

Ю. И. СПИЦЫН

## ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОВЕРХНОСТНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В современных автоматических приборах, позволяющих измерять расстояния, различного рода угловые и линейные перемещения, все чаще применяются электромеханические устройства, представляющие собой экранированную подвижную катушку, перемещающуюся в поле постоянного магнита.

Такие устройства (системы) позволяют использовать для измерений расстояния между точками на земной поверхности, находящимися друг от друга на удалении до двух километров, поверхностный сейсмический эффект при воздействии на земную поверхность внешнего возбуждающего удара, например,

искусственного сейсмического взрыва. Такие системы можно применять и в геодезических измерениях.

Отклик электромеханических систем на ударное возбуждение, как известно из работы [1], представляется кривыми различного характера в зависимости от параметров систем и характеризуется в идеальном случае интегралом

$$\int_0^t x_{st}(t) dt = I \int_0^t \frac{x_{st}(t)}{I} dt, \quad (1)$$

где  $x_{st}$  — максимальная амплитуда импульса на выходе электромеханической системы;  $I$  — площадь импульса отклика на ударное воздействие.

Интеграл в правой части формулы представляет процесс идеального удара, а в левой — процесс идеального скачка. В реальных условиях спектр удара в отклике электромеханической системы можно представить экспоненциальной временной функцией с задержкой отклика релаксационной электромеханической системы на ударное воздействие равной [1]:

$$\tau_3 = \frac{0,015}{f_0}, \quad (2)$$

где  $f_0$  — резонансная частота электромеханической системы,  $\tau_3$  — время задержки формирования импульса отклика.

Нами исследовался сейсмодатчик СВ 2-10 в целях использования его как датчика первичной информации в автоматической геодезической системе определения расстояний методом поверхностного сейсмического эффекта.

Поскольку для датчика СВ 2-10 резонансная частота составляет 10 Гц, то для него максимальная задержка формирования ответного импульса на ударное воздействие равна

$$\tau_3 = \Delta\varphi_3 = \frac{0,015}{10} = 0,0015 \text{ с} = 1,5 \text{ мс.}$$

При этом минимально допустимый период следования импульсов ударного возбуждения, как это обусловлено законами электроники, должен составлять

$$T = \frac{1}{f_0} = \frac{1}{10} = 0,1 \text{ с} = 100 \text{ мс.}$$

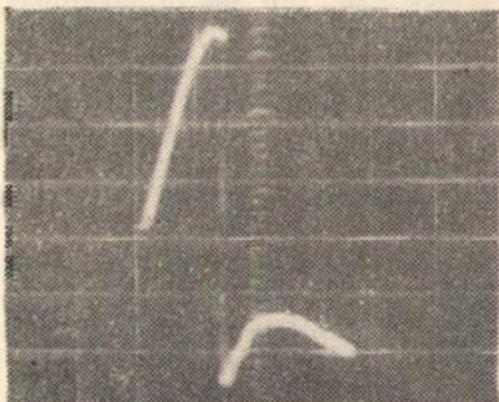


Рис. 1. Осцилограмма отклика электромеханической системы СВ 2-10 на импульс ударного возбуждения (цена большого деления шкалы 5 мс).

Однако при повторении импульсов ударного возбуждения с частотой, близкой к резонансной или более ее, в любой электромеханической системе большое влияние на период импульсов отклика оказывает инертность массы подвижной массы. При этом период следования импульсов ударного возбуждения определяется по формуле

$$T_1 = \frac{2Q}{\omega} = \frac{Q}{\pi f}, \quad (3)$$

где  $Q$  — добротность электромеханической системы, представляющая собой электрофизический параметр,  $f$  — текущая частота повторения импульсов ударного возбуждения.

Очевидно, что число возможных импульсов ударного возбуждения в этом случае определяется добротностью электромеханической системы. По справочным данным сейсмометрии добротность СВ 2-10 равна 5.

Тогда

$$T_1 = \frac{5}{31,4} \approx 0,16 \text{ с}, \text{ а } N = \frac{T_1}{T} = \frac{0,16}{0,1} \approx 2,$$

где  $N$  — число возможных импульсов ударного возбуждения на резонансной частоте системы.

Следовательно, при воздействии на датчик серии возбуждающих ударов интервал между их возникновениями должен быть не менее 160 мс, а с учетом переходных процессов и задержек сигнала в электронных схемах формирования приемного устройства — не менее 200 мс.

Рассмотрим теоретически возможные погрешности преобразования разности фаз между импульсами двух датчиков  $D_1$  и  $D_2$ , расположенных на различных расстояниях  $S_1$  и  $S_2$  от эпицентра взрыва, во временной интервал. Временной интервал выделяется специальным электронным блоком — аналого-цифровым преобразователем, в котором происходит заполнение этого интервала частотой, кратной скорости распространения поверхности ударной волны для данного грунта.

Такое заполнение равносильно, в соответствии с алгеброй Буля, умножению временного интервала на скорость распространения, в результате чего на выходных устройствах аналого-цифрового преобразователя сформирован двоично-десятичный код, представляющий собой разность расстояний между эпицентром взрыва и соответствующими датчиками.

Будем считать для упрощения расчетов, что динамические фазовые характеристики всех датчиков, работающих в геодезической системе, идентичны, и средняя фазовая погрешность из-за непостоянства во времени этих характеристик  $\Delta\phi_f$  близка к нулю.

Начало формирования информационного импульса в таком случае следует привязать во времени к вершине пика ампли-

тудной характеристики датчика при минимально-заданном пороге срабатывания формирующих схем приемных устройств. При использовании для временной привязки генераторов на туннельных диодах, максимальное время задержки равно периоду следования импульсов привязки на принятой нами частоте их генерации, равной 1000 Гц. Тогда

$$\Delta\Phi_n = \frac{1}{f_n} = \frac{1}{1000} = 0,001 \text{ с} = 1 \text{ мс.}$$

Это и будет фазовая погрешность формирования информационного импульса в схеме временной привязки. Задержками формирования импульсов из-за переходных процессов в электронных схемах можно пренебречь, так как их величина на шесть порядков меньше, чем  $\Delta\Phi_n$ .

В суммарную фазовую погрешность будет входить и погрешность за флуктуацию во время распространения ударной волны вдоль поверхности грунта в зависимости от его плотности, влажности, температуры, наличия растительного покрова и сооружений. Предварительными расчетами и исследованиями выявлено, что на расстояниях в пределах 0,5—2 км фазовая погрешность  $\Delta\Phi_\phi$  за флуктуацию может достигать  $\pm 10$  мс.

Следовательно, суммарная фазовая погрешность принятой нами в качестве датчика первичной информации электромеханической системы СВ 2-10 и схемы формирования информационного импульса составляет

$$\Delta\Phi_s = \sqrt{\Delta\Phi_3^2 + \Delta\Phi_n^2 + \Delta\Phi_\phi^2} \quad (4)$$

или в числовом выражении

$$\Delta\Phi_s = \sqrt{\Sigma\Delta\Phi^2} = \sqrt{103} = \pm 10,2 \text{ мс.}$$

В системе измерения расстояний участвуют четыре приемных устройства, поэтому среднеквадратическая ошибка измерения фазы составит

$$m_\phi = \pm \frac{\Delta\Phi_s}{\sqrt{4}} = \pm 5,1 \text{ мс.}$$

При преобразовании измеренной разности фаз в числовой код погрешность, вызываемая неопределенностью положения «старт» и «стоп» импульсов (запускающего и останавливающего счет импульсов частоты тактового генератора) относительно импульсов тактового генератора, определяется дискретностью аналого-цифрового преобразователя и составляет согласно работе [2],

$$\Delta\Phi_d = 2\pi \frac{f_{вх}}{f_{гти}}, \quad (5)$$

где  $f_{вх}$  — частота входного сигнала,  $f_{вх}=10$  Гц,  $f_{гти}$  — частота тактового генератора.

Следует отметить, что для решения задачи определения расстояний с помощью поверхностного сейсмического эффекта автоматическими средствами измерительной техники, частота тактового генератора для заполнения временных интервалов выбирается кратной средней скорости распространения ударной волны для грунта данной территории.

Для песчаных грунтов средней влажности скорость равна 2400 мс. В этом случае фазовая погрешность преобразования равна

$$\Delta\Phi_d = 2\pi \frac{10}{24 \cdot 10^4} = 0,26 \text{ мс.}$$

При отсутствии синхронизации «старт»- и «стоп»-импульсов с импульсами тактового генератора, среднеквадратическая ошибка одного преобразования [2] составит

$$m_{\text{сч}} = \pm \frac{\Delta\Phi_d}{\sqrt{6}} = \pm \frac{0,26}{\sqrt{6}} = \pm 0,11 \text{ мс.}$$

Суммарная среднеквадратическая ошибка измерения разности фаз с учетом (4) равна [3]

$$M_\Sigma = \sqrt{m_\varphi^2 + m_{\text{сч}}^2} = \sqrt{25,8} = \pm 5,1 \text{ мс,}$$

что соответствует погрешности в измерении расстояния

$$\delta_s = \pm M_\Sigma \cdot v = \pm 5,1 \cdot 2,4 = \pm 12,2 \text{ м.}$$

В действительности, погрешность в измерении разности фаз между «старт»- и «стоп»-импульсами, вызываемая нестабильностью во времени динамических фазовых характеристик электромеханической системы СВ 2-10, может быть большей и должна составлять предмет исследований для ее учета при обработке измерительной информации на электронно-вычислительных средствах или проведения коррекции в ходе предварительной обработки информации при преобразовании временных интервалов в цифровой код.

Проведенные лабораторные испытания системы СВ 2-10 и макетов схем формирования информационного импульса показали справедливость таких рассуждений. Результаты исследований приведены в табл. 1.

При исследованиях  $\tau_3$  и  $\Delta\Phi_p$  использовался измеритель временных интервалов частотомера ЧЗ-34А. Измерения временных интервалов производились между передними фронтами положительных перепадов импульсов от электронных устройств формирования по схеме, показанной на рис. 2.

Исследование величины  $\Delta\Phi_p$  проводилось по схеме, показанной на рис. 3. Для исследования  $\tau_3$  применялась схема порогового формирователя информационного импульса при  $V_{\text{пор}} = +1,5$  В. Задержкой формирования импульса в эмиттерном по-

иторителе и в элементах ТТЛ можно пренебречь, так как она на 5 порядков меньше исследуемых величин.

**Результаты определения максимального времени задержки ответного импульса СВ-2-10 и фазовой погрешности его формирования**

№ п/п	$\tau_3$ , мс				$\Delta\varphi_B$ , мс			
	Д 1	Д 2	Д 3	Д 4	ДФ 1	ДФ 2	ДФ 3	ДФ 4
1	1,42	1,48	1,49	1,52	0,871	0,891	0,893	0,949
2	1,51	1,68	1,39	1,51	0,829	0,907	0,916	0,956
3	1,39	1,59	1,53	1,62	0,823	0,893	0,924	0,937
4	1,60	1,41	1,53	1,40	0,826	0,864	0,939	0,892
5	1,25	1,34	1,44	1,43	0,799	1,002	0,896	0,937
6	1,47	1,55	1,55	1,47	0,860	1,019	0,785	0,919
7	1,28	1,42	1,51	1,56	0,873	0,853	0,816	0,856
8	1,34	1,56	1,67	1,38	0,852	0,796	0,798	0,859
9	1,46	1,43	1,49	1,44	0,819	0,936	0,903	0,919
10	1,22	1,38	1,54	1,59	0,811	0,944	0,877	0,961
11	1,58	1,21	1,37	1,41	0,875	0,933	0,915	0,889
12	1,45	1,42	1,33	1,47	0,993	0,955	0,898	0,887
13	1,38	1,41	1,41	1,58	0,966	0,919	0,961	0,919
14	1,49	1,47	1,44	1,44	0,837	0,798	0,975	0,947
15	1,68	1,58	1,53	1,36	0,845	0,824	0,975	0,941
16	1,36	1,37	1,37	1,55	1,007	0,981	0,969	0,977
17	1,33	1,28	1,47	1,44	0,911	1,112	0,988	0,964
18	1,51	1,69	1,59	1,43	0,892	1,121	0,967	0,897
19	1,61	1,49	1,40	1,69	0,888	0,971	0,992	0,809
20	1,37	1,34	1,44	1,49	0,998	1,010	1,106	0,984
Cр.	1,435	1,455	1,475	1,489	0,879	0,936	0,925	0,920
Cр.		1,464				0,915		

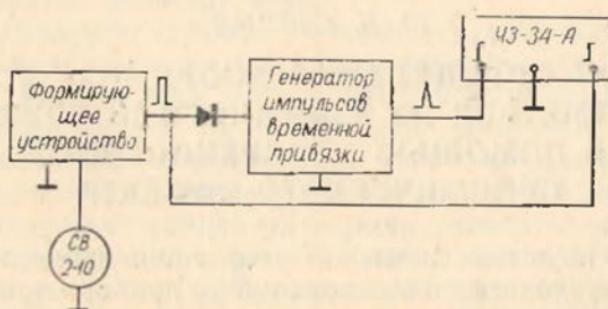


Рис. 2. Электрическая схема определения задержки информационного импульса в схеме временной привязки.

Эмиттерный повторитель на транзисторе  $T_4$  применен для защиты элемента И-НЕ  $D_1$ , так как амплитуда импульсов ударного возбуждения на выходе ЭМС СВ 2-10 может достигать 30 В.

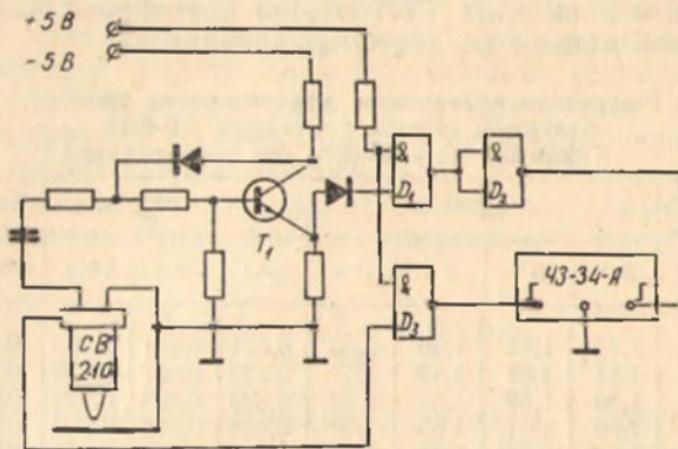


Рис. 3. Электрическая схема определения задержки импульса СВ 2-10 на ударное возбуждение.

Проведенные исследования и расчеты позволяют сделать вывод, что сейсмодатчик СВ 2-10 можно использовать в качестве датчика первичной информации в автоматизированной геодезической системе определения расстояний с помощью поверхностного сейсмического эффекта.

**Список литературы:** 1. Ленк А. Электромеханические системы. — М.: Мир, 1978. 2. Ахметжанов А. А. Электромеханические преобразователи угла с электрической редукцией. — М.: Энергия, 1978. 3. Чеботарев А. С. Способ наименьших квадратов. — М.: Геодезиздат, 1958.