

проводящей поверхности  $h=2 \cdot 10^{-3}$  м. Согласно выражению (1), нужно найти три значения  $\Delta M$ , т. е.  $\Delta M_{Q1}$ ,  $\Delta M_{Q3}$  и  $\Delta M_{PQ}$ . Эти значения (для соответствующих радиусов) находим по формуле (5). Вычисленные значения  $\Delta M$  в функции от угла перекоса  $\Theta$  занесены в таблицу.

| $\Theta^\circ$ , град | $\Theta$ , рад | $\Theta^2$ , рад | $\Delta M$ , гн        | $\Delta M$ , мкгн |
|-----------------------|----------------|------------------|------------------------|-------------------|
| 1                     | 0,0175         | 0,0003           | $0,01 \cdot 10^{-7}$   | 0,001             |
| 3                     | 0,0524         | 0,0027           | $0,0956 \cdot 10^{-7}$ | 0,00956           |
| 5                     | 0,0873         | 0,0076           | $0,269 \cdot 10^{-7}$  | 0,0269            |
| 7                     | 0,122          | 0,0148           | $0,524 \cdot 10^{-7}$  | 0,0524            |
| 9                     | 0,1571         | 0,0246           | $0,871 \cdot 10^{-7}$  | 0,0871            |

Как видно из таблицы, приращение индуктивности катушки (при изменении угла  $\Theta$  от 0 до  $9^\circ$ ) очень незначительное, и поэтому на практике им можно пренебречь.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Ключев, В. М. Карпов. О методах измерений вибраций с помощью вихревых токов.— Приборостроение, 1964, № 9.
2. П. Л. Калаятаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. М.—Л., Госэнергониздат, 1955.

Поступило в редакцию  
13 марта 1969 г.,  
окончательный вариант —  
29 сентября 1970 г.

УДК 621.3.008

М. М. МАЛЬГУН

(Челябинск)

#### ВЛИЯНИЕ ВХОДНОЙ ЦЕПИ УСИЛИТЕЛЯ ПЬЕЗОТОКОВ НА ПОГРЕШНОСТЬ РЕГИСТРАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРЕНИЙ

По вопросам точности измерения импульсных ускорений имеется много работ, но подавляющее их большинство посвящено рассмотрению «коротких»\* ударов [1—3 и др.]; оценивается влияние собственных частот датчиков, гальванометров, степени их успокоения и т. п. Искажения «длинных» ударов почти не рассматривались, так как считалось целесообразным [4] для их регистрации применять аппаратуру на несущей частоте, принципиальные погрешности которой давно изучены.

\* Здесь и ниже «коротким» («длинным») считается такой импульс ускорения, при оценке передачи которого не надо (надо) учитывать влияние постоянной времени входной цепи усилителя пьезоэлектриков.

Однако, будучи уже сейчас наиболее широкополосной, аппаратура с пьезоакселерометрами может быть использована в более широком диапазоне частот. Поэтому вопрос о низкочастотных погрешностях такой аппаратуры является практически важным.

Обычно пьезодатчик подключается к усилителю с большим входным сопротивлением: к катодному или эмиттерному повторителю. Низкочастотная схема замещения цепи пьезодатчик — вход усилителя представляет собой [5] последовательное соединение идеального источника э. д. с. (входной сигнал схемы), конденсатора  $C$  и резистора  $R$  (выход схемы).

Здесь  $R$  равно входному сопротивлению усилителя,  $C$  является суммой емкостей датчика, соединительного кабеля и входа усилителя. Влияние разделительных  $RC$ -цепочек не учитывается, так как их постоянные времени могут быть выбраны значительно большими постоянной времени входной цепи.

Известно [1], что ускорения, возникающие при однократных соударениях твердых тел, достаточно хорошо аппроксимируются выражениями типа

$$a = A \sin \omega t \quad (1)$$

или

$$a = A \sin^2 \omega t \quad (2)$$

для времени  $0 < t < \frac{\pi}{\omega}$ .

Для указанной схемы замещения и импульса ускорения типа (1) в [5] дается кривая пиковой погрешности в зависимости от соотношения  $m = \tau/T_n$ , где  $\tau = RC$  — постоянная времени входной цепи усилителя;  $T_n$  — длительность импульса.

Однако кривой пиковой погрешности пользоваться не всегда удобно. Кроме того, немаловажно оценить сокращение длительности импульса за счет дифференцирующего действия входной цепи пьезоусилителя.

В данной статье ставится задача получить аналитические выражения для пиковой и временной относительных погрешностей регистрации длинного импульса ускорения.

Определим указанные погрешности следующим образом:

$$\delta_n = \frac{\Delta_n}{U_0} = 1 - \frac{U_{\text{вых. м.}}}{U_0}, \quad (3)$$

$$\delta_T = \frac{\Delta_T}{T_n} = 1 - \frac{t_0}{T_n}, \quad (4)$$

где  $U_0$  и  $U_{\text{вых. м.}}$  — максимальные значения входного и выходного импульсов напряжения соответственно для схемы замещения входной цепи усилителя пьезоэлемента;  $\Delta_n$  — разница между ними;  $T_n$  и  $t_0$  — длительности входного и выходного импульсов соответственно;  $\Delta_T$  — разница между ними.

Графические изображения отклика схемы замещения на полусинусоидальное воздействие приведены в [4, 5 и др.]. Аналитическое выражение отклика  $u_{\text{вых}}$  для  $0 < t < \leq T_n$  имеет вид

$$u_{\text{вых}} = U_0 \frac{\pi m}{1 + (\pi m)^2} \left[ \sqrt{1 + (\pi m)^2} \sin \left( \omega t + \arctg \frac{1}{\pi m} \right) - e^{-\frac{t}{\tau}} \right]. \quad (5)$$

С погрешностью, не превышающей 5%, можно положить, что  $U_{\text{вых. м.}} \approx u_{\text{вых}}$  при  $t = \frac{\pi}{2\omega}$  для  $m \geq 1$ , поэтому

$$U_{\text{вых. м.}} \approx U_0 \frac{\pi m}{1 + (\pi m)^2} \left[ \sqrt{1 + (\pi m)^2} - e^{-\frac{1}{\tau}} \right]. \quad (6)$$

Используя (3) и (6), получим

$$\delta_n = \frac{1 + \pi m e^{-\frac{1}{2m}}}{1 + (\pi m)^2}. \quad (7)$$

Для  $m \geq 2$  это выражение может быть еще упрощено:

$$\delta_n \approx \frac{1}{\pi m} e^{-\frac{1}{2m}}. \quad (8)$$

Временную погрешность  $\delta_T$  для полусинусоидального воздействия можно в первом приближении считать равной [см. выражение (5)]

$$\delta_T \approx \frac{1}{\pi} \arctg \frac{1}{\pi m}. \quad (9)$$

Проверка полученных формул производилась следующим образом. Импульсы ускорения, испытываемые массой с закрепленным на ней пьезоакселерометром ИС-313А при падении на преграды с различной жесткостью (дерево, войлок, резина пористая и вакуумная различной толщины), регистрировались одновременно на обоих каналах осциллографа С1-18, причем один канал имел чисто гальванический вход, второй — резистивно-емкостный с постоянной времени  $\tau_0 = 12,5$  мсек. Чувствительность обоих каналов предварительно была выравнена. В опытах использовался эмиттерный повторитель со входным сопротивлением не менее 200 Мом и постоянной времени входной цепи не менее 300 мсек.

Результаты, полученные на основании осциллограмм, а также расчетные кривые по выражениям (7)–(9) представлены на рисунке. Расчетные пиковые погрешности хорошо совпадают с экспериментально определенными, чего нельзя сказать о временной погрешности. По-видимому, причиной этого является резкое отличие расчетной полусинусоидальной формы импульса от реальной у его основания.

С целью уточнения выражения для временной погрешности был найден отклик схемы замещения на воздействия типа (2):

$$u_{\text{вых}} = U_0 \frac{2(\pi m)^2}{1 + 4(\pi m)^2} \left[ e^{-\frac{t}{\tau}} + \sqrt{1 + \frac{1}{4(\pi m)^2}} \sin \left( \frac{2\pi}{T_n} t - \arctg 2\pi m \right) \right]. \quad (10)$$

Очевидно, момент  $t_0$  перехода отклика через нуль можно определить, приравняв

$$e^{-\frac{t_0}{\tau}} + \sqrt{1 + \frac{1}{4(\pi m)^2}} \sin \left( \frac{2\pi}{T_n} t_0 - \arctg 2\pi m \right) = 0.$$

Отсюда, используя (4) и ранее принятые обозначения, получим при  $m \geq 1$

$$e^{-\frac{1}{m}(1-\delta_T)} \approx \cos 2\pi \delta_T.$$

Разложив обе части полученного приближенного равенства в ряд Маклорена и ограничившись тремя членами разложения, найдем

$$1 - \frac{1}{m}(1-\delta_T) + \frac{1}{2m^2}(1-\delta_T)^2 = 1 - 2\pi^2 \delta_T^2.$$

Отсюда

$$\delta_T = \frac{1 - m + 2\pi m \sqrt{2m - 1}}{(2\pi m)^2}. \quad (11)$$

Здесь знак «минус» перед радикалом отброшен, так как выше было сделано предположение, что  $m \geq 1$ , а погрешность  $\delta_T$  по определению положительна.

Подставляя (10) в (3) и полагая, что, как и в случае полусинусоидального воздействия, момент  $u_{\text{вых}} = U_{\text{вых, м}}$  наступает при  $\omega t = \frac{\pi}{2}$  и что  $m \geq 1$ , получим выражение для пиковой погрешности при воздействии типа (2):

$$\delta_{\text{п}} = \frac{1 + 2(\pi m)^2 (1 - e^{-\frac{1}{2m}})}{1 + 4(\pi m)^2}. \quad (12)$$

Расчетные кривые по формулам (11) и (12) тоже представлены на рисунке, рассмотрение которого позволяет сделать следующие выводы.

Получены аналитические выражения для временной [(11)] и амплитудной [(7), (8), (12)] погрешностей регистрации однократных импульсов ускорения при помощи пьезоакселерометров, хорошо согласующиеся с экспериментом. Из формул для амплитудной погрешности выражение (12) наиболее приближается к экспериментальным данным, однако, учитывая сравнительную простоту и незначительное отличие в результатах от (12), для практического использования может быть рекомендована формула (8).

Если критерием эквивалентности считать амплитудную погрешность, то представление импульсных ускорений выражениями типа (1) и (2) примерно равноценно; в отношении временной погрешности представление типа (2) оказывается значительно точнее.

3. Область применимости полученных формул ограничивается диапазоном значений  $m \geq 1$ , что соответствует значениям погрешностей, не превышающим 30%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. И. Субботин. О точности записи импульсных ускорений.— Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1963, № 3.
2. В. С. Пеллинец и В. В. Гаюн. Вопросы динамической коррекции при измерении нестационарных процессов.— Измерительная техника, 1966, № 1.
3. В. В. Гаюн, В. С. Пеллинец. Оценка искажений при регистрации нестационарных процессов.— Сб. «Виброметрия», № 1. Материалы второй научно-технической конференции. М., 1965.
4. В. А. Шмелев. Некоторые вопросы измерения ускорений, возникающих при ударе.— Автометрия, 1968, № 1.
5. D. Krieger. Die Messung mechanischer Stöße mit piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern.— Feingerätetechnik, 1968, № 4.

*Поступило в редакцию  
1 января 1969 г.,  
окончательный вариант —  
25 ноября 1969 г.*

УДК 621.317.44

*М. З. ЮДИЧ*

*(Москва)*

## ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ЗАЩИТЫ ОТ ПЕРЕГРУЗОК МАГНИТНОГО МОДУЛЯТОРА НУЛЬ-ОРГАНА

Ноль-орган машины централизованного контроля «Амур»-80 состоит из магнитного модулятора, электронного лампового усилителя, демодулятора.

Схема модулятора-усилителя приведена на рисунке. Первичная обмотка  $\omega_1$  и обмотка подмагничивания  $\omega_4$  включены по мостовой схеме. Симметрирование схемы осуществляется потенциометрами  $R_{16}$  и  $R_{22}$  и реостатами  $R_{19}$  и  $R_{21}$ . Обмотка  $\omega_2$  сигнальная,  $\omega_3$  выходная. Емкость  $C_7$  и индуктивность обмотки  $\omega_3$  образуют резонансный контур, настроенный на 50 гц. При нулевом входном напряжении на нагрузке выделяется сигнал, обусловленный током в подмагничивающей обмотке и имеющий вид двухполупериодного выпрямленного напряжения. С подачей тока в сигнальную обмотку от источника малого напряжения (зона нечувствительности  $\pm 50$  мкв) равновесие моста нарушается и на выходе появляется напряжение частоты 50 гц. Фаза этого напряжения определяется полярностью входного сигнала. Далее это напряжение усиливается и демодулируется П, 2П.

В случае появления на входе увеличенного на несколько порядков сигнала перегрузки (в машине «Амур»-80 — 400 мв при обрыве датчика) происходит сильное «смещение нуля» (до 500 мкв) схемы, которое можно снизить до требуемого значения подачей в обмотку  $\omega_1$  плавно уменьшающегося переменного напряжения, что и сделано