M_0 R + mgr_{вх} R, \quad (5)$$

которые в компенсационных акселерометрах, как правило, выполняются. Комплексная амплитудно-частотная характеристика:

$$A_H(j\omega) = \frac{\omega_0^2 + j2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 + j2n\omega}. \quad (6)$$

Нормированная амплитудно-частотная характеристика (коэффициент динамичности)

$$\gamma_A(z) = \sqrt{\frac{1 + 4\beta^2 z^2}{(1 - z^2)^2 + 4\beta^2 z^2}}, \quad (7)$$

а фазочастотная характеристика

$$\varphi = -\arctg \frac{2\beta z^3}{1 + z^2(4\beta^2 - 1)}, \quad (8)$$

где

$$\beta = \frac{n}{\omega_0}; \quad z = \frac{\omega}{\omega_0}.$$

Семейство амплитудно-частотных характеристик для различных степеней успокоения  $\beta$  приведено на рис. 3, семейство фазочастотных характеристик — на рис. 4. Из кривых видно, что при большом значении степени успокоения  $\beta$  уровень амплитудно-частотной характеристики в широком диапазоне частот близок к единице. Верхняя

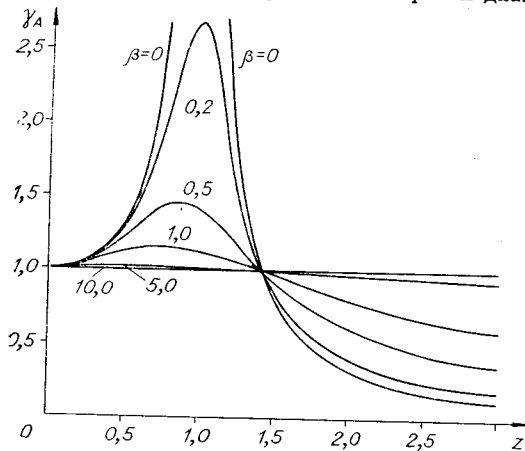


Рис. 3.

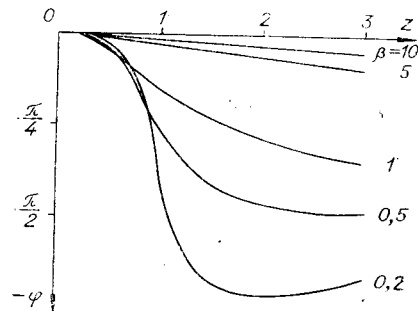


Рис. 4.

граница частотного диапазона подобного прибора ограничена не рассматриваемыми в статье факторами: резонансом отдельных элементов прибора, ограниченной жесткостью системы крепления и т. п. На рис. 5 приведены амплитудно-частотные характеристики рассматриваемого прибора при  $\beta=10$  и используемых в настоящее время акселерометров при том же значении  $\omega_0$ , но при  $\beta=0,6$ . Сопоставление этих характеристик подтверждает преимущества изучаемого прибора.

Так как степень успокоения

$$\beta = \frac{n}{\omega_0} = \frac{K_g K_{yg}}{2} \sqrt{\frac{B l r_{\text{пр}}}{T R K_n K_y}}, \quad (9)$$

то выбором коэффициента усиления  $K_{yg}$  можно достичь практически любого значения.

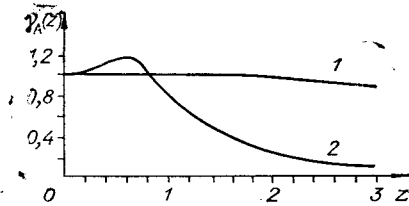


Рис. 5.

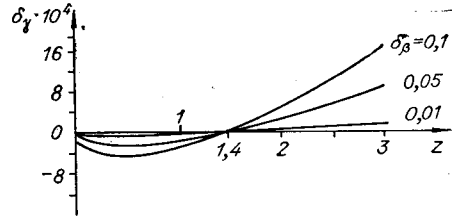


Рис. 6.

Из рис. 4 видно, что другим достоинством рассматриваемого прибора является линейная зависимость сдвига по фазе  $\phi$  от частоты при достаточно больших значениях  $\beta$ .

Оценим влияние стабильности степени успокоения  $\beta$  на погрешность амплитудно-частотной характеристики.

Из (7) находим

$$\delta_\gamma = \frac{4\beta^2 z^4 (z^2 - 2)}{(1 + 4\beta^2 z^2) [(1 - z^2)^2 + 4\beta^2 z^2]} \delta_\beta, \quad (10)$$

где  $\delta_\gamma = \frac{\Delta \gamma_A}{\gamma_A}$ ;  $\delta_\beta = \frac{\Delta \beta}{\beta}$ . Зависимость  $\delta_\gamma$  в функции от  $z$  для  $\beta=10$  и различных значений  $\delta_\beta$  приведена на рис. 6, из которого видно, что даже значительные колебания степени успокоения не приводят к существенным нестабильностям амплитудно-частотной характеристики.

При выводе (6) не была учтена постоянная времени цепи катушки обратной связи; в общем же случае формула имеет вид

$$\gamma_{AT} = \sqrt{\frac{1 + 4\beta^2 z^2}{(1 - z^2)^2 + 4\beta^2 z^2 \left(1 - \frac{\lambda}{2\beta} z\right)}}, \quad (11)$$

где

$$\lambda = T\omega; \quad T = \frac{L}{R}.$$

Проведенное исследование показывает, что рассмотренный принцип может быть использован при построении образцового акселерометра.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. И. Иорш. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
2. М. М. Фетисов. Новые автоматические компенсационные приборы для измерения неэлектрических величин. Л., Госэнергоиздат, 1960.
3. А. Е. Синельников. Маятниковый акселерометр. Авторское свидетельство № 139088.— БИ, 1961, № 12.

Поступила в редакцию  
18 июня 1970 г.,  
окончательный вариант —  
3 декабря 1970 г.