

2. Чеголин П. М. и др. Автоматизация преобразования сложных форм графической информации.— Минск: Наука и техника, 1973.
3. Леонович Э. Н., Рухленко А. С. Об одном подходе к расчету АПХ электромагнитной измерительной системы УГВ.— В кн.: Автоматизация проектирования в машиностроении. Минск: ИТК АН БССР, 1981, вып. 3.
4. Светлов П. И. и др. Устройство для считывания графической информации. (Автор. свид-во № 987646).— БИ, 1983, № 1.

Поступила в редакцию 24 июля 1982 г.

УДК 550.837

В. Н. ОВЧИННИКОВ, И. М. ФЕДОРОВ

(Свердловск)

### УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ Z-ПАРАМЕТРОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ

Устройство предназначено для выявления незначительной медленно протекающей деградации Z-параметров линейных пассивных четырехполюсников. Искомые параметры  $Z_{ij}$  находятся из опытов холостого хода со стороны входных или выходных зажимов четырехполюсника измерением соответствующих значений напряжений  $U_i$ , токов  $I_j$  и последующим делением указанных величин:  $Z_{ij} = U_i/I_j$  ( $i, j = 1, 2$ ).

Исследуемой системой является, в частности, полевая четырехточечная установка методов срединного градиента или дипольного профилирования, используемая для измерения модуля удельного сопротивления  $\rho$  горных пород [1]. Такая установка состоит из двух пар электродов, расположенных, например, на поверхности земли и являющихся зажимами четырехполюсника. Важнейший параметр подобной системы — прямое передаточное сопротивление  $Z_{21} = U_2/I_1 \sim \rho$ , где  $I_1$  — ток в цепи питающих электродов, возбуждающий исследуемую систему;  $U_2$  — разность потенциалов между приемными электродами в режиме холостого хода. Отметим, что изучение зависимости  $\rho$  от времени актуально с практической и научной точек зрения, ибо позволяет получить важную косвенную информацию о динамике напряженного состояния горных пород и о современных движениях земной коры [2].

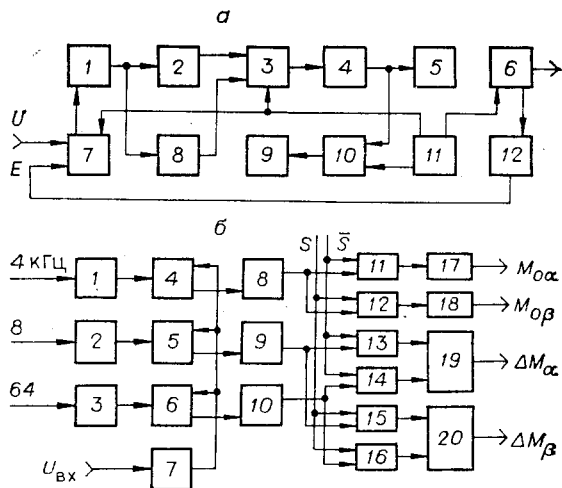
Для получения полноценных полевых материалов измерения величины  $\rho$  должны выполняться в течение весьма значительного интервала времени. Результаты наблюдений целесообразно фиксировать в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) аппаратуры и выводить при ее периодическом обслуживании. Необходимые быстродействие и объем памяти сравнительно невелики. Единичный измерительный цикл достаточно длителен (до нескольких минут), относительная погрешность оцифровки искомой временной зависимости параметра  $Z_{ij}(t)$  — около 0,1% при существенно большей допустимой погрешности определения начального значения  $Z_{ij}(0)$ , которая может достигать нескольких процентов. И, наконец, аппаратура должна быть помехоустойчивой и экономичной по питанию.

Указанным требованиям удовлетворяет автоматическая система, содержащая аналоговый частотно-избирательный узел, аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и микро-ЭВМ, которая используется для улучшения метрологических характеристик АЦП и вычисления искомых величин, пропорциональных, например, значениям  $Z_{21}(t)$ .

Функциональная схема установки представлена на рис. 1. Ее состав: аналоговый тракт из дифференциального усилителя  $I$ , аттенуато-

Рис. 1. Функциональные схемы установки (а) и АЦП (б):

а: 1 — дифференциальный усилитель; 2, 8 — аттенуаторы  $\alpha$ - и  $\beta$ -каналов соответственно «напряжение» и «ток»; 3, 7 — переключатели; 4 — частотно-избирательный усилитель; 5 — стрелочный прибор; 6 — тиристорный инвертор; 9 — микро-ЭВМ; 10 — АЦП; 11 — синхронизатор; 12 — трансформатор тока; б: 1—3 — фильтры гармоник; 4—6 — преобразователи частоты; 7 — измерительный частотный преобразователь; 8—10 — фильтры нижних частот; 11—16 — клапаны; 17, 18 — суммирующие счетчики импульсов; 19, 20 — реверсивные счетчики.



ров 2 и 8 и двухзвенного избирательного усилителя 4 на частоту 3,91 Гц; коммутационные элементы — дистанционные переключатели 3 и 7, АЦП 10, микро-ЭВМ 9 и возбуждаемый синхронизатором 11 параллельный тиристорный инвертор 6 с трансформатором тока 12.

Функциональная схема АЦП, который является одним из основных блоков рассматриваемой системы, приведена на рис. 1, б. Устройство осуществляет прямое преобразование средневыпрямленного значения переменного напряжения в цифровой код. Входное напряжение АЦП преобразуется в частотно-модулированную последовательность импульсов с помощью измерительного частотного преобразователя (ИЧП) 7. Частота выходного сигнала ИЧП:  $\omega(\Omega t) = \omega_0 + \omega_m \sin \Omega t$ . Здесь  $\Omega = 2\pi F = 24,5 \text{ с}^{-1}$  — рабочая частота установки;  $\omega_0$  и  $\omega_m < \omega_0$  — соответственно центральная частота и девиация частоты ИЧП. Выходное напряжение ИЧП подводится к преобразователям частоты 4—6, на вторые входы которых подаются синусоидальные сигналы с частотами  $\omega_1 \approx \omega_0$ ,  $\omega_2 < \omega_0$  и  $\omega_3 > \omega_0$ , извлекаемые фильтрами гармоник 1—3 из напряжений, формируемых синхронизатором. С помощью низкочастотных фильтров (ФНЧ) 8—10 из продуктов преобразования выделяются сигналы разностных частот. После усиления и формирования выходные напряжения ФНЧ через две группы клапанов (11, 13, 14 и 12, 15, 16), управляемые потенциалами  $S$  и  $\bar{S}$  синхронизатора, подводятся к счетчикам импульсов 17—20.

Пусть, например, сигналы  $S$  и  $\bar{S}$  таковы, что деблокирована первая группа клапанов. За время  $2\pi n/\Omega$ , кратное периоду обрабатываемого напряжения, суммирующий счетчик 17 накапливает код

$$Q_0 = (2n\omega_m/\pi\Omega) f[(\omega_0 - \omega_1)/\omega_m],$$

где

$$f[(\omega_0 - \omega_1)/\omega_m] = [(\omega_0 - \omega_1)/\omega_m] \arcsin [(\omega_0 - \omega_1)/\omega_m] + \{1 - [(\omega_0 - \omega_1)/\omega_m]^2\}^{1/2}.$$

Приращение содержимого реверсивного счетчика импульсов (РСИ) 19 за это время составит

$$\Delta Q = \frac{2n\omega_m}{\pi\Omega} \sum_{q=2}^3 (-1)^q f\left(\frac{\omega_0 - \omega_q}{\omega_m}\right).$$

Искомый результат  $Q$  преобразования может быть найден по формуле

$$Q = Q_0(1 - \gamma\Delta Q^2),$$

где  $\gamma = 0,5[\pi\Omega/2n(\omega_3 - \omega_2)]^2$  — постоянный числовой коэффициент.

Отличительная особенность используемой модификации АЦП — малая зависимость результата преобразования от дрейфа нестабильной центральной частоты ИЧП. При  $\omega_3 - \omega_2 \ll 2\omega_m$  и  $\omega_0 - \omega_1 \ll \omega_m$  относительная погрешность  $\delta$  АЦП, обусловленная указанной причиной, опре-

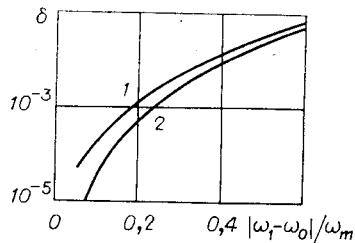


Рис. 2. Зависимость погрешности преобразования от дрейфа центральной части ИЧП.

исходных величин  $Q_0$  и  $\Delta Q$ , а также вследствие влияния вычислительной процедуры, проводимой при нахождении искомого значения  $Q$ . Первую причину увеличения погрешности преобразования можно устранить выбором соответствующей разрядности кодов  $Q_0$  и  $\Delta Q$ , влияние второго фактора на точность АЦП незначительно. Пусть относительные погрешности чисел  $Q_0$ ,  $\Delta Q$  и  $Q$  равны соответственно  $\xi_0$ ,  $\Delta \xi$  и  $\xi$ , тогда  $\xi/\xi_0 = 1 + 2(\gamma \Delta \xi \Delta Q^2 / \xi_0)^2 \cong 1$ .

Рассмотрим теперь функционирование установки в целом. После включения устройства с помощью синхронно работающих переключателей 7 и 3 к усилителю 1 (см. рис. 1, а) поочередно подводятся напряжения  $U$  и  $E$ , а в усилительный тракт включается один из аттенюаторов 2 или 8. Подобным образом в аналоговой части установки выделяются два канала, используемые при последовательной обработке напряжений  $E$  и  $U$ . Каждый из каналов образован активными элементами, общими для обоих каналов, и соответствующим аттенюатором. Такое построение тракта позволяет уменьшить требования к стабильности коэффициентов передачи его усилительных узлов.

Для нормального функционирования установки необходимо, чтобы входные сигналы избирательного усилителя 4 при коммутации цепей незначительно изменялись по амплитуде. Это позволяет уменьшить время установления стационарного режима работы усилителя, если реактивная компонента искомого  $Z$ -параметра мала.

Неизменность девиации частоты ИЧП дает возможность уменьшить влияние нелинейности ИЧП и дрейфа его центральной частоты на погрешность определения искомого  $Z$ -параметра. Пусть  $\omega_{m\alpha}$  и  $\omega_{m\beta}$  — значения девиации частоты при обработке сигналов соответственно  $U$  и  $E$  и  $\omega_{m\alpha}/\omega_{m\beta} \leq 1,059$ ; тогда составляющая погрешности величины  $Z_{21}$ , обусловленная, в частности, нестабильностью  $\omega_0$ , убывает не менее чем в  $[1 - (\omega_{m\alpha}/\omega_{m\beta})^2]^{-1} = 3,86$  раз в сравнении с подобной характеристикой АЦП.

После уравнивания выходных напряжений аналоговых каналов производится установка цифровых узлов синхронизатора в нуль, например, по сигналам точного времени. На вход дифференциального усилителя 1 подается напряжение  $E$ , в тракт вводится аттенюатор 8. В течение 6,1 с происходит установление стационарного режима работы частотно-избирательного усилителя 4 (см. рис. 1), затем синхронизатор потенциалом  $S$  деблокирует клапаны 12, 15 и 16 (см. рис. 1, б), и за  $m = 48$  периодов обрабатываемого сигнала (12,2 с) в счетчиках импульсов 18 и 20 накапливаются коды

$$N_{0\beta} = \frac{2m\omega_{m\beta}}{\pi\Omega} f\left(\frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_{m\beta}}\right) \text{ и } \Delta N_{\beta} = \frac{2m\omega_{m\beta}}{\pi\Omega} \sum_{q=2}^3 (-1)^q f\left(\frac{\omega_0 - \omega_q}{\omega_{m\beta}}\right),$$

где  $\omega_{m\beta} = kK_0 E_m / \beta$ ,  $k$  — крутизна модуляционной характеристики ИЧП,  $E_m$  — амплитудное значение выходного напряжения трансформатора тока,  $\beta$  и  $K_0$  — коэффициенты передачи аттенюатора 8 и аналогового тракта.

деляется выражением  $\delta \approx [(\omega_1 - \omega_0)(\omega_3 - \omega_2)/\omega_m^2]^2 / 24$ . В данном устройстве  $\omega_1 - \omega_0 \leq 2\pi 3 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_3 - \omega_2 = 2\pi 8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_m \geq 2\pi 1,7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ , поэтому величина  $\delta \leq 2,87 \times 10^{-4}$ . На рис. 2 приведены рассчитанные по точным формулам зависимости относительной погрешности преобразования  $\delta$  от отношения  $|\omega_1 - \omega_0|/\omega_m$  для  $|\omega_3 - \omega_2|/\omega_m = 0,6$  и 0,1 (кривые соответственно 1 и 2).

Результирующая погрешность АЦП будет больше погрешности, определенной, например, по графикам рис. 2, из-за округления

При  $t = 18,3$  с счетчики отключаются от ФНЧ, к усилителю  $I$  подводится сигнал  $U$ , вновь устанавливается режим вынужденных колебаний в частотно-избирательных цепях системы, затем открываются клапаны  $11$ ,  $13$  и  $14$ . Импульсные последовательности с выходов ФНЧ начинают проходить к счетчикам  $17$  и  $19$ , которые за  $12,2$  с накапливают числа

$$N_{0\alpha} = \frac{2m\omega_{m\alpha}}{\pi\Omega} f\left(\frac{\omega_0 - \omega_1}{\omega_{m\alpha}}\right) \text{ и } \Delta N_{\alpha} = \frac{2m\omega_{m\alpha}}{\pi\Omega} \sum_{q=2}^3 (-1)^q f\left(\frac{\omega_0 - \omega_q}{\omega_{m\alpha}}\right),$$

$\omega_{m\alpha} = kK_0 U_m / \alpha$ ,  $U_m$  — амплитуда сигнала  $U$  и  $\alpha$  — коэффициент передачи аттенуатора  $2$ .

В момент времени  $t = 36,6$  с заканчивается первый измерительный такт, затем подобные операции повторяются  $n/m = 24$  раз. После окончания последнего такта при  $t = 878,4$  с в счетчиках  $17-20$  фиксируются следующие промежуточные результаты измерений:  $M_{0\alpha} = nN_{0\alpha}/m$ ;  $M_{0\beta} = nN_{0\beta}/m$ ;  $\Delta M_{\alpha} = n\Delta N_{\alpha}/m$  и  $\Delta M_{\beta} = n\Delta N_{\beta}/m$ , — которые по соответствующей команде синхронизатора записываются в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) микро-ЭВМ  $9$  (см. рис. 1, а). При  $t = 900$  с производится внутренний сброс времязадающих узлов системы и начинается новый 15-минутный цикл работы установки. Описанные циклы могут автоматически повторяться в течение суток.

Численные значения промежуточных результатов для  $\omega_1 = \omega_0$  и  $\omega_m = 1,07 \cdot 10^9$  с $^{-1}$  таковы:  $M_{0\alpha} = M_{0\beta} = 3,12 \cdot 10^3$  и  $\Delta M_{\alpha} = \Delta M_{\beta} = 0$ . При максимально допустимом отклонении центральной частоты ИЧП от  $\omega_1$  ( $1,88 \cdot 10^4$  с $^{-1}$ ) получаем  $M_{0\alpha} = 3,17 \cdot 10^3$  и  $\Delta M_{\alpha} = 180$ . В этом случае отношение  $|\omega_0 - \omega_1|/\omega_m < 0,18$  и относительная погрешность АЦП в соответствии с графиками рис. 2 не превосходит 0,1%.

Для вывода накопленной информации и ее арифметической обработки оператор вводит соответствующие команды в микро-ЭВМ. При этом из ОЗУ поочередно извлекаются операнды, отвечающие каждому осуществленному измерительному циклу, и вычисляются коэффициенты  $\eta^{(l)}$  ( $l = 1, 2, \dots, 102$ ), характеризующие изменение выбранного параметра четырехполюсника во времени:

$$\eta^{(l)} = (M_{0\alpha}/M_{0\beta}) [1 - \gamma(\Delta M_{\alpha}^2 - \Delta M_{\beta}^2)].$$

Величины  $\eta^{(l)}$  и искомые сопротивления связаны соотношением

$$Z_{ij}^{(l)} = \eta^{(l)} R_0 10^{(\alpha-\beta)/20},$$

где  $R_0$  — передаточное сопротивление трансформатора тока.

Функциональная схема микро-ЭВМ, используемой в установке, представлена на рис. 3. Ее состав: накопитель, редактор операндов, редактор ввода в микрокалькулятор, преобразователь кодов  $10$ , программное устройство  $12$  и микрокалькулятор  $11$  на базе комплекта БИС БЗ-24. Накопитель емкостью  $4 \times 1024$  бит образует ОЗУ  $4$  и счетчиком адреса  $5$ . Редактор операндов используется для размещения информационных полубайтов в ОЗУ при записи, для нахождения заданных зон в режиме считывания и «выстраивания» содержимого этих зон с целью получения операнда. Предусмотрен автоматический контроль за правильностью разбиения ОЗУ на зоны при записи информации (узел фазировки  $6$  и ячейка ИЛИ  $3$ ).

Редактор операндов при считывании образует параллельный двоичный код операндов. Для ввода в микрокалькулятор необходимо представить информацию в последовательном десятичном коде, поэтому выведенный из ОЗУ массив обрабатывается сначала преобразователем  $8$  параллельного двоичного кода в двоично-десятичный, а затем мультиплексором-дешифратором  $13$ , который является частью редактора ввода и управляется микропрограммным устройством ввода  $9$ . Редактор ввода содержит также аналоговые ключи  $14$  для согласования КМОП — логики установки с микрокалькулятором. Через эти же ключи происходит ввод в

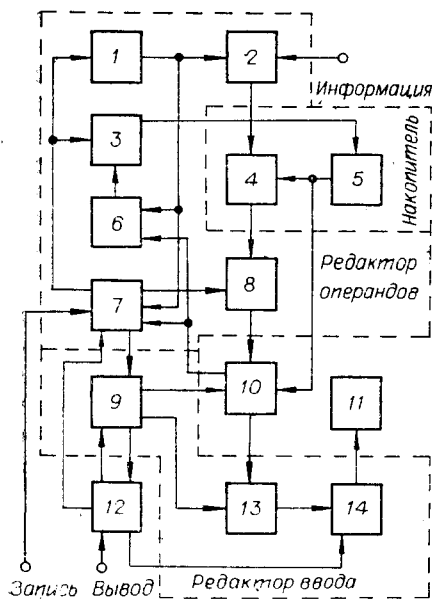


Рис. 3. Функциональная схема специализированной микро-ЭВМ:

1 — контрольный распределитель, 2 — входной коммутатор, 3 — ячейка ИЛИ, 4 — ОЗУ, 5 — счетчик адреса, 6 — узел фазировки, 7 — блок логики, 8 — регистр операндов, 9 — микропрограммное устройство ввода, 10 — преобразователь кода, 11 — микрокалькулятор БЗ-24, 12 — программное устройство, 13 — мультиплексор-дешифратор, 14 — ключи ввода.

микрокалькулятор функциональных команд, вырабатываемых программным устройством 12.

Последний узел работает только в режиме считывания содержимого ОЗУ и обеспечивает управление всеми узлами микро-ЭВМ в процессе подготовки результата (величин  $\eta^{(i)}$ ). Для увеличения быстродействия системы предусмотрено асинхронное взаимодействие программного устройства, преобразователя кодов, редакторов ввода и операндов.

По  $l$ -й команде оператора программное устройство 12 вырабатывает заданную последовательность функциональных команд, необходимых для вычисления очередного значения искомой величины  $\eta^{(i)}$ . Эти команды вводятся в микрокалькулятор 11 посредством ключей 14 или через блок логики 7, запускают редактор операндов, который производит соответствующие обращения к ОЗУ и преобразование содержимого опрошенных ячеек. В последнем случае начинает работать микропрограммное устройство 9 редактора ввода информации в микрокалькулятор. После выполнения этой операции редактор ввода выдает разрешение программному устройству на продолжение работы. Ввод констант осуществляется без обращения к редактору операндов.

С целью увеличения надежности системы осуществляется автономная проверка микро-ЭВМ в составе установки. Для этого используются встроенные в устройство имитатор управляющих потенциалов, синхронизаторы и формирователь тестовых сигналов.

Обработка результатов полевых наблюдений, выполненных в течение суток, показала, что при  $U = E$  математическое ожидание и дисперсия относительной погрешности измерений величин  $\eta^{(i)}$  составляют соответственно  $2 \cdot 10^{-3}$  и  $1,2 \cdot 10^{-3}$ . Часовая серия промышленных взрывов на асбестовом карьере, удаленном от пункта наблюдений на 40 км, фиксируется эквивалентным возрастанием удельного сопротивления горных пород на 2,3%.

Опыт разработки описанной выше полевой электроразведочной системы показал, что использование измерительного устройства и встроенной специализированной микро-ЭВМ существенно увеличивает результирующую точность системы и обеспечивает ее автоматическое функционирование. При обработке промежуточных результатов измерений в реальном масштабе времени и фиксации в ОЗУ только искомой информации заметно уменьшается объем ОЗУ и упрощаются его связи с калькулятором.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вешев А. В. Электропрофилирование на постоянном и переменном токе.— Л.: Недра, 1965.
2. Барсуков О. М. Явление изменения эффективного удельного электрического сопротивления горных массивов перед местными землетрясениями: Открытие. Диплом № 216. Заявка № ОТ-8997 от 26 мая 1975 г.— ОИПОТЗ, 1979, № 43, с. 3.

Поступила в редакцию 7 сентября 1981 г.;  
окончательный вариант — 7 января 1982 г.