

В. Д. МАЗИН

(Ленинград)

### ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ КЛАССИФИКАЦИИ КОМПЕНСАЦИОННЫХ ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ ИНЕРЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ И ИХ СВОЙСТВАХ

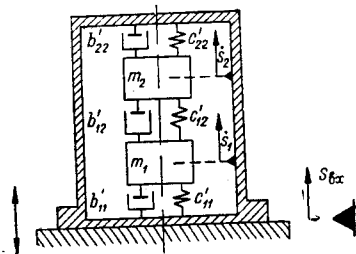
Современная электроизмерительная техника широко использует компенсационный метод измерений, дающий возможность существенно повысить точность и расширить частотный диапазон. Вместе с тем в приборах для измерения неэлектрических величин этот метод находит еще ограниченное применение, что объясняется отсутствием технологичных в изготовлении и надежных в эксплуатации датчиков. Это, в свою очередь, объясняется относительной сложностью конструкции последних, так как в них в этом случае совмещаются преобразователь неэлектрической величины в электрическую (так называемый преобразователь недокомпенсации [1]) и обратный преобразователь. Последнее, однако, не означает неприменимости компенсационного метода при измерении неэлектрических величин, а свидетельствует лишь о существовании довольно обширной области измерительной техники, которая еще, к сожалению, мало развита.

Данная работа представляет собой попытку рассмотреть с общих позиций возможные пути построения компенсационных виброизмерительных приборов и оценить их свойства. При этом имеются в виду приборы инерционного действия (ИД) [2].

Задачу теоретического исследования вибродатчика в общем случае можно сформулировать так [3]: в механической системе с  $n$  степенями свободы требуется найти такие координаты, которые при соответствующем выборе параметров системы в заданном частотном диапазоне были бы пропорциональны измеряемому параметрам вибрации. Построение вибродатчиков с числом степеней свободы, большим двух, весьма затруднительно в конструктивном отношении, и трудно ожидать от них эксплуатационной надежности. Поэтому мы ограничимся рассмотрением одно- и двухстепенных систем.

Систему с одной степенью свободы можно считать частным случаем двухстепенной системы. Поэтому схему двухстепенного вибродатчика (см. рисунок) можно рассматривать как общую для числа степеней свободы, меньшего трех. На рисунке  $m_1$  и  $m_2$  — массы двух подвижных частей;  $b_{11}$ ,  $b_{12}$  и  $b_{22}$  — коэффициенты успокоения;  $c_{11}$ ,  $c_{12}$  и  $c_{22}$  — жесткости упругих элементов;  $s_1$  и  $s_2$  — перемещения подвижных частей

датчика относительно корпуса. Конструкция датчика может быть как с линейным, так и с угловым перемещением подвижных частей — в координаты из следующих четырех:  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_1 + s_2$ ;  $s_1 - s_2$ . Таким образом, становится ясным, что существует несколько способов введения обратной связи, отличающихся в зависимости от того, какая координата поддерживается с помощью обратной связи неизменной и куда приложена компенсирующая сила. Если, например, поддерживается  $s_1 \cong 0$ , а компенсирующая сила приложена к  $m_2$  со стороны корпуса, то это означает, что имеется преобразователь, превращающий изменение  $s_1$  в электрическую величину, и обратный преобразователь электрической величины в силу, одна часть которого находится на корпусе, а другая — на  $m_2$ . Сила воздействует на  $m_2$  так, чтобы  $s_1$  оставалось неизменным. Компенсирующую силу можно выбрать пропорциональной не перемещению, а скорости или ускорению. В общем случае она может быть и более сложной функцией перемещения (такие случаи здесь не рассматриваются).



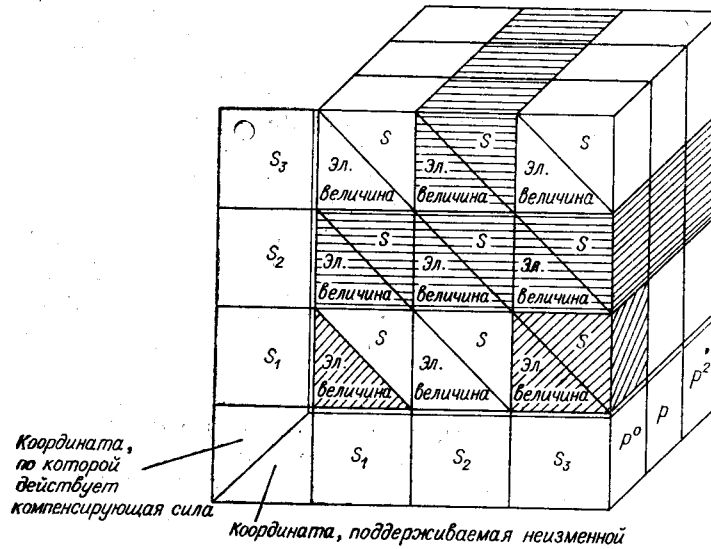
В результате для каждого способа введения обратной связи должны быть найдены координаты, пропорциональные параметрам измеряемой вибрации. Их можно назвать отсчетными координатами [3]. В каждом случае имеет смысл интересоваться координатами двоякого рода: электрической величиной, определяющей компенсирующую силу, и одной из пространственных координат, определяющих положение подвижных частей датчика (кроме той, которая поддерживается неизменной). Таким образом, налицо четыре признака, по которым следует классифицировать компенсационные виброизмерительные приборы ИД: 1) координата, поддерживаемая неизменной; 2) координата, по которой действует компенсирующая сила; 3) номер производной от перемещения, которой пропорциональна компенсирующая сила; 4) отсчетная координата.

Обозначим  $S_1 - S_2 = S_3$ , где  $S_1$  и  $S_2$  — перемещения подвижных частей относительно корпуса датчика, представленные в операторной форме. Условимся характеризовать возможные варианты компенсационных виброизмерительных приборов ИД шифром следующего вида:  $p^n S_i \rightarrow S_k$ ;  $n = 0, 1, 2$ ;  $i = 1, 2, 3$ ,  $k = 1, 2, 3$ . Здесь  $S_i$  — операторная

координата, поддерживаемая неизменной;  $S_i$  — операторная координата, по которой действует компенсирующая сила;  $p$  — оператор дифференцирования;  $Y_{отсч}$  — отсчетная координата. В общем случае может быть не одна отсчетная координата, вследствие чего одновременно может быть измерено несколько параметров вибрации.

Все возможные варианты компенсационных виброизмерительных приборов ИД (с принятыми ограничениями) сведены в таблицу. Каждый из кубиков, слагающих ее, поделен на две части в зависимости от рода отсчетной координаты.

Литературные данные позволяют судить о том, насколько заполнена таблица имеющимися разработками. Так, например, по схеме  $\frac{S_1 \rightarrow S_1}{I}$ , где  $I$  — ток в катушке обратного магнитоэлектрического преобразователя, построены велосиметр [4] и акселерометр [1] и [4]. По схеме  $\frac{p S_1 \rightarrow S_1}{I}$  работают акселерометры [5, 6]. Виброметр, предложенный М. М. Фетисовым [7, 1], характеризуется шифром  $\frac{S_3 \rightarrow S_1}{I}$ . В таблице наклонной штриховкой показаны зоны, содержащие имеющиеся разработки. Это зоны  $\frac{p^n S_1 \rightarrow S_1}{I}$  ( $n=0,1$ ) и  $S_3 \rightarrow S_1$ .



Очевидно, если в шифре того или иного варианта заменить  $S_1$  на  $S_2$  и наоборот, ничто не изменится, т. е. схема построения прибора останется той же. По этой причине в таблице горизонтальной штриховкой выделены зоны, в которых варианты получают указанной перестановкой.

Таблица, составленная по сути дела формально, позволяет тем не менее не только систематизировать имеющиеся сведения о компенсационных виброизмерительных приборах ИД, но и предложить некоторые новые их типы, обладающие интересными особенностями. Продемонстрируем последнее на примере приборов вида  $p^n S_1 \rightarrow S_3$ .

Запишем в операторной форме систему дифференциальных уравнений по рисунку [4]:

$$\begin{cases} (m_1 p^2 + b_{11} p + c_{11}) S_1 + (b_{12} p + c_{12}) S_2 = -m_1 p^2 S_{\text{вх}}; \\ (b_{21} p + c_{21}) S_1 + (m_2 p^2 + b_{22} p + c_{22}) S_2 = -m_2 p^2 S_{\text{вх}}, \end{cases}$$

где  $S_{\text{вх}}$  — операторное перемещение объекта (корпуса датчика) в пространстве;  $b_{ii} = \sum_{k=1}^2 b'_{ik}$  ( $b'_{ik}$  — коэффициенты успокоения);  $c_{ii} = \sum_{k=1}^2 c'_{ik}$  ( $c'_{ik}$  — жесткости упругих элементов);  $b_{ik} = -b'_{ik} = -b'_{ki}$  ( $i \neq k$ );  $c_{ik} =$

$= -c'_{ik} = -c'_{ki} (i \neq k)$ . Для приборов вида  $p^n S_1 \rightarrow S_3$  система уравнений станет такой:

$$\begin{cases} (m_1 p^2 + b_{11} p + c_{11}) S_1 + (b_{12} p + c_{12}) S_2 + F_{\beta} = -m_1 p^2 S_{\text{вх}}; & (1) \\ (b_{21} p + c_{21}) S_1 + (m_2 p^2 + b_{22} p + c_{22}) S_2 - F_{\beta} = -m_2 p^2 S_{\text{вх}}; & (2) \\ F_{\beta} = \alpha p^n S_1, & (3) \end{cases}$$

где  $F_{\beta}$  — операторная компенсирующая сила;  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности.

Подставив (3) в (1) и (2) и положив  $\alpha \rightarrow \infty$ , найдем:

$$\begin{cases} \alpha p^n S_1 + (b_{21} p + c_{21}) S_2 = -m_1 p^2 S_{\text{вх}}; \\ -\alpha p^n S_1 + (m_2 p^2 + b_{22} p + c_{22}) S_2 = -m_2 p^2 S_{\text{вх}}. \end{cases}$$

$\alpha \rightarrow \infty$  представляет собой требование глубокой обратной связи ( $S_1 \rightarrow 0$ ), т. е. условие, при котором прибор может считаться идеальным компенсационным.

Найдем электрическую величину  $Y_{\text{эл}}$ , определяющую компенсирующую силу. Если  $n=2$ , то, поскольку двойное дифференцирование осуществляется двумя дифференцирующими звеньями, возможны три случая: а)  $Y_{\text{эл}} = \lambda S_1$  ( $\lambda$  — коэффициент пропорциональности); б)  $Y_{\text{эл}} = \lambda p S_1$ ; в)  $Y_{\text{эл}} = \lambda p^2 S_1$ . Если  $n=1$ , возможны два случая:  $Y_{\text{эл}} = \lambda S_1$  и  $Y_{\text{эл}} = \lambda p S_1$ . При  $n=0$   $Y_{\text{эл}} = \lambda S_1$ . В общем случае  $Y_{\text{эл}} = \lambda p^m S_1$  ( $m \leq n$ ). Найдем  $S_1$ :

$$S_1 = \frac{\begin{vmatrix} -m_1 p^2 S_{\text{вх}} b_{12} p + c_{12} \\ -m_2 p^2 S_{\text{вх}} m_2 p^2 + b_{22} p + c_{22} \\ \alpha p^n b_{12} p + c_{12} \\ -\alpha p^n m_2 p^2 + b_{22} p + c_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha p^n b_{12} p + c_{12} \\ -\alpha p^n m_2 p^2 + b_{22} p + c_{22} \end{vmatrix}} =$$

$$= -p^2 S_{\text{вх}} \frac{m_1 (m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}) + (m_1 + m_2) (b'_{12} p + c'_{12})}{\alpha p^n (m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22})}.$$

Отсюда

$$Y_{\text{эл}} = -\frac{\lambda p^{m+2-n}}{\alpha} \cdot \frac{m_1 (m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}) + (m_1 + m_2) (b'_{12} p + c'_{12})}{m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}} S_{\text{вх}}.$$

При  $m_1 (m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}) \gg (m_1 + m_2) (b'_{12} p + c'_{12})$  имеем  $Y_{\text{эл}} \cong$

$\cong -\frac{\lambda m_1}{\alpha} p^{m-n+2} S_{\text{вх}}$ . Обозначив  $\frac{\alpha}{\lambda} = \beta$ , получим окончательно

$Y_{\text{эл}} \cong -\frac{m_1}{\beta} p^{m-n+2} S_{\text{вх}}$ . Данный результат не представляет интереса, так как он может быть получен с одноступенным датчиком. При  $m_1 (m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}) \ll (m_1 + m_2) (b'_{12} p + c'_{12})$  получается следующая формула:

$$Y_{\text{эл}} \cong -\frac{m_1 + m_2}{\beta} p^{m-n+2} \frac{b'_{12} p + c'_{12}}{m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}} S_{\text{вх}}.$$

Здесь в зависимости от дополнительных условий, накладываемых на механические параметры датчика, возможны 6 случаев.

а)  $c'_{12} \gg b'_{12} p$ ;  $m_2 p^2 \gg b'_{22} p + c'_{22}$ ;  $Y_{\text{эл}} = -\frac{(m_1 + m_2) c'_{12}}{m_2 \beta} p^{m-n} S_{\text{вх}}$ .

При  $m - n = 0$  возможно построение виброметров. Кроме того, при  $n > m$  получается интегрирование входного вибро смещения.

$$\text{б) } c'_{12} \gg b'_{12} p; b'_{22} p \gg m_2 p^2 + c'_{22}; Y_{\text{эл}} = - \frac{(m_1 + m_2) c'_{12}}{b'_{22} \beta} p^{m-n+1} S_{\text{вх}}.$$

В зависимости от величины  $m - n$  возможно построение велосиметра, виброметра и интегрирование входного вибро смещения.

$$\text{в) } c'_{12} \gg b'_{12} p; c'_{22} \gg m_2 p^2 + b'_{22} p; Y_{\text{эл}} = - \frac{(m_1 + m_2) c'_{12}}{c'_{22} \beta} p^{m-n+2} S_{\text{вх}}.$$

Этот результат неинтересен, так как он может быть получен с одностепенным датчиком.

$$\text{г) } b'_{12} p \gg c'_{12}; m_2 p^2 \gg b'_{22} p + c'_{22}; Y_{\text{эл}} = - \frac{(m_1 + m_2) b'_{12}}{m_2 \beta} p^{m-n+1} S_{\text{вх}}.$$

То же, что и для б).

$$\text{д) } b'_{12} p \gg c'_{12}; b'_{22} p \gg m_2 p^2 + c'_{22}; Y_{\text{эл}} = - \frac{(m_1 + m_2) b'_{12}}{b'_{22} \beta} p^{m-n+2} S_{\text{вх}}.$$

То же, что и для в).

$$\text{е) } b'_{12} p \gg c'_{12}; c'_{22} \gg m_2 p^2 + b'_{22} p; Y_{\text{эл}} = - \frac{(m_1 + m_2) b'_{12}}{c'_{22} \beta} p^{m-n+3} S_{\text{вх}}.$$

Возможно построение велосиметра и акселерометра. При  $m - n = 0$   $Y_{\text{эл}}$  оказывается пропорциональной резкости.

Нетрудно убедиться в том, что для пространственной координаты

$$S_2 = - \frac{(m_1 + m_2) p^2}{m_2 p^2 + b'_{22} p + c'_{22}}$$

возможен режим виброметра, велосиметра и акселерометра в зависимости от соотношения слагаемых знаменателя. Особый интерес в данном случае представляет результат, получающийся при  $m_2 p^2 \gg b'_{22} p + c'_{22}$  [3].

По таблице могут быть найдены возможные пути построения компенсационных виброметров, велосиметров, акселерометров для всех типов приборов. Условия, определяющие выбор того или иного пути построения данного компенсационного виброизмерительного прибора ИД, в каждом конкретном случае могут быть различными. Эти условия складываются из таких факторов, как возможность осуществления частотозависимого преобразования координаты, поддерживаемой неизменной, в компенсирующую силу ( $n > 0$ ) и введения дифференцирующих звеньев в цепь обратной связи ( $n - m > 0$ ), требования к устойчивости и надежности, ограничение веса и габаритов. Так, например, при построении виброметра может оказаться более выгодным использование двухстепенного датчика, так как в этом случае в петле обратной связи не нужно осуществлять двойного дифференцирования, которое требует для работы в широком диапазоне частот значительного усиления. С другой стороны, при выборе способа построения виброметра вида

преобладания успокоения можно ожидать большего запаса устойчивости. Если требуется повышенная надежность, предпочтительнее употребить одностепенной датчик, обладающий более простой конструкцией.

Соблюдение условий, при которых  $Y_{\text{отсч}} = B Y_{\text{вх}}$  ( $B = \text{const}$ ,  $Y_{\text{вх}}$  — изображение измеряемого параметра вибрации), приводит к тому, что плоскими оказываются как амплитудно-, так и фазочастотная характеристики, поскольку, очевидно, функция вида  $B = \text{const}$  является функцией минимальной фазы.

Анализ показывает, что коэффициенты пропорциональности между отсчетными координатами и измеряемыми параметрами вибрации вследствие введения обратной связи не содержат иных величин, кроме тех, которые характеризуют механическую систему датчика, и статического коэффициента обратного преобразования  $\beta$  (например, не содержат коэффициента усиления усилителя). Из этих величин только коэффициенты успокоения могут оказаться источниками более или менее значительных погрешностей, поскольку массы, жесткости и коэффициент  $\beta$  (при применении магнитоэлектрического обратного преобразователя) достаточно стабильны. Это позволяет сделать вывод о повышенной точности компенсационных виброизмерительных приборов.

Использование двухстепенных систем в вибродатчиках широкого промышленного назначения ввиду повышенной сложности конструкции представляется проблемным, и ответ на этот вопрос может быть получен только в результате накопления опыта. В промышленности для измерения вибрации низкой частоты с успехом могут применяться компенсационные приборы на базе одностепенных датчиков, что подтверждается исследованиями, проведенными в ЛПИ им. М. И. Калинина. Можно указать области вибрации, в которых конструктивная сложность аппаратуры не является существенной преградой для ее применения. Сюда относятся градуировка и поверка виброизмерительной аппаратуры, а также сейсмометрия. Главным показателем качества образцовых приборов является их точность, для сейсмометров важнее всего чувствительность. Оба эти показателя у компенсационных приборов ИД могут быть достаточно высокими. Так, например, испытания показали, что в области низких частот существующая образцовая аппаратура не превосходит по точности компенсационного акселерометра [8]. С другой стороны, как рассмотрено выше, при  $Y_{\text{отсч}} = S_2$  может быть построен высокочувствительный виброметр. Таким образом, в ограниченных случаях компенсационные приборы ИД оказываются перспективными независимо от вида датчика.

Итак, применение компенсационного метода в виброметрии, до сего времени ограниченное, открывает новые достаточно разнообразные возможности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Фетисов. Новые автоматические компенсационные приборы для измерения неэлектрических величин (приборы с обратными преобразователями). ЛДНТП, 1960.
2. Ю. И. Иорш. Виброметрия. М., Машгиз, 1963.
3. В. Д. Мазин. О способах введения обратной связи и выборе отсчетных координат в двухстепенном вибродатчике.— Сб. «Виброметрия». ЛДНТП, 1967.

4. Л. В. Полонская. О сравнительной оценке интегрирующих акселерометров компенсационного типа.— ИВУЗ, Приборостроение, 1965, т. 8, № 2.
5. Б. Е. Брюнелли, В. В. Алексеев. Сейсмоприемник с обратной связью.— Изв. АН СССР, серия геофизическая, 1959, № 5.
6. Lawrence Fleming. Feedback vibrometer.— J. Acoust. Soc. America, 1964, 36, № 9.
7. М. М. Фетисов. Устройство для измерения вибрации с помощью магнитоэлектрического обращенного преобразователя. Авторское свидетельство № 114054.— Бюллетень изобретений, 1958, № 7.
8. Н. П. Кремлевский и др. Образцовый компенсационный акселерометр.— Доклад на Всесоюзном научно-техническом совещании по вопросам состояния и дальнейшего развития работ в области тензометрии и виброметрии промышленного назначения. Краснодар, 1967.

*Поступила в редакцию  
20 ноября 1967 г.,  
окончательный вариант  
24 июня 1968 г.*