

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ



21

ВЫПУСК

*Автоматизация
сбора и обработки
сейсмической
информации*

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю. ШМИДТА

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Серия основана в 1961 году

Автоматизация сбора и обработки сейсмической информации

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

21 выпуск



МОСКВА "НАУКА"
1990



5246

Автоматизация сбора и обработки сейсмической информации. — М.: Наука, 1989. (Сейсмические приборы; Вып. 21). — ISBN 5-02-000730-7

В сборнике представлены статьи, посвященные описанию новых сейсмометрических систем (наземных, скважинных, донных), вопросам методики, метрологии, результатам исследований сейсмической аппаратуры с целью повышения надежности и точности, вопросам интерпретации сейсмической информации.

Сборник рассчитан на специалистов в области геофизического приборостроения и сейсмологов.

Ответственные редакторы:

доктор технических наук *Е.С. Борисевич*

кандидат физико-математических наук *А.В. Рыков*

Рецензенты: *И.М. Розенберг, Л.Н. Рыкунов*

Редактор *В.К. Белова*

1. НОВАЯ АППАРАТУРА

УДК 550.34

С.М. Крылов, В.Т. Левшенко

СЕЙСМОМАГНИТНЫЙ ДАТЧИК

Создание эффективных методов прогноза землетрясений во многом зависит от наличия возможности детального изучения явлений, сопровождающих процесс подготовки землетрясения (сейсмических, магнитных, электромагнитных и др.). Существующие инструментальные средства не всегда обеспечивают необходимую точность при регистрации таких явлений. Так, например, во многих случаях требуется одновременная регистрация сейсмического и переменного магнитного полей с целью определения их взаимосвязей. Поскольку до настоящего времени такая регистрация осуществлялась разными приборами (сейсмометрами и магнитометрами), сравнительные временной, амплитудный и фазовый анализы полученных данных были крайне неточными из-за трудностей сопоставления характеристик приборов.

Для повышения точности таких наблюдений в Институте физики Земли АН СССР была разработана конструкция датчика, дающего возможность проводить одновременную регистрацию одним прибором сейсмического и магнитного волновых полей с последующим разделением этих полей на записях [1]. Конструкция прибора, именуемого в дальнейшем "сейсмомагнитный датчик", включает в себя два строго идентичных чувствительных элемента, выполненные в виде катушек с ферромагнитными сердечниками и соответствующей электрической схемой. При компоновке прибора оси катушек чувствительных элементов располагаются параллельно друг другу, при этом один из элементов жестко скрепляют с основанием корпуса прибора, выполненным из немагнитного материала, например латуни, а другой прикрепляют к верхней части корпуса на вертикально расположенной относительно поверхности Земли упругой нити таким образом, что этот элемент является маятником, имеющим возможность совершать крутильные колебания вокруг вертикальной оси. Датчик жестко скрепляют с поверхностью, ориентируя таким образом, чтобы оси катушек были расположены перпендикулярно силовым линиям геомагнитного поля. Электрическая схема (рис. 1) содержит предварительные усилители (ПУ) и блок вычитания (БВ). Запись полученных сигналов производится двухканальным регистратором (РР). Переменное магнитное поле возбуждает в подвешенном на упругой нити чувствительном элементе (КП) и в жестко скрепленном с корпусом чувствительном элементе (КН) одинаковую по величине ЭДС, поскольку элементы идентичны. После предварительного усиления ЭДС с КН подается для записи на второй канал регистратора РР. Со схемы вычитания поступает в это время на первый канал РР нулевая ЭДС, как результат вычитания ЭДС в КН и КП. При воздействии на датчик крутильной составляющей сейсмического волнового поля мы получаем несколько другую картину. Под воздействием сейсмического сигнала элемент КН поворачивается вместе с корпусом прибора в магнитном поле Земли и в нем возбуждается ЭДС, пропорциональная амплитуде и частоте сигнала. Элемент КП за счет подвеса практически не подвергается сейсмическому воздействию, и возбуждаемая в нем в то же время ЭДС по величине существенно меньше, чем ЭДС, возбуждаемая в

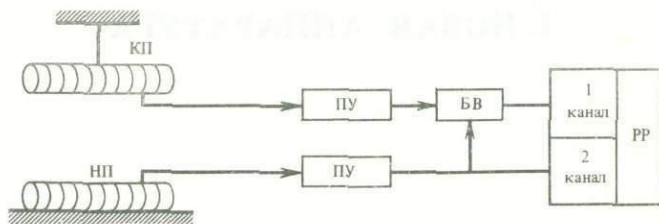


Рис. 1. Принципиальная схема сейсмомагнитного датчика

КН. Канал 2 РР запишет сейсмический сигнал, но в то же время на канале 1 РР запишется не нулевой сигнал. Таким образом, на канале 2 регистратора мы будем иметь записи как сейсмических, так и электромагнитных сигналов, на канале 1 будет прописываться сигнал только при воздействии на прибор сейсмического сигнала, что является критерием распознавания природы сигналов, записанных на канале 2.

Рассмотрим более детально конструкцию прибора. Датчик, представляющий собой многovitkovую катушку с ферромагнитным сердечником, преобразует в напряжение компоненту вариаций естественного магнитного поля, направленную по оси датчика. При угловых смещениях оси датчика относительно земного геомагнитного поля в нем наводится сигнал, который можно выразить следующим образом:

$$U = K_n H_0 \sin \varphi \sin \beta \cos \theta,$$

где U — напряжение на выходе датчика; H_0 — модуль вектора земного геомагнитного поля; K_n — коэффициент преобразования магнитного поля в напряжение на выходе датчика; φ — угол между направлением геомагнитного поля и осью датчика; β — угловое смещение датчика; θ — магнитное наклонение в точке наблюдения.

В формуле отсутствует зависимость наведенного в датчике напряжения от частоты. Причины этого изложены ниже. Как следует из формулы, наибольшей чувствительностью к угловым колебаниям сейсмомагнитный датчик будет обладать в случае, если его ось развернуть точно поперек магнитного меридиана ($\sin \varphi = 1$), датчик не будет реагировать на угловые смещения, если его ориентировать точно по геомагнитному полю. Если принять $H_0 = 0,5 \text{ Э}$, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, каждая угловая секунда смещения датчика будет соответствовать $170 \cdot 10^{-3} j$ ($1j = 10^{-5} \text{ Э}$). Пороговая чувствительность может быть доведена до $0,2 \cdot 10^{-3} j$, т.е. сейсмомагнитный датчик может в принципе регистрировать угловые смещения в тысячные доли угловой секунды. Однако поле постоянного магнита — земное геомагнитное поле испытывает вариации в основном магнитосферного и грозового происхождения, амплитуда которых может изменяться в зависимости от геомагнитной активности, времени суток и частоты от сотен гамм до нескольких миллигамм [2], что может давать сигналы, эквивалентные смещениям в десятки угловых минут.

В предлагаемой конструкции сейсмомагнитного датчика, как уже было отмечено, подавление сигналов, связанных с геомагнитными пульсациями, достигается применением двух одинаково ориентированных идентичных элементов, один из которых жестко скреплен с основанием корпуса, а другой подвешен за центр тяжести на нити, прикрепленной к верхней части корпуса. Видоизменив способ подвеса датчика, можно получить на выходе сигнал, обусловленный поступательным смещением почвы.

Таким образом, для крутильных колебаний

$$U_1/C = H_p + S_1, \quad U_2/C = H_p + S_2,$$

где U_1, U_2 — напряжения на выходах катушек чувствительных элементов; C [Э/нТл] — коэффициент преобразования поля в напряжение на выходе катушки; H_p — магнитное поле пульсаций; S_1, S_2 — сигналы, выраженные в единицах напряженности магнитного

поля, угловых смещений катушек (фиксированной и подвешенной);

$$S_1 = SK_{sm},$$

где K_{sm} — реакция крутильного маятника на угловые смещения почвы;

$$\Delta S = S - S_1 = (S - SK_{sm}) = S(1 - K_{sm}),$$

где ΔS — выход разностного канала сейсмомагнитного датчика.

Из этих соотношений мы видим, что сейсмомагнитный датчик позволяет получить чисто сейсмическую информацию, обусловленную крутильными смещениями. Имея такой сигнал, можно вычестить его из выходного сигнала фиксированного датчика и реализовать таким образом сейсмоустойчивый компонентный датчик магнитного поля. Эта операция не составляет особой проблемы, так как K_{sm} выражается простой функцией, куда входят известные величины — момент инерции датчика, упругость подвеса и степень жидкостного демпфирования.

Таким образом, суть сейсмомагнитного датчика состоит в том, что, вводя намеренно с помощью подвеса известные амплитудно-фазовые искажения сейсмического сигнала в один из каналов сдвоенного индукционного магнитометра, мы получаем возможность, во-первых, восстановить сейсмический сигнал и, во-вторых, используя этот принцип при конструировании компонентного индукционного магнитометра, освободить его от сейсмической помехи.

Рассмотрим конструкцию установки подробнее. За основу была взята схема индукционного магнитометра [3], применяемого в отделе электромагнитного поля Земли ИФЗ АН СССР для регистрации геомагнитных пульсаций. В таком магнитометре используются активные индукционные датчики переменного магнитного поля с глубокой отрицательной обратной связью (ООС) по измеряемой величине — магнитному полю. Блок-схема активного датчика приведена на рис. 2. Он состоит из собственно датчика, высококачественного усилителя постоянного тока A_1 (УПТ) и цепи обратной связи по магнитному полю (R_1, L_2).

Собственно датчик представляет собой многовитковую катушку ($n = 100\,000$ витков) с сердечником из материала с высокой магнитной проницаемостью (пермаллой 79НМ). Сердечник представляет собой монолитный круглый стержень диаметром 1,5 см, длиной 160 см. Эффективная магнитная проницаемость сердечника около 1800. Коэффициент преобразования датчика на частоте 1 Гц около 200 мВ/нТл, частотная характеристика датчика представляет собой сильно затухающую резонансную кривую с максимумом на частотах 7–10 Гц. Отрицательная обратная связь по полю подается с выхода предусилителя на дополнительную обмотку датчика L_2 ($n = 1000$ витков). При достаточной глубине ООС по полю коэффициент передачи датчика от поля к напряжению на выходе УПТ (A_1) определяется только постоянной обмотки L_2 | C_j [нТл/мкА] и резистором в цепи ООС R_1 : $K_H = R_1/C_j$, т.е. не зависит от чувствительности датчика, коэффициента усиления УПТ и от частоты сигнала. Если в датчике без ООС по полю на достаточно низких частотах, где не сказывается индуктивность и собственная емкость обмотки L_1 , наведенный сигнал пропорционален скорости изменения магнитного потока, то при введении ООС по полю амплитудно-частотная и фазовая характеристики становятся плоскими в широком частотном диапазоне (0,001–100 Гц), а датчик реагирует не на производную от магнитного потока в сердечнике, а на сам поток. Именно поэтому часть активного датчика, включающая в себя собственно датчик, УПТ и цепи ООС по полю, называется флюксметром (флюкс — поток). Коэффициент преобразования флюксметра, определяемый C_j и R_1 , равен $5 \cdot 10^3$ мкВ/нТл. Полезным следствием ООС по полю является тот факт, что переменный магнитный поток в сердечнике погашен током обратной связи. Это значит, что датчик не имеет переменного во времени магнитного момента, связанного с пульсациями.

Сигнал с выхода флюксметра подается на каскад усиления на микросхеме A_2 через переходную цепочку C_1R_2 . Этот каскад предназначен для усиления сигнала до уровня, достаточного для передачи его по кабелю. Конструктивно предусилитель выполнен в

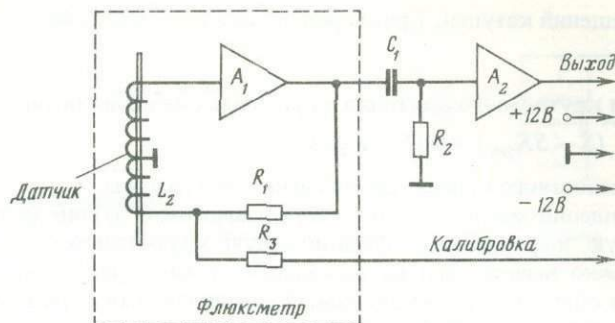


Рис. 2. Блок-схема активного индукционного датчика магнитного поля

металлическом кожухе и располагается рядом с датчиком. С пультом управления предусилитель соединен экранированным длинным кабелем с разъемами. По этому кабелю на предусилитель подается питание и сигнал калибровки, а также снимается для дальнейшей обработки усиленный полезный сигнал.

Для применения в составе сейсмомагнитного датчика коэффициент усиления УПТ магнитометра увеличен с 10^4 до 10^5 , что при неизменных C_f и R_1 сдвинуло нижнюю границу полосы пропускания флюксметра с $f_H = 0,001 \div 0,0001$ Гц, а также увеличило степень гашения переменного магнитного потока в сердечнике с 60 до 80 дБ. Поскольку мы предполагали использовать в экспериментах диапазон частот 0,01–10 Гц, можно считать, что вследствие принятых мер: 1) амплитудные и фазовые характеристики флюксметров в рабочей полосе частот полностью идентичны, а результирующие АЧХ и ФЧХ датчиков определяются постоянными времени переходных цепочек $C_f R_2$, которые подобраны одинаковыми с высокой точностью; 2) собственный переменный магнитный момент датчика практически сведен к нулю глубокой ООС по полю. Обмотки ООС по полю используются одновременно как калибровочные. Их постоянные C_f [нТл/мкВ] определены с точностью около 1% в специальном эталонированном соленоиде. При калибровке в обмотки подается от генератора строго определенный по амплитуде и частоте сигнал.

Блок-схема всей установки в целом приведена на рис. 3. Датчик был изготовлен и установлен в специальном бетонном бункере в обсерватории "Согра" ИФЗ АН СССР. Собственные резонансы подвешенного датчика были погашены с помощью жидкостного демпфирования. С этой целью снизу к датчику прикреплены две взаимно перпендикулярные лопасти, погруженные в сосуд с вязкой демпфирующей жидкостью (автол). Регулировкой глубины погружения лопастей был достигнут режим работы датчика, близкий к критическому, для крутильных колебаний вокруг вертикальной оси со свободным периодом порядка 50 с и вокруг горизонтальной оси с периодом около 3 с. Выводы подвешенного датчика выполнены тонким проводом в тефлоновой изоляции. Провод обернут несколько раз вокруг подвеса и затем подведен к предусилителю так, что дополнительных упругих сил в системе не создается. Неподвижный датчик жестко прикреплен к цементному полу бункера. Датчики находятся друг от друга на расстоянии 70 см. Бетонный бункер закрыт сверху деревянной крышкой, несколькими слоями брезента и завален землей для устранения конвекции воздуха и сохранения постоянного температурного режима.

Блок-схема пульта управления приведена на рис. 4. Сигналы с датчиков поля поступают на схему вычитания, на выходе которой выделяется разностный сигнал. Схема вычитания имеет регулировку, которая позволяет подстраивать точность выполнения этой операции как по калибровочным сигналам, так и по естественному фону. Была получена результирующая точность не менее 1% с учетом всех факторов электрической разбалансировки каналов (неидентичность АЧХ и ФЧХ, неравенство K_H). При этом точность вычитания в середине рабочего диапазона датчика (0,05–2 Гц) была в преде-

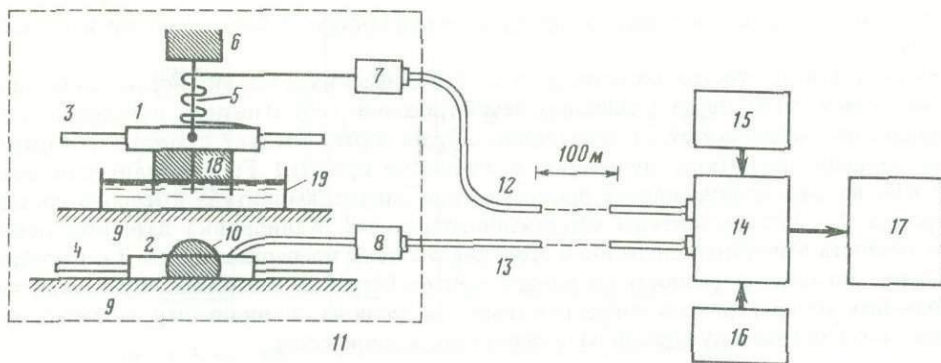


Рис. 3. Блок-схема сейсмомангнитной установки

1, 2 – датчики, подвешенный и фиксированный; 3, 4 – сердечники; 5 – подвес (полоска фольги); 6 – брус; 7, 8 – предусилители; 9 – бетонный постамент; 10 – цемент для фиксации датчика; 11 – бункер; 12, 13 – кабели; 14 – пульт управления с фильтрами и схемой вычитания; 15 – схема питания; 16 – калибровочный генератор; 17 – самописец; 18 – лопасти демпфирования; 19 – сосуд с демпфирующей жидкостью

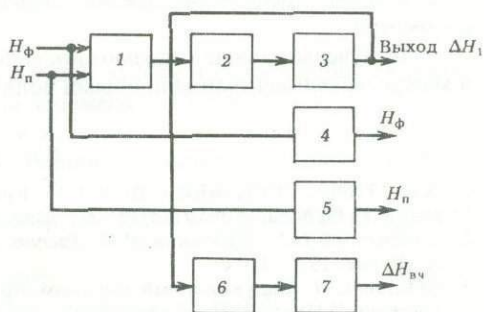


Рис. 4. Блок-схема цепей обработки сигнала в пульте управления

1 – схема вычитания; 2 – усилитель; фильтр НЧ 8 Гц; 3 – разностного канала, 4 – канала H_ϕ ; 5 – фильтр НЧ 8 Гц канала подвешенного датчика; 6 – фильтр ВЧ 0,06 Гц; 7 – усилитель разностного канала

лах 0,1–0,2%. Ближе к краям диапазона точность падала до 1% из-за неидентичности ФЧХ, обусловленной некоторым неравенством постоянных времени переходных цепочек в предусилителях.

Далее разностный сигнал поступает на дополнительный усилитель (2) и на фильтр НЧ (3), подавляющий все частоты выше 8 Гц. Аналогичные фильтры установлены в прямых каналах H_ϕ и H_n (4, 5). Количество фильтров можно было бы сократить, установив их непосредственно после кабеля, но при этом точное вычитание стало бы невозможным из-за неизбежной разбалансировки ФЧХ фильтров.

Разностный сигнал с выхода НЧ-фильтра поступает на ВЧ-фильтр с граничной частотой 0,06 Гц (6) и далее на дополнительный усилитель (7). На выходе этого канала мы могли наблюдать дополнительно усиленную высокочастотную часть спектра разностного сигнала. К выходам подключены соответствующие каналы самописца. Временные марки на ленту подавались с кварцевых часов. После каждого цикла регистрации проводилась калибровка датчиков.

Регистрация проводилась в течение августа–сентября 1987 г. Перед началом регистрации были проведены опыты по определению чувствительности датчика к сейсмическим и магнитным полям, возбуждаемым искусственно. С этой целью по профилю длиной 150 м с интервалом 10 м проводились удары, возбуждающие в грунте сейсмический сигнал, который хорошо записался на разностном канале. Возбуждая переменное магнитное поле в этих же точках путем перемещения в вертикальной плоскости постоянного магнита с $f = 0,2$ Гц, мы не обнаружили сигнала на разностном канале, в то время как он хорошо прописался на обычном канале. Таким образом, было установлено,

что датчик обладает избирательной чувствительностью к сейсмическим и магнитным полям.

В результате регистрации естественных сейсмических и магнитных полей были получены записи сигналов от удаленных землетрясений, геомагнитных пульсаций, а также записи локальных помех от проходящего транспорта. Следует отметить тот факт, что при наличии магнитных пульсаций в диапазоне 0,01–0,1 Гц с амплитудой порядка 10 нТл на разностном канале прописывается сигнал, амплитуда которого составляет порядка 10–15% амплитуды естественного сигнала. Калибровка датчиков показала, что точность вычитания сигналов в этом диапазоне не превышает 1–2%. Таким образом, наличие сигнала на разностном канале при регистрации магнитных пульсаций нельзя объяснить аппаратными погрешностями. Их природа, по-видимому, может быть связана с воздействием пульсаций на поверхность земной коры.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и опробована конструкция сейсмомагнитного датчика, позволяющего одним прибором регистрировать с высокой точностью в широком диапазоне частот переменное сейсмическое и магнитное волновые поля с последующей их идентификацией.
2. Найден способ компенсации сейсмической помехи на выходе индукционного магнитометра.
3. Получены данные о возможности наличия связи между магнитными пульсациями и микросейсмическими волновыми полями.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 1116405 СССР, МКИ G 01 V 1/16. Крутильный сейсмометр / В.Т. Левшенко, О.Б. Хаврошкин, В.И. Шубина. № 3619714/18–25; Заяв. 11.07.83; Оpubл. 30.09.84, Бюл. № 36.
2. Клейменова Н.Г., Пудовкин М.И., Распов О.М. Возмущение электромагнитного поля Земли. Л.: Наука, 1975. 270 с.
3. Крылов С.М. Индукционный магнитометр в системе обработки данных в реальном масштабе времени. // МикроЭВМ в геомагнитных исследованиях. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. С. 21–35.

УДК 550.34

З.И. Аранович, Б.Т. Воробьев, Н.Л. Трапезников, Н.В. Трифонов **СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ С ВИДИМОЙ ЗАПИСЬЮ ССК**

Несмотря на развитие современных цифровых средств регистрации, передачи и автоматизированной обработки сейсмологической информации, непрерывная аналоговая запись сейсмических явлений на осциллографической бумаге различных типов остается и, по-видимому, достаточно долго будет оставаться широко распространенным способом регистрации на региональных и опорных сейсмических станциях. Некоторые особенности двух способов аналоговой регистрации.

1. Фотогальванометрическая регистрация:

а) относительно длительный процесс получения видимой записи на фотобумаге (особенно при необходимости нести службу срочных донесений о сильных землетрясениях и обеспечивать оперативное слежение за характером сейсмичности);

б) сильная зависимость качества записи от амплитуды и частоты записываемых колебаний, т. е. от скорости движения светового пятна;

в) высокая стоимость носителя записи, содержащего серебро;

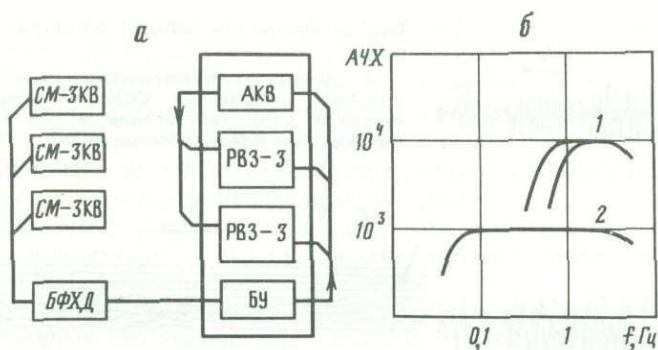


Рис. 1. Блок-схема (а) и амплитудно-частотные характеристики (б)
1 — ССК для двух режимов работы; 2 — ССС

г) сложность регулировки в широких пределах увеличения сейсмографа при неизменной форме амплитудно-частотной характеристики;

д) сложность метрологической аттестации сейсмографа прямым методом при выпуске из производства.

2. Видимая запись:

а) возможность немедленного получения видимой записи происходящих явлений;

б) независимость качества записи от скорости перемещения пера;

в) низкая стоимость бумажного носителя записи;

г) простота регулировки чувствительности станции при заданной форме амплитудно-частотной характеристики каналов;

д) возможность метрологической аттестации при выпуске из производства прямым методом;

е) простота обслуживания и установки станции;

ж) возможность подключения цифровой регистрирующей аппаратуры.

Следует отдать предпочтение видимой записи, обладающей целым рядом преимуществ по сравнению с принятым на большинстве опорных и региональных сейсмостанций фотогальванометрическим способом регистрации [1].

По мере внедрения цифровых регистрирующих систем сейсмографы с аналоговой записью перестанут играть роль основного инструмента в сейсмологических исследованиях. Однако непрерывная аналоговая запись, получаемая параллельно цифровой или с выхода цифроаналогового преобразователя, остается чрезвычайно полезной обработчику сейсмологической информации. Аналоговая сейсмограмма обеспечивает визуальный контроль сейсмической обстановки, позволяет оценить число пропущенных и зарегистрированных сейсмических явлений аппаратурой, работающей в ждущем режиме, время вступления и сам характер явления, что существенно облегчает поиск требуемой информации, записанной на магнитной ленте.

В настоящей работе описывается разработанная авторами короткопериодная сейсмическая станция ССК с видимой записью, построенная на базе серийно выпускаемых узлов [2, 3]. Состав станции и принцип работы поясняются блок-схемой, приведенной на рис. 1.

Сейсмический сигнал, преобразованный вертикальным и двумя горизонтальными сейсмометрами СМ-ЗКВ в электрическое напряжение, поступает на вход блока формирования характеристик БФХД, осуществляющего усиление сигнала и коррекцию частотных характеристик сейсмометров. Выходной сигнал БФХД по кабелю передается в блок управления (БУ), предназначенный для регулировки масштаба записи, и далее на входы регистров видимой записи РВЗ-З основного канала и канала пониженной чувствительности. Минутные и часовые метки времени на записи обеспечиваются кварцевыми часами АКВ. В составе станции имеются системы импульсной калибровки сейсмомет-

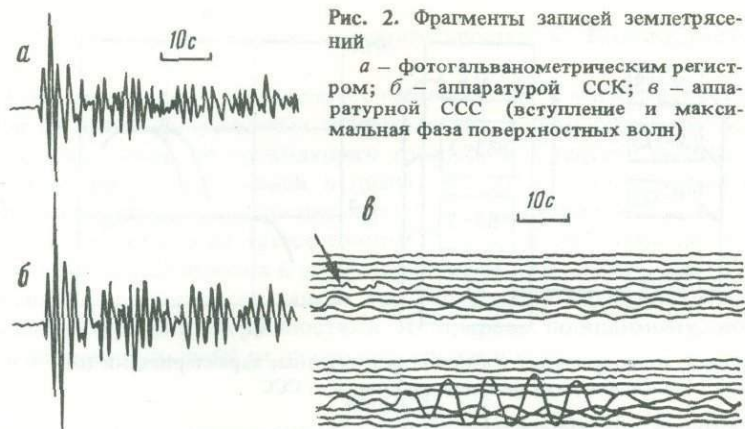


Рис. 2. Фрагменты записей землетрясений

a — фотогальванометрическим регистром; *б* — аппаратурой ССК; *в* — аппаратурой ССК (вступление и максимальная фаза поверхностных волн)

рических каналов и сигнализации о превышении сейсмическим сигналом заданного уровня.

Предусмотрены два режима работы станции — широкополосный и узкополосный. Тот или иной вариант выбирается в зависимости от местных условий установки станции (см. рис. 1). Режим работы и увеличение устанавливаются соответствующими переключателями блока управления. Блоки АКВ, РВЗ-3, БУ с блоком питания размещены в стойке. ССК имеет также выход с коэффициентом преобразования 40 кВ/м для подключения цифровых регистрирующих устройств.

Ниже приводятся основные технические данные ССК, мелкосерийное производство которой осуществляет ОКБ ИФЗ АН СССР.

Полоса пропускания, Гц	0,55–5 либо 1–5
Увеличение (регулируется ступенями)	От 200 до 100 000
Количество каналов	
основных	3
пониженной чувствительности	3
Максимальная амплитуда записи, мм	± 40
Носитель информации	Бумага, склеенная в кольцо
- ширина бумаги, мм	290
длина бумажного кольца, мм	900
Запись чернилами в прямоугольных координатах по винтовой линии	
скорость движения бумаги, мм/мин	7,5; 15; 30; 60; 120
шаг винтовой линии, мм	0,78; 1,57; 3,14; 6,28; 12,56
Напряжения источников питания, В	
переменного тока	220
постоянного тока (резервного)	24

Разрешимость видимой записи примерно аналогична записям на фотобумаге. Несколько хуже запись сигналов с малой амплитудой (≤ 2 мм) и высокой частотой (из-за трения пера о бумагу и недостаточно тонкой линии записи). Однако запись больших амплитуд не хуже, благодаря независимости качества записи от скорости движения пера.

На рис. 2 приведены фрагменты записей землетрясения, зарегистрированного 21.06.87 г. на сейсмической станции "Джебрайл" аппаратурой ССК и аналогичной аппаратурой (СМ-3КВ + БФХД), но с гальванометрической регистрацией. Детальный сравнительный анализ двух способов регистрации проведен в [4].

Блочный принцип построения станции позволяет использовать в ее составе более перспективные регистры, например с видимой записью на металлизированной бу-

маге, отличающейся высоким качеством, а также практически любые типы сейсмометров, расширяя таким образом области применения станции.

Вариантом исполнения станции с видимой записью может быть среднепериодная сейсмическая станция (условно ССС) с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), близкой к АЧХ сейсмографов СКД (см. рис. 1), в состав которой входят сейсмометры СКД (большой парк этих приборов имеется в сети сейсмических станций) и длиннопериодный вариант блока формирования характеристик.

На рис. 2 приведены фрагменты записи удаленного землетрясения, зарегистрированного 14.04.87 г. аппаратурой такого типа, установленной в качестве вспомогательной на сейсмостанции "Симферополь".

Можно ожидать, что станции типа ССК найдут широкое применение при организации каких-либо временных наблюдений, для совместной работы с цифровой регистрирующей аппаратурой, а также в сетях региональных и опорных сейсмических станций. В последнем случае пока нет широкодоступного регистратора с записью на металлизированной бумаге станции такого типа могут если не полностью заменить фотогальванометрическую регистрацию, то служить вспомогательной аппаратурой для оперативного определения характера сейсмических явлений и оценки основных параметров землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Кирноса, В.М. Фреда. М.: Наука, 1974. 244 с.
2. Аранович З.И., Корчагина О.А., Трапезников Н.Л., Фабрициус З.Э. Опыт эксплуатации сейсмометрических каналов, построенных на базе серийных узлов // Регистрация и обработка информации в сейсмологии. М.: Наука, 1983. С. 143–146. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
3. Розенберг И.М., Трапезников Н.Л. Повышение чувствительности канала регистрации с электрографическим осциллографом АСЭО-1 // Разработка и исследование сейсмической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 83–86. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)
4. Агаларова Э.А., Аранович З.И., Корчагина О.А. и др. Результаты сравнения регистрационных возможностей приборов с фотогальванометрической и видимой регистрацией. Наст. сб.

УДК 550.34

Г.А. Ахсахалян, А.С. Гаспарян, Т.А. Дозоров,
С.А. Мхитарян, Г.К. Нагапетян

ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНЫЙ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕЙСМОМЕТР ДЛЯ ДОННЫХ СТАНЦИЙ

Одними из главных направлений развития современной морской сейсмологии являются изучение длиннопериодной части спектра сейсмических колебаний и повышение чувствительности сейсмических станций. Длиннопериодные сейсмические волны являются важными источниками информации о внутреннем строении Земли, механизме и параметрах очагов землетрясений. Поэтому результаты наблюдения необходимы в геодинамических и геоструктурных исследованиях, задачах прогнозирования землетрясений и идентификации подземных ядерных испытаний. Указанные параметры целиком определяются возможностями сейсмического приемника станции. Подавляющее большинство существующих донных станций не способно записывать сейсмические колебания с частотой ниже 0,1 Гц.

Для определения требуемой чувствительности сейсμοприемника необходимо иметь

полную картину сейсмических шумов на дне водных бассейнов в интересующем диапазоне спектра и выбрать порог чувствительности в зависимости от их уровня.

Средняя кривая спектра донного шума имеет величину примерно 10^{-8} м на частоте 1 Гц (по ускорению $4 \cdot 10^{-7}$ м/с²) и 10^{-5} м на частоте 0,1 Гц (по ускорению $4 \cdot 10^{-6}$ м/с²) и увеличивается декадно по смещению при снижении частоты на октаву [1, 2].

В работах [3, 4] показано, что сейсмометры с пьезоэлектрическими преобразователями наряду с практически идеальными амплитудно- и фазочастотными характеристиками имеют также высокие метрологические и эксплуатационные параметры. Однако при снижении частоты ниже 0,1 Гц появляются большие погрешности, связанные с пьезоэлектрическими явлениями в пьезокерамических материалах. Кроме того, на дне водных бассейнов температурные условия являются наиболее благоприятными (4–10°С) для применения пьезоэлектрических сейсмометров и при использовании методов пассивного термостатирования можно почти полностью исключить их влияние на метрологические параметры.

На рис. 1 приведена конструкция пьезоэлектрического сейсмометра. В инертной массе 1, выполненной в виде куба, сделаны три взаимно перпендикулярных отверстия, проходящие через центр. В центре куба помещен шарик 2 диаметром на 1–2 мм меньше, чем диаметр отверстия. Шарик центрируется в центре куба втулками 3, в которых помещены пакеты пьезоэлементов 4. Контакт с пьезоэлементом выводится через контактные шарики 5 и контактные винты 6. В каждом из шести пакетов пьезоэлементов последовательно установлено по пять пьезоэлементов, которые электрически соединены параллельно.

Такое соединение пьезоэлементов предусмотрено для работы вместе с усилителем заряда. Как показано в [5], применение усилителя заряда позволяет соответствующим выбором параметров цепи обратной связи уменьшать нижнюю частоту сейсмометра $f_H = 0,16/R_{o.c}C_{o.c}$, где $R_{o.c}$, $C_{o.c}$ – сопротивление и емкость в цепи обратной связи усилителя.

При использовании усилителя напряжения уменьшение нижней частоты возможно только за счет уменьшения чувствительности, так как $f_H = 0,16/R_{экв}C_{экв}$, где $R_{экв} = R_0 \parallel R_{вх}$ – эквивалентное сопротивление пьезоэлектрического преобразователя и измерительной цепи; R_0 – сопротивление пьезоэлемента; $R_{вх}$ – входное сопротивление измерительной цепи; $C_{экв} = C_0 + C_{вх}$ – эквивалентная емкость пьезоэлектрического преобразователя и измерительной цепи, C_0 – емкость пьезоэлемента, $C_{вх}$ – входная емкость усилителя. Здесь надо учитывать, что сам пьезоэлемент обладает постоянной времени $\tau_0 = R_0C_0$, которая не зависит от его размеров, так как $R_0 = \rho_v l/s$ и $C_0 = \epsilon \epsilon_0 s/l$, а $\tau_0 = \epsilon \epsilon_0 \rho_v$, где ρ_v – удельное объемное сопротивление пьезоэлемента; ϵ – диэлектрическая проницаемость пьезокерамики; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – относительная диэлектрическая проницаемость; s – поперечное сечение пьезоэлемента; l – длина пьезоэлемента. Для большинства пьезокерамических материалов $\tau_0 \approx 1,5$ с, поэтому для уменьшения частоты f_H до 0,01 Гц необходимо в усилителе напряжения иметь $C_{вх} = 10 C_0$, при котором чувствительность сейсмометра уменьшается в 10 раз.

Из приведенного анализа видно, что для снижения нижней частоты $f_H < 0,1$ Гц целесообразно использовать усилитель заряда.

На рис. 2, а приведена схема усилителя заряда. Входной каскад VT1 на транзисторах 2ПС104Е является истоковым повторителем и работает в микроотоковом режиме. Транзисторы VT2 служат для согласования входного каскада со входом операционного усилителя ДА1. Операционный усилитель ДА2 осуществляет обратную связь и поддерживает стабильными токи стоков транзисторов VT1. Входной ток такого усилителя составляет $0,5 \cdot 10^{-12}$ А. Поэтому стало возможным применение резистора R1 сопротивлением 1000 ГОм и конденсатора C1 емкостью 20 пФ в цепи обратной связи усилителя заряда, при котором нижняя частота уменьшалась до $f_H = 0,008$ Гц. На транзисторах VT3 VT4 собрана схема защиты входа усилителя.

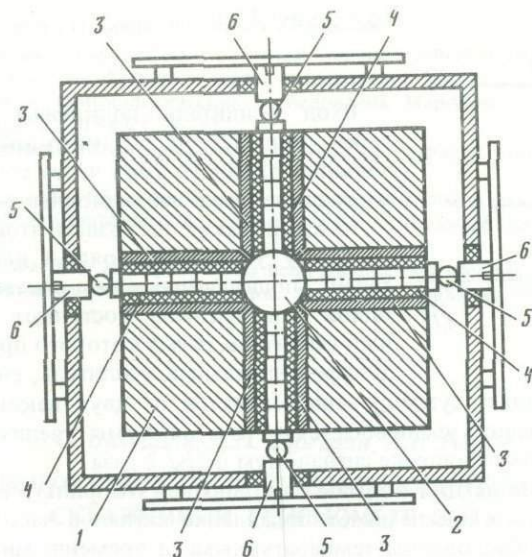


Рис. 1. Конструкция пьезоэлектрического сейсмометра

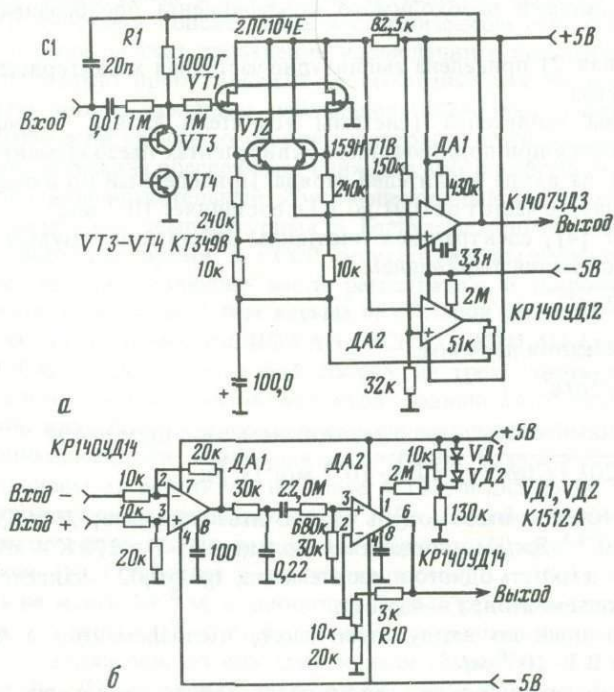


Рис. 2. Схема усилителя
а - заряда; б - дифференциального усилителя

Для предотвращения паразитных токов утечки через сопротивление платы резистор $R1$ устанавливается на фторопластовых втулках диаметром 5 мм. Собранный плата усилителя покрывается лаком с сопротивлением изоляции не менее 10^{18} Ом/см. На рис. 3 (кривая 1) приведена амплитудно-частотная характеристика усилителя заряда, снятая генераторным методом, при подсоединенном ко входу эквиваленте пакета пьезоэлементов.

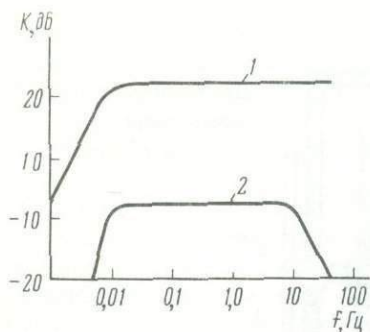


Рис. 3. АЧХ усилителя заряда (1) и всего тракта (2)

Вход усилителя подключен к пьезоэлементам через конденсатор C_2 , который препятствует протеканию входного тока через сопротивления утечки пьезоэлементов и изоляционных материалов.

Каждый пакет пьезоэлементов подключен к отдельному усилителю заряда. С выходов двух усилителей, подключенных к пакетам пьезоэлементов одной оси, сигналы поступают на дифференциальный усилитель, схема которого приведена на рис. 2, б. Дифференциальный усилитель, собранный на микро-

схеме ДА1, осуществляет суммирование сигналов от двух пакетов пьезоэлементов. При этом чувствительность увеличивается в 2 раза, а шумы увеличиваются в $\sqrt{2}$ раз, что позволяет увеличить отношение сигнал/шум в $2/\sqrt{2}$ раза.

На выходе усилителя на ДА1 подключен полосовой RC фильтр с полосой пропускания 0,01–20 Гц. Фильтр обеспечивает подавление сигналов частотой ниже 0,01 Гц, которые могут быть обусловлены температурными и временными дрейфами усилителей заряда и пьезоэлектрическими явлениями в пьезоэлементах.

Усилитель на микросхеме ДА2 предназначен для обеспечения выходного импеданса сейсмометра и установки необходимого коэффициента преобразования резистором R_{10} .

На рис. 3 (кривая 2) приведена амплитудно-частотная характеристика всего тракта усиления сейсмометра.

Выходные шумы усилителей (системы усилители заряда – дифференциальный усилитель) измеряются при подключенных эквивалентах пьезоэлементов (конденсатор емкостью 100 пФ) на входе усилителей заряда. Приведенный ко входу средний собственный шум в диапазоне частот от 0,01 до 1 Гц составляет 10^{-7} м/с².

Как показано в [4], спектральная плотность собственных шумов пьезоэлектрических датчиков описывается выражением

$$e_{ш} = \sqrt{4kT \operatorname{tg} \delta / 2\pi f C},$$

а для пяти пьезоэлементов получим

$$e_{ш}^5 = \sqrt{20kT \operatorname{tg} \delta / 2\pi f C}.$$

Отсюда приведенный ко входу пакета пьезоэлементов шум равен

$$a_{ш} = (1/5EM) \sqrt{20kT \operatorname{tg} \delta / 2\pi f} = 1,3 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2 / \sqrt{\text{Гц}},$$

где $E = 3 \cdot 10^{-10}$ Кл/Н – пьезомодуль одного пьезоэлемента; $M = 3,6$ кг – инертная масса; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $T = 278$ К – абсолютная температура; $C = 20$ пФ – емкость одного пьезоэлемента; $\operatorname{tg} \delta = 0,02$ – тангенс угла диэлектрических потерь пьезоэлементов; f – частота.

Средний приведенный ко входу шум пакета пьезоэлементов в диапазоне частот 0,01–1 Гц составит $2,3 \cdot 10^{-8}$ м/с².

Описанный пьезоэлектрический сейсмометр имеет следующие характеристики:

Частотный диапазон, Гц	0,01–20
Коэффициент преобразования, В (с ² /м)	25
Средний собственный шум, приведенный ко входу, м/с ²	10^{-7}
Динамический диапазон, дБ	90
Минимальный выходной сигнал, мкВ	10
Потребляемая мощность, мВт	150
Габаритные размеры, мм	120 × 120 × 120
Масса, кг	5

1. Соловьев С.Л. История и перспективы развития морской сейсмологии. М.: Наука, 1985. 152 с.
2. Болдырев С.А. Проблемы сейсмологических исследований Мирового океана: Обзор опубликованных материалов // Сейсмологические исследования Мирового океана. М.: Межведомств. геофиз. комитет АН СССР, 1983. С. 8–33.
3. Фрейд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: Наука, 1978. 174 с.
4. Андрианов В.А., Давыдов А.Б. и др. Высокочувствительные пьезоэлектрические сейсмометры // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1983. С. 33–39. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
5. Давыдов А.Б., Фрейд В.М. Измерительные цепи пьезоэлектрических датчиков // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 69–73. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)

УДК 550.34

А.О. Бахчинян, Д.Н. Заргарян, А.В. Рыков

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ СКВАЖИННЫЙ СЕЙСМОМЕТР С-032

Организация высокочувствительных сейсмологических наблюдений в широком частотном диапазоне, в связи с чем весьма актуальной является разработка такой, которая связана с трудностями поиска тихих в сейсмическом отношении мест. Частично эта проблема решается за счет проведения наблюдений в скважинах, которые в последнее время специально пробуриваются на геофизических полигонах и в крупных городах. Как известно, скважинные наблюдения позволяют исключить искажающее влияние на сейсмический сигнал со стороны поверхностного рыхлого слоя осадочных пород. Кроме того, скважина обеспечивает снижение микросейсмических и промышленных помех на высокочувствительный короткопериодный сейсмометр, а также некоторое снижение ветровых, температурных и барических помех на длиннопериодный сейсмометр. В настоящее время в СССР отсутствуют высокочувствительные скважинные сейсмометры, позволяющие вести регистрацию в широких амплитудном и частотном диапазонах, в связи с чем весьма актуальной является разработка такого сейсмометра, проведенная совместно ИФЗ АН СССР и СОКТИ АН АрмССР.

Сейсмометр С-032 представляет собой сборку из трех однотипных сейсмометров, оси чувствительности которых составляют угол, равный $54,7^\circ$, с вертикалью и сдвинуты относительно друг друга в проекции на горизонтальную плоскость на угол 120° . Сейсмометр предназначен для наблюдения колебаний почвы в скважинах глубиной до 2 км, с отклонением от вертикали не более $\pm 10^\circ$, в диапазоне температур от 0 до 50°C , при гидростатическом давлении до 20 МПа. Он обеспечивает трехкомпонентную регистрацию по двум диапазонам частот. При этом короткопериодный сейсмометрический канал (КС) работает в диапазоне частот 1–10 Гц и имеет разрешающую способность не менее 10^{-8} м, а длиннопериодный сейсмометрический канал (ДС) работает в диапазоне частот 0,1–0,01 Гц и имеет разрешающую способность не менее 10^{-7} м. Выходное напряжение по каждому каналу составляет ± 10 В при сопротивлении нагрузки 2 кОм. Динамический диапазон КС равен 80 дБ, а ДС — 60 дБ. Питание прибора осуществляется от источников постоянного тока напряжением ± 15 В. Потребляемая мощность не превышает 6 Вт. Габаритные размеры скважинного зонда составляют 125 × 1800 мм, а наземного блока — 300 × 240 × 140 мм. Масса зонда 28 кг, наземного блока 1,5 кг.

Общий вид одной компоненты сейсмометра показан на рис. 1. Корпус его представляет собой каркас, содержащий две вертикальные стойки, соединенные по торцам

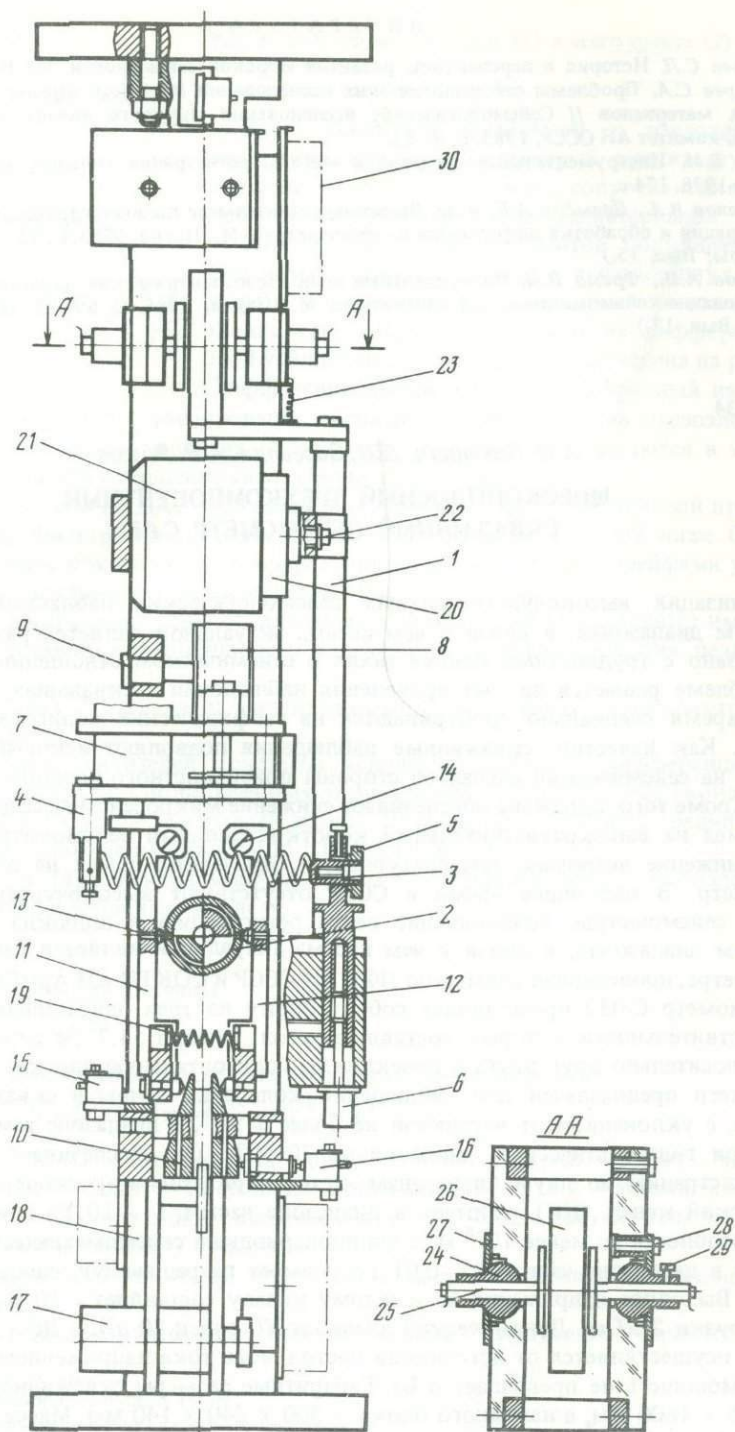


Рис. 1. Конструкция одной компоненты сейсмометра

5246

круглыми пластинами, и обеспечивает свободный доступ ко всем узлам, требующим настройки. Маятник 1 (рис. 1) связан с корпусом двумя упругими шарнирами 2, представляющими собой крестообразный подвес, образованный двумя плоскими стальными пружинами, а также цилиндрической спиральной пружиной 3. Один конец этой пружины жестко закреплен в пальце редуктора 4, а второй — связан с маятником с возможностью перемещения его вдоль оси пружины с помощью гайки 5 и в вертикальном направлении с помощью винта 6 при настройке периода. За счет передачи вращения от электродвигателя 7 через редуктор 4 червячному колесу 8, которое составляет с винтом 9 пару, обеспечивающую перемещение редуктора и соединенного с ним конца пружины вдоль ее оси, осуществляется автоматическая установка нуля. Маятник сейсмометра имеет составную массу, выбранную в соответствии с [1] таким образом, что обеспечиваются минимальные радиальные размеры прибора. Для снятия динамических нагрузок, возникающих при опускании и подъеме зонда, маятник снабжен арретирующим механизмом, обеспечивающим защиту его упругих подвесов. Кулачки 10 являются управляющим органом этого механизма, а рычаги 11, 12 с коническими штифтами 13 — исполнительным звеном. Рычаги связаны со стойками каркаса при помощи винтов 14 с возможностью поворота. При арретировании и разарретировании кулачки поворачиваются на угол 180° в ту или другую сторону до срабатывания микропереключателя 15 или 16. Приводом механизма арретирования служит электродвигатель 17 с редуктором 18. Рычаги 11 и 12 связаны между собой пружинами 19, силы растяжения которых через конические штифты 13 приложены к подвижным частям упругих шарниров 2. Арретирование осуществляется в нулевом положении маятника, чем обеспечивается снятие напряжения с плоских пружин и сокращение времени вывешивания. Маятник снабжен двумя преобразователями — магнитоэлектрическим и параметрическим [2]. Для центровки катушки 20 магнитоэлектрического преобразователя относительно магнита 21 служит винт 22. Для соединения с выводами обмотки катушки использованы безмоментные пружинки 23. Для обеспечения необходимых зазоров и параллельности пластин емкостей параметрического преобразователя стойки каркаса снабжены шарнирами 24, через которые проходят оси статорных пластин 25 с возможностью поворота и перемещения относительно роторной пластины 26, соединенной с маятником. При этом в выбранном положении фиксация шарнира 24 производится крышкой 27 и винтом 28, а статорных пластин — винтом 29. Катушки индуктивностей параметрического преобразователя намотаны на каркасы из оргстекла, имеют ферритовые сердечники 30, расположены на общей плате и снабжены экраном.

Скважинный зонд содержит герметический корпус со свечным мостом, прикрытым верхней головкой с уплотнительными кольцами. В корпусе зонда расположены друг над другом три сейсмометра и блок электроники, которые соединены между собой механически и электрически с помощью разъемов. Блок электроники включает в себя кварцевый генератор, блоки предусилителей, управления вывешиванием и арретированием каждого сейсмометра. К нижним концам свеч припаиваются выводы блока электроники, а к верхним — жилы кабеля, которые изолируются насадкой из термонефтегазовой резины с обжимками, которые надежно изолируют выводы от жидкости скважины. Соединение зонда с кабелем осуществляется кабельным накопечником, а прижатие к стенке скважины обеспечивается рессорным прижимным устройством.

Наземный блок выполнен в виде кассетницы и включает в себя блок управления и контроля (БУК) и формирователи амплитудно-частотных характеристик каналов ДС и КС для каждого сейсмометра.

На лицевой панели наземного блока расположены стрелочный прибор, светодиодные индикаторы и переключатели, а на задней — разъемы для подключения питания, кабеля зонда и выходов каналов.

Работа прибора осуществляется следующим образом.

Перед опусканием зонда в скважину сигналом с БУК запускаются механизмы ар-

2. Зак. 2195



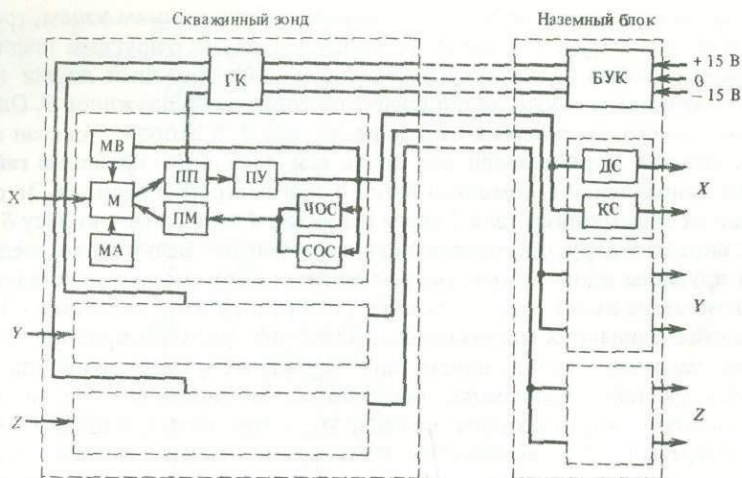


Рис. 2. Функциональная схема прибора

ретирования (МА) всех трех маятников прибора. О том, что маятники заарретированы, сигнализирует соответствующий светодиодный индикатор. Опустив зонд до рабочей отметки, аналогичным образом осуществляют разарретирование всех маятников.

При последующей подаче с БУК на блок электроники зонда двухполярного питающего напряжения загорается соответствующий индикатор, сигнализирующий о готовности прибора к работе.

За прохождением сигнала в приборе проследим по функциональной схеме, показанной на рис. 2.

Сейсмическое воздействие воспринимается маятником (М) сейсмометра и преобразуется в электрический сигнал в параметрическом преобразователе (ПП). В приборе используется емкостный ПП, осуществляющий модуляцию по амплитуде поступающего на него сигнала с кварцевого генератора (ГК). С преобразователя демодулированный сигнал проходит через предварительный усилитель (ПУ), с выхода которого широкополосный усиленный сигнал подается по кабелю на формирователь каналов, где разделяясь на два канала — КС и ДС, поступает на выходы прибора.

С помощью магнитоэлектрического преобразователя (МП) маятник М охвачен отрицательными обратными связями — частотнозависимой (ЧОС) и стабилизирующей (СОС), обеспечивающими стабилизацию нулевого положения маятника в процессе прохождения сигнала.

Постоянным сигналом с выхода ПУ, превышающим заданный порог, с помощью двигателя механизма вывешивания (МВ) устраняются уходы нуля маятника, связанные с наклоном корпуса и изменением длины пружины.

С помощью стрелочного прибора наземного блока представляется возможность контролировать положение маятника (прохождение сигнала), подключенного переключателем сейсмометра.

Лабораторные испытания опытных образцов прибора подтвердили достижение вышеуказанных основных параметров и работоспособность заложенных в нем конструктивных решений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыков А.В. О скважинном сейсмометре // Приборы и методы регистрации землетрясений. М.: Наука, 1987. С. 49–52. (Сейсмические приборы; Вып. 19).
2. Колесников Ю.А., Мацевский С.А., Рыков А.В. Емкостный преобразователь длиннопериодного акселерометра // Сейсмометры, регистраторы и сейсмические каналы. М.: Наука, 1986. С. 148–154. (Сейсмические приборы; Вып. 18).

*И.П. Башилов, А.В. Бажанов, А.А. Гинзбург,
А.А. Давыдов, Т.Н. Ершова, Т.А. Мустафин*

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЦИФРОВАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Одной из важнейших задач современной отечественной сейсмологии является переоборудование сейсмологической сети широкополосной аппаратурой нового поколения с цифровой регистрацией и возможностью передачи данных для международного обмена.

В настоящее время в ОКБ Института физики Земли АН СССР проводится работа по созданию автоматизированной цифровой сейсмологической станции (АССЦ), и мы полагаем, что эта разработка при ее положительном завершении позволит восполнить существенный пробел в техническом отставании отечественной сейсмологии от передового современного уровня.

Вопросами разработки цифровых сейсмических станций ОКБ в сотрудничестве с институтом занимается с 1962 г. и имеет соответствующий опыт в конструировании, изготовлении и внедрении в практическую работу на ряде сейсмических станций. Так, за период с 1970 по 1974 гг. было изготовлено, налажено и передано пользователям более 20 комплектов цифровых сейсмических станций типа СЦР [1-3].

Однако в силу целого ряда причин, главной из которых была идеологическая и техническая неподготовленность принять и эксплуатировать это довольно сложное оборудование, разработанные станции, за исключением единичных случаев, так и не были использованы для текущей работы. Это обстоятельство, безусловно, нанесло значительный урон развитию отечественной цифровой сейсмологии.

В последующие годы для научных исследований были созданы портативные станции типа ПРС, которые сейчас в небольшом объеме эксплуатируются в ИФЗ [4, 5], и их модификации РК-ПРС. Последние выпускаются в ОКБ мелкими сериями. Однако все эти станции не отвечают современным технологическим требованиям. Несомненно, требуется качественный скачок в разработке аппаратурных средств.

В настоящее время в ОКБ ведется активная работа по созданию нового поколения автоматизированных цифровых станций на базе уже имеющегося опыта новейших отечественных технологических достижений в области радиоэлектроники, вычислительной техники, программного обеспечения, а также с учетом специфических особенностей сейсмологического оборудования. Отличительной чертой этих разработок от предыдущих является модульный принцип построения с использованием шины Q-BUS и системой управления через центральный процессор.

Насущная необходимость в такой станции для широкого круга сейсмологических исследований, и прежде всего для задач международного обмена, предъявляет дополнительные требования к ее характеристикам: частотному и динамическому диапазону, точной временной синхронизации, а также к ее конфигурации и особенностям эксплуатации.

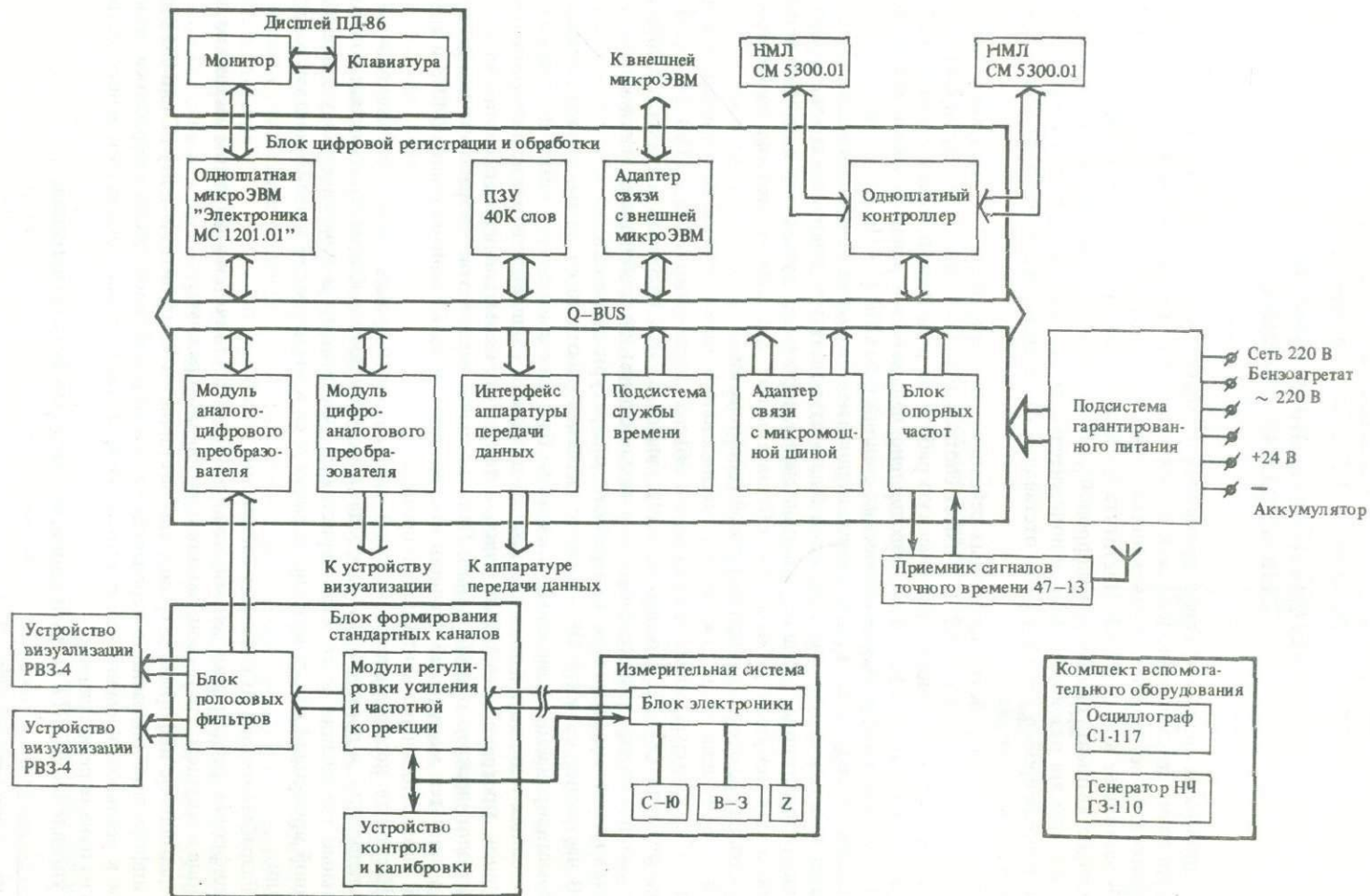
Разрабатываемая АССЦ имеет следующие возможности:

цифровая регистрация сейсмических волн осуществляется в широком частотном диапазоне в ждущем, старт-стопном или непрерывном режиме;

накопление информации происходит на стандартную магнитную ленту ЕС или СМ ЭВМ;

информация оперативно передается на центральный пункт сбора и обработки данных как в реальном времени, так и в процессе воспроизведения и обработки непосредственно на пункте регистрации;

управление АССЦ и ее функционирование в режимах регистрации;



Структурная схема станции

вывод и первичная обработка осуществляется через микроЭВМ с использованием соответствующего программного обеспечения;

осуществляется визуализация информации с помощью специальных устройств;

проводятся измерения метрологических характеристик станции и оперативный контроль ее работоспособности через микроЭВМ;

используются подсистемы гарантированного питания станции для обеспечения надежности ее работы и подсистемы точного времени.

Структурно-функциональная схема станции. Остановимся на кратком описании структурно-функциональной схемы АССЦ, которая приведена на рисунке.

В качестве аналогового тракта в АССЦ используется канал станции ССМ [6], который содержит три идентичные измерительные системы, обеспечивающие трехкомпонентную регистрацию сейсмических колебаний по трем взаимно перпендикулярным направлениям ($Z-X-Y$). Каждая из измерительных систем построена по принципу маятника с емкостным преобразователем и периодом собственных колебаний $T_0 = 2$ с.

Затем сигнал поступает на вход блока электроники, где с помощью фильтров обратной связи формируется широкополосный велосимметрический канал с частотным диапазоном 0,005 – 40 Гц. Формирование такого канала позволит расширить динамический диапазон регистрируемых колебаний.

С выхода блока электроники по кабельной линии широкополосный сигнал подается на вход блока формирования стандартных каналов (БФСК), где производится необходимая коррекция характеристики, усиление, а также разбиение каждого широкополосного канала на два подканала – длиннопериодный (0,005 – 0,1 Гц) и короткопериодный (0,1 – 5 Гц). В качестве полосовых фильтров используются эллиптические фильтры низких и высоких частот, имеющие крутизну спада не менее 48 дБ/окт. Блок формирования стандартных каналов содержит также модуль контроля и калибровки, который позволяет осуществить контроль работы аналогового тракта и его питания, а также импульсную и гармоническую калибровку сейсмических каналов. Таким образом, блок формирует на выходе шесть аналоговых каналов, сигналы которых подлежат цифровой регистрации. Кроме того, сигналы каждого канала визуализируются через регистратор видимой записи на электроэрозионной бумаге РВЗ-4 разработки ОКБ.

Основным узлом АССЦ является блок цифровой регистрации и обработки (БЦРО), в котором осуществляются:

аналогово-цифровое преобразование информации, поступающей с БФСК; ее хранение и вывод на накопитель и (или) аппаратуру передачи данных; обработка результатов с выводом на терминал; управление работой АССЦ; формирование временных штампов; хранение пакета программ.

За основу БЦРО выбран конструктив шины Q-BUS, для которого разработаны широкая номенклатура технических средств и развитое программное обеспечение. Выбор идеологии Q-BUS диктуется также эффективностью отладочных средств, в основе которых с успехом используются отечественные микроЭВМ типа ДВК. Состав БЦРО может быть легко модифицирован и расширен применительно к условиям той или иной сейсмической обсерватории и кругу решаемых задач.

Аналогово-цифровое преобразование сигналов, поступающих с блока формирования стандартных каналов, происходит в несколько этапов. Сначала одновременно по всем каналам фиксируется амплитуда сигналов. Затем с помощью устройства выборки и хранения осуществляется процедура мультиплексирования. Эта операция выполняется под управлением специальной программы ввода, которая позволяет устанавливать желаемый порядок и частоту опроса каналов. Далее происходит формирование 16-разрядного информационного слова станции, которое в трех битах содержит номер канала, а в 13 – информацию в формате с плавающей запятой (1 – разряд знака, 3 – порядок, 9 – мантисса). С помощью параллельного интерфейса сформированное слово поступает в канал общей шины. Согласно стандартам ЕССН, каждый длиннопериодный канал АССЦ должен опрашиваться 1 раз в секунду, а короткопериодный – 20 раз.

В качестве внешнего запоминающего устройства для записи и считывания информа-

ции используются два стандартных накопителя на магнитной ленте СМ 5300.01. Обмен информацией между шиной и накопителями, а также их управление осуществляются при помощи одноплатного контроллера. Почти одновременно с процессом накопления информация может поступать на стандартную аппаратуру передачи данных типа АПД с помощью специального интерфейса, который осуществляет обмен согласно протоколу стандарта "Стык 2".

Управление и обработка данных АССЦ ведутся через терминальную систему с использованием видеотерминала типа "ПД-86".

Для синхронизации работы устройств БЦРО, а также для формирования штампов времени реализована подсистема точного времени. В качестве ее базовых элементов используются приемник сигналов точного времени Ч7-13, блок опорных частот и блок службы времени, который содержит счетчик текущего времени, плату привязки к сигналам точного времени и интерфейс связи с общей шиной. В подсистему точного времени также входит специальная программа, осуществляющая управление записью, форматированием и выдачей информации о текущем времени. Внутренний генератор блока опорных частот имеет нестабильность не более 10^{-8} Гц/сут.

Для АССЦ система цифровой регистрации и обработки базируется на одноплатной микроЭВМ "Электроника МС 1201.01", имеющей широкораспространенную систему команд микроЭВМ "Электроника-60" и объем оперативной памяти 64 Кбайт, а также платы ПЗУ. МикроЭВМ обеспечивает ввод, обработку и вывод информации в формате 16-разрядного слова. Имеется также возможность осуществления байтовых операций. Специализированное математическое обеспечение на базе языка Ассемблер включает следующие основные модули: монитор системы АССЦ; драйвер записи данных на МЛ; драйвер терминала; драйвер передачи данных через стандартную цифровую телеметрическую аппаратуру; программу службы времени; программу коммутации и опроса канала; программу ввода информации в память микроЭВМ; программу включения на регистрацию при работе в ждущем режиме.

Используется диалоговый режим при запуске системы на регистрацию и автономный — в процессе работы. Обработка информации ведется в реальном времени.

Питание АССЦ может осуществляться как от аккумуляторов, так и от источников переменного тока напряжением 220 В (сеть, бензоагрегат). Благодаря использованию подсистемы гарантированного питания после прекращения подачи напряжения от внешней сети станция автоматически переходит в режим автономного питания от аккумуляторов, а при возобновлении переменного напряжения питание станции продолжает осуществляться в прежнем режиме.

Применительно к регистрации телесейсмических событий АССЦ обеспечивает следующие технические характеристики:

Число каналов регистрации	6 (12)
короткопериодных	3
длиннопериодных	3
Частотный диапазон, Гц	
короткопериодных каналов	0,1–5
длиннопериодных	0,005–0,1
Динамический диапазон цифровой регистрации, дБ	Не менее 120
Частота опроса, Гц	
длиннопериодных каналов	3
короткопериодных	60
Число значащих разрядов выходного кода	16

Некоторые характеристики АССЦ в зависимости от сейсмологических задач могут быть легко изменены. В частности, замена фильтров и некоторые изменения программы ввода дадут возможность расширить частотный диапазон до 40 Гц.

Конструктивно АССЦ выполнена в виде двух унифицированных стоек системы АСЭТ размерами 1600X650X580. В стойке регистрации размещены следующие узлы: приемник сигналов точного времени Ч7-13; два накопителя на магнитной ленте СМ 5300.01;

блок формирования стандартных каналов (БСК); блок цифровой регистрации и обработки (БЦРО); блок питания; блок вентиляторов.

В стойке управления и визуализации располагаются: два устройства визуализации РВЗ-4; дисплей с устройством управления ПД 86; комплект сервисного оборудования (генератор ГЗ-110, осциллограф С1-117); подсистема гарантированного питания.

Измерительные системы и блок электроники выполнены в виде герметизированных конструкций, так как они предназначены для работы в полевых условиях. Блок цифровой регистрации и обработки, входящий в состав регистрации, как уже было отмечено, выполнен на основе конструктива Q-BUS и представляет собой кассетницу с базовыми разъемами РППН 16-288. В кассетнице размещены функционально законченные модули, многослойные печатные платы размерами 135×240 и 270×240. Платы микроЭВМ и контроллера НМЛ выпускаются промышленностью, остальные разработаны в ОКБ ИФЗ АН СССР. Здесь же размещен блок службы времени с индикацией текущего времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура и методика сейсмических наблюдений СССР / Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Кирноса, В.М. Фрема. М.: Наука, 1974. 243 с.
2. Кевлишвили П.В., Ан В.А., Башилов И.П. и др. Система автоматической регистрации и обработки результатов геофизических наблюдений // Сейсмические приборы; Вып. 10. М.: Наука, 1977. С. 35–43.
3. Башилов И.П., Белякова В.Н., Давыдов В.И. и др. Цифровой спектроанализатор КН4-0414 волн на базе ЭВМ М-4030 // Низкочастотные излучения в ионосфере и магнитосфере Земли. Апатиты: Изд. Кол. фил. АН СССР, 1981. С. 133–136.
4. Башилов И.П., Волосов С.Г., Ершова Т.Н. и др. Аппаратура, методика регистрации и выделение сейсмических сигналов от невзрывных источников на больших удалениях // Инструментальное изучение сейсмических колебаний. М.: Наука, 1984. С. 14–30. (Сейсмические приборы; Вып. 16).
5. Башилов И.П., Ершова Т.Н., Креков М.М. и др. Экспериментальная цифровая сейсмическая группа // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 139–146. (Сейсмические приборы; Вып. 17).
6. Трифонов Н.В. Многоканальная сейсмическая станция ССМ // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1982. С. 42–45. (Сейсмические приборы; Вып. 15).

В.М. Фрема

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЕ СИММЕТРИЧНЫЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕЙСМОМЕТРЫ

При инструментальных сейсмологических наблюдениях, как правило, применяется традиционная система регистрации вертикальной и двух взаимно перпендикулярных горизонтальных составляющих движения грунта с использованием самостоятельных вертикальных и горизонтальных сейсмометров. При этом вертикальные и горизонтальные маятниковые приборы имеют существенно различную конструкцию, а часто и различные параметры и характеристики [1].

Серийные трехкомпонентные пьезоэлектрические сейсмометры АПТ-1М [2] с общей кубической инертной массой, предназначенные для регистрации сильных землетрясений, также имеют вертикальную и две горизонтальные составляющие, объединенные в одном приборе. Это приводит, в частности, к тому, что пьезоэлементы вертикальной и горизонтальных составляющих работают в различных условиях нагружения, что несколько усложняет конструкцию сейсмометра и может привести к неидентичности реакции компонент, особенно на сильные движения грунта.

Стремление к унификации приборов, упрощению их конструкции и уменьшению поперечных размеров для использования в скважинах привело к разработке сейсмо-

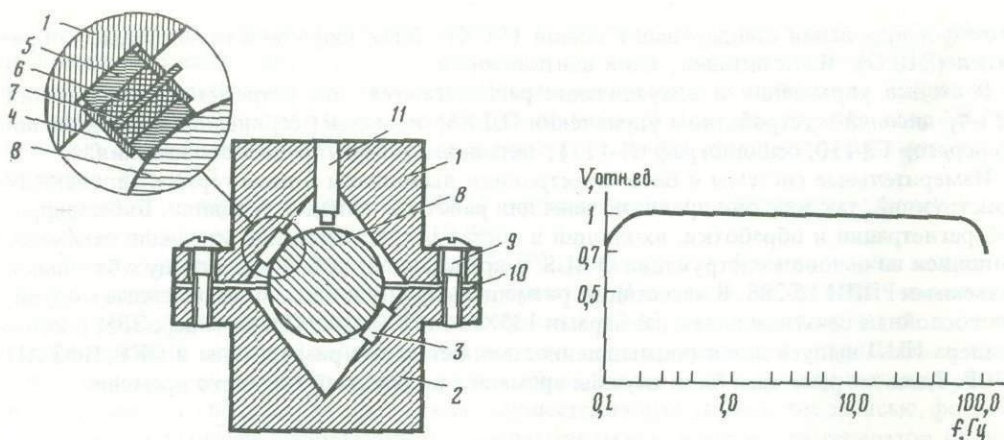


Рис. 1. Схема трехкомпонентного пьезосейсмометра с общей шаровой инертной массой
Пояснения в тексте

Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра

метров, ось чувствительности которых направлена под углом $\text{arctg}\sqrt{2} \cong 54^\circ 44'$ к вертикали [3]. При этом появилась возможность реализовать симметричную относительно вертикальной оси ортогональную систему из трех идентичных компонент, имеющих так называемое азимутальное расположение [4].

Особенно удобным оказывается такое расположение компонент в трехкомпонентных пьезосейсмометрах с общей инертной массой [5, 6].

На рис. 1 показана схема одного из разработанных в Институте физики Земли АН СССР вариантов трехкомпонентного симметричного пьезосейсмометра с общей шаровой инертной массой. Корпус прибора состоит из двух частей — 1 и 2. В каждой из них сделаны идентичные конические выборки с углом при вершине конуса $2\text{arctg}\sqrt{2} \cong 70^\circ 32'$. На боковых поверхностях конических выборок по окружности через 120° сделаны круглые углубления с плоским дном, в которых размещены чувствительные элементы 3. Более подробно устройство элементов 3 показано на врезке. В стакане 4 из изолирующего материала помещены жесткие металлические прижимные пластины 5 в виде дисков. Между ними расположены пьезокерамические пластины 6, контактные металлические пластины 7, служащие для съема электрических сигналов с внутренних обкладок пьезопластин 6. Обе части корпуса повернуты вокруг вертикальной оси друг относительно друга так, что чувствительные элементы этих частей расположены в плане по окружности поочередно через 60° . При сборке жестко зажимается шаровая инертная масса 8 между шестью чувствительными элементами 3, фиксируется и автоматически центрируется. Две части корпуса (1 и 2) стягиваются винтами 9 через упругую прокладку 10.

В одной из частей корпуса (1 на рис. 1) расположен электромагнит 11, служащий для внутренней калибровки сейсмометра [7].

Как видно из рис. 1, чувствительные элементы 3 вместе с корпусом 1, 2 и инертной массой 8 попарно образуют три пьезоэлектрических датчика с взаимно перпендикулярными осями чувствительности, пересекающимися ось цилиндрического корпуса прибора в центре шаровой инертной массы 8 и направленными под углами $\text{arctg}\sqrt{2}$ к этой оси.

В Институте физики Земли АН СССР изготовлен и испытан образец сейсмометра с инертной массой в виде шара из стали диаметром 60 мм. Величина инертной массы 877 г. Габаритные размеры трехкомпонентного датчика: диаметр 110 мм, высота 120 мм. Общие размеры прибора (кожух с датчиком и усилителями): диаметр 120 мм, высота 200 мм. Масса прибора около 3,5 кг.

В сейсмометре использованы пьезокерамические диски из керамики ЦТС-19 диаметром 20 мм, толщиной 0,5 мм и емкостью $C_0 = 7000$ пФ.

Чувствительность компонент датчика составила $S_d = 0,02 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м}$. Измеренная на вибростенде поперечная паразитная чувствительность компонент сейсмометра не превысила 4% чувствительности в рабочем направлении.

Использование усилителя позволяет поднять чувствительность сейсмометра. При этом предельный коэффициент усиления $K_{\text{уп}}^{\text{пр}}$ схемы прибора может быть найден из соотношения $K_{\text{уп}}^{\text{пр}} = U_{\text{вых}}^{\text{max}} / U_{\text{ш}} \cdot D_c$, где $U_{\text{вых}}^{\text{max}}$ — максимальное выходное напряжение сейсмометра; D_c — его динамический диапазон (отношение максимального и минимального выходных сигналов); $U_{\text{ш}}$ — приведение ко входу напряжение шума усилителя.

В качестве величины D_c целесообразно в приведенную формулу подставить динамический диапазон всего канала записи сейсмических сигналов, определяемый обычно его регистрирующим устройством. Задаваясь разумными величинами $U_{\text{ш}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ В}$, $D_c = 10^3$ (60 дБ), $U_{\text{вых}}^{\text{max}} = 15 \text{ В}$, получаем $K_{\text{уп}}^{\text{пр}} = 3000$.

В описанном выше образце сейсмометра трехканальный дифференциальный усилитель собран на микросхемах К544УД1А во входных каскадах и на микро мощных операционных усилителях К140УД12 в выходных каскадах. При этом коэффициент усиления $K_{\text{у}} = 3000$ обеспечивает чувствительность компонент сейсмометра $S_c = 60 \text{ В} \cdot \text{с}^2/\text{м}$.

Входное сопротивление использованного усилителя $R_{\text{вх}} = 1 \text{ ГОм}$. При этом постоянная времени входной цепи, определяющая нижнюю границу диапазона частот, воспроизводимых сейсмометром без искажений, $\tau = R_{\text{вх}} C = 7 \text{ с}$. Здесь с учетом выбранной схемы соединения пьезоэлементов в датчиках $C = C_0 = 7000 \text{ пФ}$.

Верхняя граница частотного диапазона определяется собственной частотой компонент, составившей в описанном сейсмометре $f_0 = 500 \text{ Гц}$.

Амплитудно-частотная характеристика сейсмометра с усилителем и фильтром верхних частот приведена на рис. 2.

При тех же габаритных размерах чувствительность сейсмометра может быть повышена при той же конструкции корпуса за счет использования инертной массы в виде двух соединенных основаниями круглых конусов с углами при вершинах $2 \arcsin \sqrt{2}$ [8]. В этом случае объем инертной массы, а с ним и ее величина (при том же материале инертной массы) увеличиваются в 1,3 раза. Во столько же раз увеличится и чувствительность сейсмометра.

Более существенное, примерно на порядок, повышение чувствительности при сохранении габаритных размеров в симметричных трехкомпонентных сейсмометрах может быть достигнуто при использовании изгибных пьезоэлементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Кирноса, В.М. Фремда. М.: Наука, 1974. 243 с.
2. Фрейд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: Наука, 1978. 174 с.
3. Шнирман Г.Л. Симметричный трехкомпонентный электродинамический сейсмометр СТКС // Инструментальные средства сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1980. С. 7–13. (Сейсмические приборы; Вып. 13).
4. Гамбурцев Г.А., Гальперин Е.И. Азимутальные сейсмические наблюдения с наклонными сейсмографами // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1954. № 2. С. 184–189.
5. А.с. 1087938 (СССР), МКИ G 01 V 1/16. Пьезоэлектрический сейсмометр // В.М.Фрейд. № 3544929; Заявл. 28.01.83; Опубл. 23.04.84, Бюл. № 15.
6. А.с. 1187125 (СССР), МКИ G 01 V 1/16. Трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмометр / В.М.Фрейд. № 3735623; Заявл. 08.02.84; Опубл. 23.10.85, Бюл. № 39.
7. А.с. 995044 (СССР), МКИ G 01 V 1/16. Пьезоэлектрический сейсмометр / В.М. Фрейд. № 3360743; Заявл. 02.12.81; Опубл. 07.02.83, Бюл. № 5.
8. А.с. 1377799 (СССР), МКИ G 01 V 1/16. Трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмометр / В.М. Фрейд. № 4112225; Заявл. 01.09.86; Опубл. 29.02.88, Бюл. № 8.

АВТОНОМНАЯ ПРОГРАММИРУЕМАЯ СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ

Современные возможности микроэлектроники и микропроцессорной техники открыли новые перспективы в автоматизации сейсмических наблюдений и внедрения новых принципов построения сейсмической аппаратуры. Использование микропроцессорного комплекта и системы кристаллической памяти позволяет спроектировать и создать автономную автоматическую сейсмостанцию, имеющую законченный технологический цикл – от приема, регистрации и запоминания полезной сейсмической информации до ее анализа и цифровой обработки с выдачей результатов на видеотабло, магнитный накопитель и/или канал связи. Основным элементом такой станции является микропроцессор с пакетом обслуживающих и функциональных программ, записанных на ячейках кристаллической памяти.

В настоящей статье приводится описание автономной программируемой сейсмостанции цифровой обработки (АПСС), разработанной в Институте сейсмологии АН УзССР. Аппаратура предназначена для регистрации и обработки землетрясений с эпицентрными расстояниями до 700 км.

На рис. 1 приведена структурная схема аппаратуры АПСС. Станция конструктивно разделена на две самостоятельные части (приемная и обрабатывающая). Приемная часть (кроме сейсмоприемников) именуется в дальнейшем тексте как блок усиления и преобразования сейсмического сигнала (БУПС), обрабатывающая часть – как блок цифровой обработки (ЦО).

Приемная часть содержит сейсмометры, предварительный трехканальный усилитель, коммутатор, аналого-цифровой преобразователь с "плавающей" запятой, передатчик цифровой информации в блок ЦО, устройство выдачи тест-сигнала (калибровка), блок питания. Обрабатывающая часть содержит приемник цифровой информации, блок буферной памяти, микроЭВМ на базе контроллера MC 2709 (K1-20), пульт-дисплей (видеотабло), блок питания.

Аппаратура БУПС располагается в месте непосредственной установки сейсмоприемников. Аппаратура ЦО располагается в здании, в месте, удобном для обслуживания. Электрическое соединение блоков обеспечивается сигнальным кабелем длиной до 500 м. Выделение БУПС в самостоятельный конструктивный блок и его установка около сейсмоприемников объясняются необходимостью минимизации уровня электромагнитных наводок от различного рода электрических устройств. Приемная и обрабатывающая части аппаратуры имеют гальваническую развязку через оптроны. Передача цифровой сейсмической информации и служебных сигналов из приемной в обрабатывающую часть осуществляется последовательным двоичным кодом.

Станция АПСС рассчитана на длительную круглосуточную работу в автоматическом режиме, имеет звуковую и световую сигнализацию обнаружения сигнала, окончания обработки и готовности к снятию показаний. Отображение уровня входного сигнала, результатов обработки, текущего времени и служебных меток воспроизводится на видеотабло в виде десятичных цифр и русской мнемоники. Контроль работоспособности аппаратуры АПСС производится подачей электрического тест-сигнала, имитирующего землетрясение.

Динамический диапазон регистрируемых сейсмических сигналов 114 дБ. Частотный диапазон канала измерения на уровне 3 дБ 0,5–20 Гц. Частота квантования сейсмической информации, по каждому каналу 36, 87 Гц.

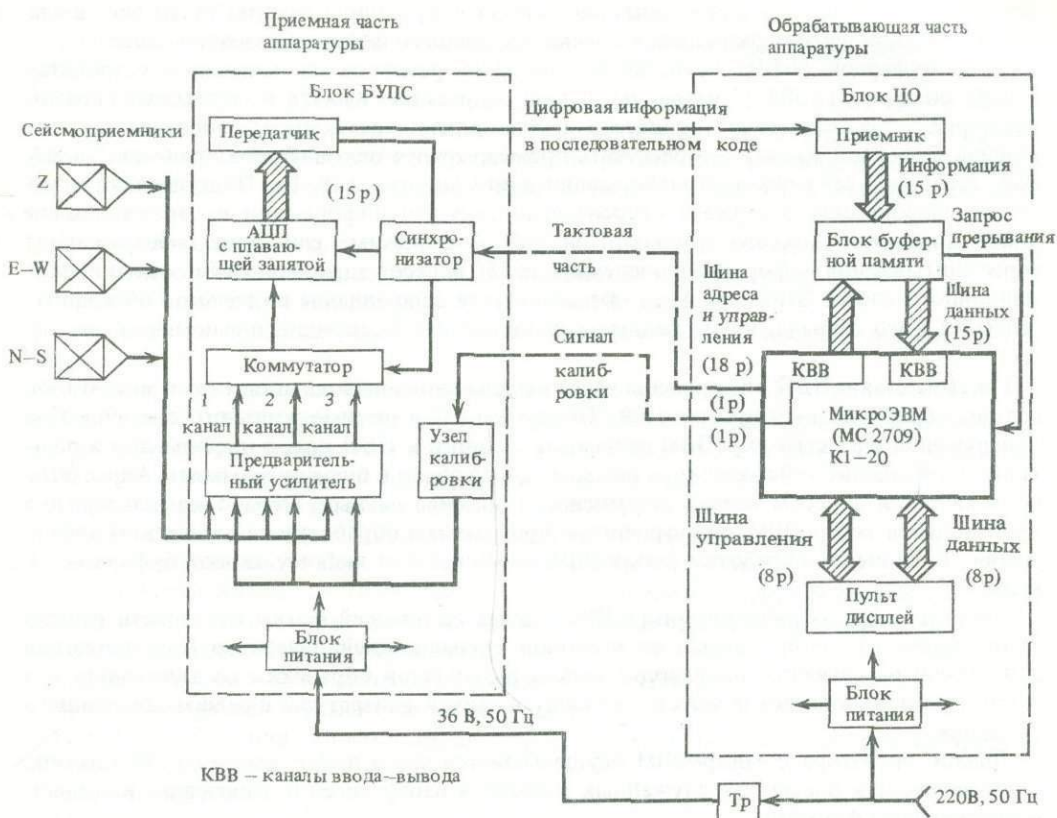


Рис. 1. Структурная схема аппаратуры АПСС

Погрешности измерения входного сейсмического сигнала в конечной точке шкалы не более 0,5%, в начальной — не более 1/2 величины младшего значащего разряда.

Блок БУПС питается переменным напряжением 36 В, 50 Гц. Пониженное напряжение введено в целях обеспечения техники безопасности. Мощность потребления в рабочем режиме около 5 Вт.

Блок ЦО питается от сети напряжением 220 В, 50 Гц. Мощность потребления около 50 Вт.

Принцип работы станции. Электрический сигнал сейсмоприемников, адекватный регистрируемому элементу движения почвы (смещение, скорость или ускорение), усиленный предварительным усилителем, поступает на коммутатор, обеспечивающий последовательную выборку каждого из трех сейсмических каналов с частотой дискретизации 36, 87 Гц. С коммутатора сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь, который преобразует входное напряжение в цифровой код в формате "плавающей" запятой [1]. Формат одного слова аналого-цифрового преобразования содержит: 2 разряда — номер канала, 1 разряд — знак, 4 разряда — порядок, 8 разрядов — мантисса. Слово "параллельно" записывается в регистр передатчика, а затем в последовательном коде, дополненном синхросигналом, выводится в кабель, связывающий приемную и обрабатывающую части аппаратуры.

В блоке ЦО текущая последовательность информационных слов поступает в приемник, который по наличию синхроимпульса записывает слово в регистр-накопитель и посылает запрос в микроЭВМ о готовности приемника к записи информации в буферную память. По получению запроса микроЭВМ приостанавливает текущую работу и

программно записывает информационное слово в буферную память, после чего посылает в приемник сигнал разрешения приема следующего информационного слова.

Блок буферной (ББП) представляет собой оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) объемом 16 384 15-разрядных слоев. Адресацию памяти и служебные сигналы "выборка", "запись/чтение" процессор осуществляет через каналы ввода-вывода. Назначение буферной памяти — обеспечить промежуточное накопление и хранение "полезной" цифровой сейсмической информации длительностью 148, 1 с. Поступающая в процессор информация задержана относительно текущей информации на время, равное длине хранимого массива данных. При работе в режиме слежения (обнаружения) адрес считываемой информации опережает на 550 адресов адрес записи текущего информационного слова. Этим приемом обеспечивается запоминание не только "полезного" сейсмического сигнала, но и предшествовавшего ему 5-секундного сейсмического шума.

Считываемая с ББП информация через каналы ввода-вывода поступает в микроЭВМ, где она обрабатывается программой "Обнаружение" в режиме реального времени. При обнаружении сигнала микроЭВМ запрещает запись в ББП новой информации и переходит к обработке сейсмического сигнала, записанного в буферную память. Адрес останова является адресом начала запомненного массива данных. Обработка информации производится микроЭВМ по встроенным программам обработки сейсмической информации. В процессе обработки микроЭВМ обращается к любому адресу буферной памяти.

По окончании обработки микроЭВМ выдает на дисплей метку готовности результатов обработки, сопровождаемая ее звуковой сигнализацией. Оператор в соответствии с полученным сигналом производит вывод результатов обработки на видеотабло и в журнал регистрации, после чего производится запуск аппаратуры в режим дальнейшего слежения.

Диалог оператора с микроЭВМ осуществляется через пульт, имеющий 20 клавиш, обеспечивающих выдачу 11 служебных команд и набор чисел в десятичном или шестнадцатеричном формате.

Узел калибровки представляет собой имитатор 3-компонентного сейсмического сигнала. На его выходах формируются электрические аналоговые сигналы, соответствующие виду сейсмического процесса — землетрясения, выбранного за эталон. Сигналы подаются непосредственно на входы предварительных усилителей. Аппаратура АПСС воспринимает их как естественный сейсмический процесс и проводит весь комплекс измерения, преобразования, обнаружения и обработки с выдачей результатов. Таким приемом производится сквозной контроль работоспособности всего комплекса аппаратуры в целом.

МикроЭВМ. При построении специализированных вычислительных устройств, предназначенных для решения группы заранее известных задач, как правило, в реальном масштабе времени, чаще применяют функциональный блок, содержащий микропроцессорный комплект, оформленный в виде платы и выполняющий роль микроЭВМ, встраиваемой в прибор. Такой блок называют контроллером. В конце 1985 г. к одному из таких широко распространенных типов относился контроллер К1-20 (МС2709). Перспективность применения контроллера К1-20, построенного на МПК580 [2], объяснялась со следующих позиций: достаточная скорость и производительность обработки — 0,5 млн операций в секунду; функциональная зональность процессора и всего МПК в целом; большая емкость ПЗУ, предоставляемая пользователю; наличие в составе МПК самостоятельных контроллеров ввода-вывода, прерываний, таймеров, КПДП, обслуживание пульта и дисплея, программируемость режима работы, которые обеспечивают большую гибкость подключения и меньшее время обслуживания нестандартных внешних устройств; широкие условия эксплуатации, технологичность установки и надежность, позволяющие использовать аппаратуру в полевых условиях.

Основными недостатками микроЭВМ на базе контроллера К1-20 являются: программа несовместимость с отечественными мини-ЭВМ (СМЗ, СМ4, "Электроника 100-25")

и микроЭВМ ("Электроника-60" и "Электроника НМС.111.001" [3]); использование в качестве основного языка программирования Ассемблера; 8-разрядный формат слова.

Применение языка Ассемблер вызвано ограниченным объемом памяти ПЗУ и требуемой скорости обработки, затрудняющими использование компилирующей программы. Ассемблер позволяет более гибко и рационально разработать управляющую программу функционирования аппаратуры, ориентированную на обработку в режиме реального времени.

На рис. 2 приведена структурная схема микроЭВМ, работающей в составе аппаратуры АПСС. МикроЭВМ обладает следующими техническими характеристиками:

- тип используемого микропроцессора — параллельный;
- разрядность параллельно обрабатываемой информации — восемь двоичных разрядов;
- форма представления чисел — дополнительный код с фиксированной запятой; выполнение арифметических операций, тригонометрических, показательных и логарифмических функций обеспечивается в диапазоне изменения чисел $0,5867 \cdot 10^{-3^8} - 0,1704 \cdot 10^{3^9}$ с помощью библиотеки подпрограмм с "плавающей" запятой;
- прямая адресация к памяти емкостью до 64 Кбайт;
- вид адресации — неявная, прямая, косвенная, непосредственная;
- максимальное число адресуемых внешних устройств — 256;
- количество команд — 78, включая команды арифметических и логических операций, десятичной коррекции, стековые операции, сложение слов двойной длины, операции ввода-вывода, операции управления;
- формат команд — однобайтная, двухбайтная, трехбайтная;
- время выполнения команд типа регистр—регистр — не более 2 мкс;
- система прерывания — приоритетная, с программной установкой приоритета, режимов обслуживания и масок;
- емкость, Кбайт:
 - ОЗУ — 1;
 - системного ПЗУ — 4;
 - функционального ПЗУ — 12.

В интерфейсе микроЭВМ обеспечены два режима обмена информацией между устройствами — программный обмен и обмен в режиме прерывания программы. Обмен в режиме прерывания программы в интерфейсе микроЭВМ выполняется по инициативе внешнего устройства, подключенного к микроЭВМ.

Структура программного обеспечения АПСС. Для выполнения задач обработки сейсмических данных аппаратура АПСС снабжена соответствующим программным обеспечением.

Аппаратура определяет следующие параметры сейсмического источника: время в очаге, географические координаты эпицентра, эпицентральное расстояние, азимут на эпицентр, магнитуду и энергетический класс землетрясения, интенсивность сотрясения почвы в эпицентре и пункте наблюдения, категорию глубины землетрясения (глубокое, коровое).

Диапазон измерения интенсивности сотрясений почвы в пункте наблюдения от 1 до 9 баллов. Диапазон измерения интенсивности в эпицентре от 2 до 10 баллов. Максимальное эпицентральное расстояние обрабатываемого землетрясения не более 700 км. Регистрируемое значение магнитуды землетрясения в зависимости от эпицентральных расстояний от $MPV = 2,0$ до $MPV = 8,0$.

Время обработки одного сейсмического события не более 2 мин.

Выбор методов обработки сейсмической информации (ОСИ) и их программная реализация обуславливались особенностями регистрации скорости колебания почвы землетрясений ближней зоны и возможностями используемой в АПСС микроЭВМ. Структура программно-математического обеспечения обработки сейсмической информации (ПМО ОСИ) определена составом стоящих перед АПСС задач: согласованное функцио-

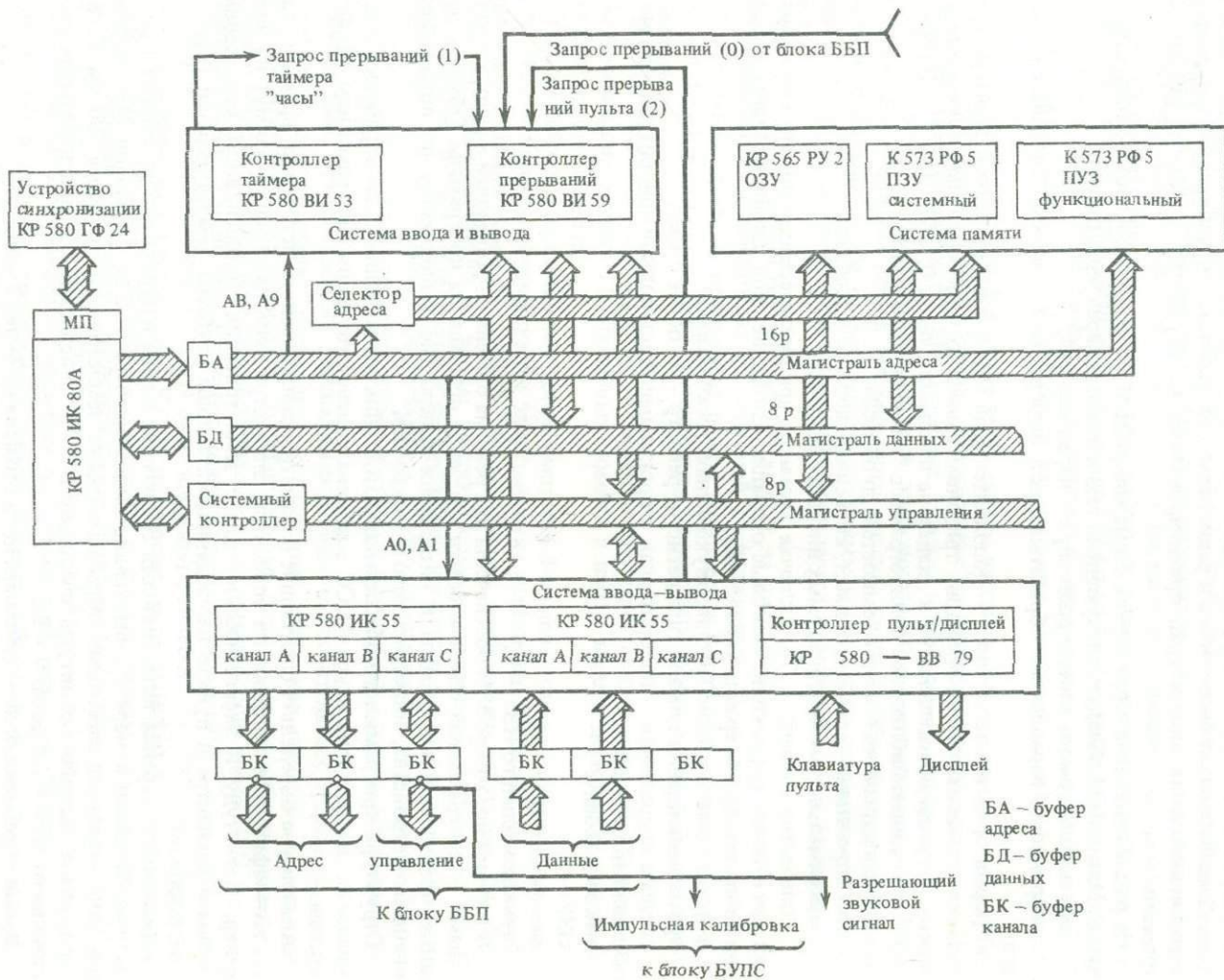


Рис. 2. Структурная схема микроЭВМ

нирование технических и программных средств АПСС в автоматическом режиме; непрерывная регистрация сейсмической информации; обнаружение "полезного" сейсмического сигнала в режиме реального времени; анализ структуры сейсмического сигнала, заключающийся в проверке последовательности вступлений цугов продольных и поперечных волн, распределения энергий Р- и S-волн по вертикальной и горизонтальной компонентам, наличия характерных для сейсмической записи периодов; определение кинематических и динамических параметров измеряемого сигнала, таких, как максимальные амплитуды Р-и S-волн, их периоды, времена вступлений, длительность сейсмического события, и других, необходимых для текущей обработки; расчет основных параметров очага землетрясения по данным одного пункта наблюдений: время в очаге, эпицентральное расстояние, азимут на эпицентр, географические координаты очага, характеристика глубины, энергетический класс, магнитуда, интенсивность в пункте наблюдения и в эпицентре; представление промежуточных и конечных результатов обработки на дисплее.

Модуль ПМО ОСИ микроЭВМ состоит из одиннадцати основных программ, восьми специальных сервисных подпрограмм, библиотеки стандартных программ микроЭВМ и подразделяется на программы управления, классификации, функциональной обработки, сервисные подпрограммы, библиотеку стандартных программ (БСП). Общий объем ПМО ОСИ составляет 16 Кбайт. Программы хранятся в ППЗУ микроЭВМ.

Управляющие программы. Блок управляющих программ включает программы "Диспетчер", "Пульт", "Часы". Программы объединены общей задачей — согласование технических средств и программного обеспечения АПСС.

Работоспособность микроЭВМ и функционирование ПМО ОСИ осуществляет управляющая программа "Диспетчер". В ее функции входит: инициализация и подготовка к работе микроЭВМ и периферийных устройств, управление записью цифровой сейсмической информации (ЦСИ) в блок буферной памяти, прием, сортировка и промежуточное хранение в ОЗУ цифровой сейсмической информации, контроль и диагностика входной ЦСИ и режимов работы АПСС, осуществление диалога с оператором, подключение основных блоков ПМО в соответствии с условиями обработки, управление режимами работы дисплея и пульта, обслуживание прерываний, хранение и выдача результатов обработки "полезного" сигнала на видеотабло по запросу программы "Пульт", выдача сигнала "калибровка" по запросу программы "Пульт".

Работы программы "Диспетчер" осуществляется в четырех режимах: начальная установка (НУ), настройка работы (НР), рабочий режим (РР), вывод информации (ВИ).

При включении питания АПСС программа "Диспетчер" входит в режим НУ. В этом режиме производится инициализация микроЭВМ, каналов ввода-вывода, таймера, контроллера прерываний, контроллера пульта и дисплея, начальная установка времени, дается разрешение на прием и запись входной информации в ББП. Далее производится переход на режим НР.

В режиме НР программа "Диспетчер" производит обнуление рабочих ячеек памяти; по прерыванию "Входная информация" первичное заполнение ББП цифровой сейсмической информацией; настройку цифровых фильтров программы "Обнаружение". Время нахождения в режиме НР составляет около 208 с, после чего АПСС входит в режим РР.

В режиме РР программа "Диспетчер" по прерыванию "Входная информация" продолжает запись текущих информационных слов (ИС) в буферную память и чтение задержанных ИС из буферной памяти в регистры и ОЗУ микроЭВМ. При этом осуществляется контроль записи ИС в буферную память.

Если считанное из ББП информационное слово принадлежит вертикальной (Z) компоненте, то осуществляется переход на программу "Обнаружение", работающую в реальном режиме времени. Результат работы программы "Обнаружение" определяет дальнейший режим работы программы "Диспетчер":

а) если обнаружение не состоялось, то программа "Диспетчер" переходит на прог-

рамму "Часы" и в случае наличия прерывания "Запрос пульта" переходит на программу "Пульт", после чего устанавливается в ожидании поступления прерывания "Входная информация";

б) если обнаружение состоялось, то выдается команда на запрет записи входной информации в ББП, в рабочие ячейки ОЗУ заносится время обнаружения и начальный адрес запомненного в ББП массива, выдается сообщение на дисплей и осуществляется переход к программе "Редактор".

Программа "Редактор" классифицирует зарегистрированный сейсмический сигнал на предмет необходимости его дальнейшей обработки. Если информация в результате работы программы "Редактор" отбраковывается, то происходит возврат в режим НР программы "Диспетчер". Если поступившая информация в результате работы программы "Редактор" классифицируется как "полезный" сейсмический сигнал, происходит переход к программе "Выделения S-волны" и далее к программам функциональной обработки. По завершении работы программ функциональной обработки производится переход на режим "вывод информации". В этом режиме программа "Диспетчер" выдает сообщение на дисплей, подключает устройство звуковой сигнализации и устанавливается в режим диалога с оператором по прерыванию программы "Пульт".

Программа "Пульт" осуществляет по прерыванию диалог оператора с микроЭВМ посредством команд, заносимых с клавиатуры пульта. Программа "Пульт" имеет набор следующих команд: сброс; пуск; ввод времени; коррекция времени (+) (-); вывод на табло текущего времени; ввод адреса выводимой ячейки; вывод на табло содержимого трех последовательных ячеек памяти ПЗУ, ОЗУ; вывод на табло входной информации по заданному с пульта номеру канала; вывод на табло результатов обработки; калибровка.

Программа "Часы" по прерыванию "Таймер" производит подсчет тактовых импульсов, поступающих с таймера микроЭВМ, с частотой 10 Гц. В рабочих ячейках программы формируется двоично-десятичный код текущего времени.

Программы классификации. Программы классификации решают задачи обнаружения и выделения "полезного" сейсмического сигнала и проводят структурный анализ цифровой сейсмограммы, хранимой в ББП. В этих программах производится также расчет временных и динамических параметров зарегистрированного сейсмического сигнала.

В силу того что скорость вычислений микроЭВМ недостаточна для реализации сложных алгоритмов обработки реального времени, выделение "полезного" сейсмического сигнала реализовано в два этапа. На первом этапе работает программа "Обнаружение" — простой быстрый предобнаружитель, работающий в темпе поступления данных, на втором — программа "Редактор", подтверждающая событие и работающая с массивом данных, запомненных в ББП.

В основе алгоритма "Обнаружение" лежит метод частотной фильтрации модуля амплитуды вертикальной компоненты, параллельно пропускаемой через два рекурсивных ФНЧ-фильтра второго порядка, с аппроксимацией по Баттерворту. При этом выход узкополосного ФНЧ-фильтра $F_1(t)$ с частотой среза f_1 , обеспечивает осреднение в длинном окне значения энергии сейсмического шума, предшествующего "полезному" сигналу, а широкополосный фильтр $F_2(t)$, с частотой среза f_2 , отслеживает быстрые изменения энергии входного сигнала, связанные с возможными вступлениями P -волны.

Обнаружение фиксируется в момент времени t_0 выполнения условия

$$F_1(t_0) - kF_2(t_0) \geq 0, \quad (1)$$

где k — коэффициент превышения отношения сигнал/шум.

После обнаружения сигнала производится доопределение времени вступления P -волны — t_p . Для этого на интервале записи длительностью 5 с, предшествующей моменту обнаружения t_0 , находится точка перемены знака Z -компоненты, ближайшая к выполнению критерия обнаружения (1). Однако зарегистрированный сигнал может быть

вызван взрывом, всплеском сейсмического шума "культурного происхождения, далекими землетрясениями или их "хвостами", а также очень слабыми землетрясениями, непригодными к обработке. Отбраковка таких событий происходит на основании структурного анализа цифровой сейсмограммы программой "Редактор". Этот анализ является как бы вторым этапом обнаружения.

При создании алгоритма редактирования данных мы пытались формализовать наиболее характерные структурные признаки землетрясений ближней зоны. Эти признаки очевидны для каждого, кто знаком с методами ручной обработки аналоговых сейсмограмм. Алгоритм не претендует на универсальность, тем не менее позволяет довести число ложных срабатываний до одного в 10 сут при минимизации пропусков полезных сигналов.

Алгоритм "Редактор" начинает свою работу с проверки сигнала на предельную удаленность источника и энергию колебаний, зарегистрированную в пункте наблюдений. Ограничения определены объемом оперативной памяти (ОЗУ), чувствительностью наблюдений и возможности программно-математического обеспечения аппаратуры АПСС.

Далее следуют амплитудные признаки, которые позволяют осуществить отбраковку сейсмических сигналов "культурного" происхождения или взрывов. Признаки определяются различными соотношениями максимальных амплитуд в цугах продольных и поперечных волн по вертикальной и горизонтальным компонентам. Вводя эти признаки, мы предположили, что максимальная амплитуда записи землетрясения соответствует цугу S — волны. Такое допущение в большой степени правомерно, если учесть, что мы работаем с землетрясениями Среднеазиатского региона с эпицентрными расстояниями до 700 км.

Отбраковка телесеизмических землетрясений производится по скорости спада энергии колебаний почвы в хвостовой части записи.

Невыполнение хотя бы одного из признаков является достаточным условием для снятия режима обработки и перехода к режиму слежения за сейсмической обстановкой.

В случае положительного прохода по всем признакам происходит переход к программам обработки.

Для выделения S -волны был разработан алгоритм, использующий метод частотной фильтрации. Блок фильтров состоит из двух каскадов низкочастотных фильтров. Каждый каскад представляет собой два параллельно включенных ФНЧ-фильтра (с частотами среза 0,5 и 0,05 Гц). На вход первого каскада фильтров поступают значения модуля вектора 3-компонентного сейсмического сигнала, выбираемого из блока буферной памяти по текущему адресу. Выходом первого каскада является разностный сигнал $F = |F_{0,5} - F_{0,05}|$, который поступает на вход второго каскада. Выходом второго каскада являются сигналы

$$\Phi(n) = n\hat{F}_{0,05} - \hat{F}_{0,5}, \quad (2)$$

где $n = 1,5; 3,0$.

При этом в ячейках памяти фиксируются адреса текущей информации выполнения условий

$$\Phi(1,5) \geq 0 \text{ и } \Phi(3,0) \geq 0. \quad (3)$$

Моментом предварительного определения начала S -волны служит выполнение условий $\Phi(3) \geq 0$, принадлежность адреса текущей информации интервалу возможного вступления S -волны — τ_S . Уточненным моментом вступления S -волны считается момент первого выполнения условия $\Phi(1,5) \geq 0$ в интервале τ_S . Далее производится расчет времени $t_S - t_P$ по найденным адресам вступления P - и S -волн.

В основу алгоритма определения азимута на эпицентр положен принцип оценки текущего во времени направления движения точки $\alpha(t)$ в плоскости (X, Y) , взвешен-

ного относительно криволинейности ее траектории:

$$\alpha(t) = \arctg(x(t)/y(t))R(t). \quad (4)$$

где

$$R(t) = \left| \frac{[x'(t)^2 + y'(t)^2]^{3/2}}{\begin{vmatrix} x'(t) & y'(t) \\ x''(t) & y''(t) \end{vmatrix}} \right|;$$

$x(t), y(t)$ — значения мгновенных амплитуд по компонентам X, Y . Весовая функция $R(t)$ определяет меру текущей прямолинейности движения точки. Результирующее направление движения точки определяется как средневзвешенное значение

$$\bar{\alpha} = \frac{\int_0^T \alpha(t) dt}{\int_0^T R(t) dt} \quad (5)$$

(T — временной интервал, соответствующий начальной части сейсмограммы землетрясения).

При обработке цифрового сигнала в формуле (5) переходим от интеграла к суммированию. Окно суммирования ($0-T$) определяется первоначально с помощью разностного годографа

$$T = (t_S - t_P)/20 \pm 0,5 \text{ с}. \quad (6)$$

Для уменьшения ошибки, обусловленной полнотой кратного обхода по контуру, вводится условие

$$\lim_{n \rightarrow T/\Delta t} \frac{I_n}{J_n} \approx 1, \quad (7)$$

где

$$I_n = \sum_{i=1}^n x_i \text{ при } x_i \geq 0,$$

$$J_n = \sum_{i=1}^n x_i \text{ при } x_i < 0.$$

Текущий угол α_i определяется как

$$\alpha_i = \arctg(\Delta x_i/\Delta y_i),$$

$$\Delta x_i = x_{i-1} - x_{i+1}, \quad \Delta y_i = y_{i-1} - y_{i+1} \quad (8)$$

(x соответствует $E-W$, $y - N-S$).

В качестве весового коэффициента используется выражение

$$R_i = (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)^{1/2}/(\Delta \alpha_i + k), \quad (9)$$

где $\Delta \alpha_i = |\alpha_i - \alpha_{i-1}|$; k — коэффициент, позволяющий сгладить неоправданно большие веса, возникающие при $\Delta \alpha_i \rightarrow 0$.

Окончательно имеем выражение

$$\alpha' = \frac{\sum_{i=1}^n (a_i R_i)}{\sum_{i=1}^n R_i}, \quad (10)$$

здесь число n определяется условиями (6), (7).

Для однозначного определения азимута на эпицентр дополнительно привлекается информация о характере движения точки в вертикальной плоскости, получаемая как

$$F = \sum_{i=1}^n (x_i z_i). \quad (11)$$

Отсюда значение азимута α определяется из выражения

$$\alpha = \alpha' + \begin{cases} 0 & \text{при } F > 0, \alpha' \geq 0, \\ 2\pi & \text{при } F > 0, \alpha' < 0, \\ \pi & \text{при } F \leq 0. \end{cases} \quad (12)$$

При реализации выше рассмотренного алгоритма учитывается ряд особенностей, характерных для реальных записей землетрясений:

проверяется возможность определения азимута по амплитудам первых вступлений (выполнение условия $A > 15A_m$);

для слабых амплитуд проверяется наличие в первых фазах записи головной продольной волны. В этом случае оценивается возможность определения азимута по прямой или головной P -волне на участке записи, определяемой по годографу $t_S - t_P$.

Расчет эпицентрального расстояния (Δ , км) проводится с помощью разностного годографа $t_S - t_P$, представленного в аналитическом виде. В качестве рабочих годографов выбран годограф УЛАР для глубины 20 км и годограф Лукка для глубины 200 км.

Определение координат эпицентра проводится по стандартным формулам перевода полярных координат Δ и α в географические координаты φ и λ .

Определение энергетического класса K производится по номограмме Т.Г. Раутиан [4], представленной в аналитическом виде и преобразованной для скоростной характеристики:

$$K = 12,875 + 0,185 \ln (A_{Pm} T_{Pm} + A_{Sm} T_{Sm}) + 1,44 \ln \Delta. \quad (13)$$

Расчет магнитуды MLH проводится согласно традиционной в практике сейсмологических наблюдений расчетной формуле Гутенберга [4].

В основу алгоритма определения интенсивности колебаний почвы в пункте наблюдения взята зависимость между балльностью и величиной максимальной скорости колебаний почвы в пункте наблюдения согласно шкале $MSK-64$ [4].

Расчет интенсивности колебаний почвы в эпицентре осуществлялся по формуле Н.В. Шебалина [5].

В ходе расчета значения вычисленных параметров заносятся в рабочие ячейки ОЗУ микроЭВМ для последующего вывода по запросу оператора на видеотабло.

Программирование и отладка ПМО ОСИ произведены при помощи системы отладки СО-04 и микроЭВМ "Veformika".

Результаты наблюдений. Станцией АПСС был проведен годичный цикл наблюдений на с/с "Хумсан" Приташкентского района.

За весь период полевых наблюдений не зарегистрировано сбоев в работе АПСС по причине технического отказа какого-либо из ее блоков или узлов. АПСС работала круглосуточно при колебаниях температуры в месте установки обрабатывающего центра от $+5$ до $+40^\circ\text{C}$ и при влажности до 100% и показала себя высоконадежной и простой в эксплуатации современной аппаратурой сбора и оперативной обработки

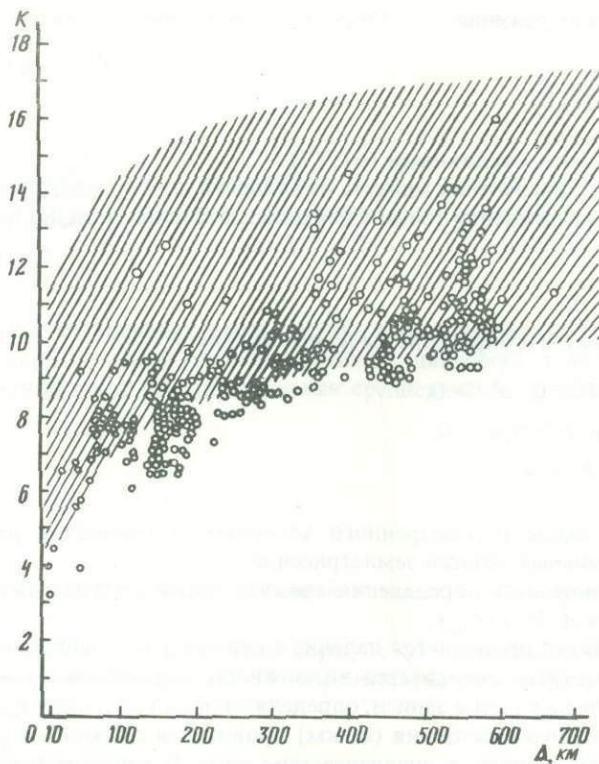


Рис. 3. Представительность землетрясений, зарегистрированных аппаратурой АПСС

сейсмической информации. Всего за период наблюдений аппаратурой АПСС зарегистрировано 375 землетрясений. За этот же период на с/с "Хумсан", оснащенной высокочувствительной короткопериодной аналоговой аппаратурой, зарегистрировано и обработано 357 событий. Коэффициент надежности регистрации аппаратуры АПСС составляет 90,4%.

Рис. 3 отображает представительность регистрации землетрясений аппаратурой АПСС по энергетическим классам и эпицентральному расстояниям. Заштрихованная область рисунка соответствует рассчитанной теоретически представительности регистрации аппаратуры АПСС.

На основании полученных за период наблюдений данных проведена оценка погрешности определения параметров аппаратурой АПСС.

Методом количественной оценки коэффициента надежности оценивалась работа алгоритма определения категории глубины источника. Данные об истинной глубине источника снимались непосредственно с лент. Причем события с глубиной свыше 70 км признавались глубокими, а события, имеющие $h > 70$ км, — коровыми. Коэффициент надежности определения глубины h составил 85,1%.

Погрешность определения остальных параметров оценивалась величиной его среднеквадратичного отклонения.

В статистической оценке погрешности $S-P$ участвовало 292 события, что обеспечило при сохранении однородности выборки значение $\sigma(S-P) = \pm 0,7$ с. Причем 80,5% событий имеют $\sigma(S-P) \leq \pm 0,5$ с. Графики взаимной корреляции значений $S-P$, Δ , определенных АПСС и с/с "Хумсан", приведены на рис. 4.

Оценка погрешности определения эпицентрального расстояния проводилась отдель-

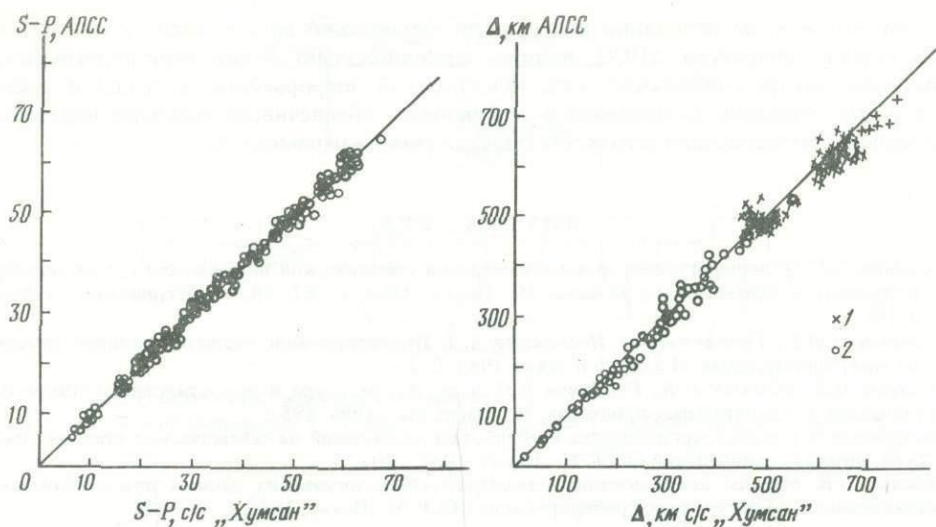


Рис. 4. График корреляции значений S, P и Δ по данным аппаратуры АПСС и с/с "Хумсан"
 1 – глубокие землетрясения; 2 – коровые

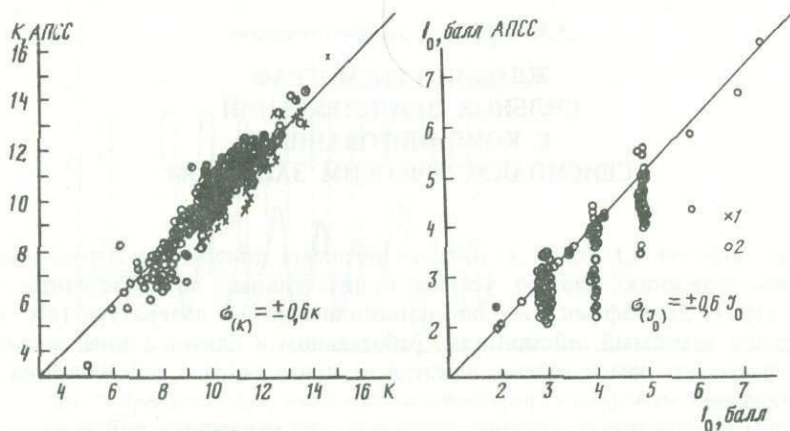


Рис. 5. График корреляции значений энергетических классов K и интенсивности в очаге I_0
 1 – по данным срочного бюллетеня; 2 – с/с "Хумсан"

но для коровых и глубоких землетрясений и составило расчетные значения: для глубоких $\sigma(\Delta_r) = \pm 19,5$ км при числе событий $N = 40$; для коровых $\sigma(\Delta_k) = \pm 29,8$ км при числе событий $N = 252$.

Оценка погрешности определения энергетического класса производилась отдельно по данным срочного бюллетеня сводной обработки и по данным бюллетеня с/с "Хумсан". Графики приведены на рис. 5. Значение СКО для сводного бюллетеня определялось по 153 событиям и составило $\sigma(K) = \pm 0,6 K$; для с/с "Хумсан" при числе событий $N = 290$ $\sigma(K) = \pm 0,6 K$.

Определение погрешности магнитуды MLH и интенсивности I_0 проводилось по данным срочного бюллетеня сводной обработки. В расчете MLH участвовало 151 событие с $\sigma(MLH) = \pm 0,3 MLH$.

В расчете I_0 участвовало 105 событий и получено значение $\sigma(I_0) = \pm 0,6$ балла. График взаимной корреляции I_0 для АПСС и сводного бюллетеня приведен на рис. 5.

Таким образом, на основании результатов наблюдений можно сделать выводы, что разработанная аппаратура АПСС, являясь принципиально новой сейсмометрической аппаратурой экспресс-обработки сейсмологической информации, надежна в работе, проста в эксплуатации, экономична и эффективна, обеспечивает высокую надежность обнаружения землетрясений и точность определения их параметров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Катренко В.Г. Об аппаратуре цифрового измерения сейсмической информации // Сейсмометры, регистраторы и сейсмические каналы. М.: Наука, 1986. С. 62–69. (Сейсмические приборы; Вып. 18).
2. Алексеенко А.Г., Голицин А.А., Иванников А.Д. Проектирование радиоэлектронной аппаратуры на микропроцессорах. М.: Радио и связь, 1984. 272 с.
3. Нестеров П.В., Шаньгин В.Ф., Горбунов В.Л. и др. Архитектура и проектирование микроЭВМ. Организация вычислительных процессов. М.: Высш. шк., 1986. 495 с.
4. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях системы сейсмических наблюдений СССР. М.: Наука, 1982. 270 с.
5. Шебакин Н.В. Методы использования инженерно-сейсмологических данных при сейсмическом районировании // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 95–112.

УДК 550.34

В.М. Фремд, С.А. Школьников

ЖДУЩИЙ СЕЙСМОГРАФ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С КОМБИНИРОВАННЫМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИМ ЗАПУСКОМ

Довольно часто за 0,1–0,5 с до начала ощутимых колебаний грунта при близких сильных землетрясениях можно услышать интенсивные низкочастотные звуковые колебания (гул). Этот эффект, неоднократно описанный в литературе (см., например, [1]) и хорошо знакомый сейсмологам, работающим в ближней зоне сильных землетрясений, насколько нам известно, никогда не применялся в сейсмических приборах сильных движений.

Между тем в некоторых случаях интенсивность указанных акустических колебаний оказывалась достаточной для срабатывания обычных сейсмических стартеров ждущих приборов. Такое включение акселерографа SMA-1 было отмечено, например, в ближней зоне Джиргатальского землетрясения 26 октября 1984 г. с магнитудой $M = 6,1$ (частное сообщение).

По-видимому, целесообразно дополнить существующие системы запуска сейсмографов сильных движений, работающих в режиме ожидания, акустическими стартерами для предварительного включения регистраторов этих сейсмографов.

Типичный прибор, работающий в режиме ожидания с сейсмическим запуском, — сейсмограф сильных и разрушительных землетрясений АС3-2 [2]. Так же как и в аналогичных сейсмографах других типов, его сейсмический стартер включает регистратор при превышении амплитуды колебаний грунта заданного порога срабатывания в сейсмическом диапазоне частот. Функциональная блок-схема такого сейсмографа показана на рис. 1, а специальных пояснений не требует. Отметим лишь, что время записи после последнего срабатывания порогового устройства задается механическим



Рис. 1. Блок-схема ждущего сейсмографа
 а – простейшего; б – сильных землетрясений с комбинированным запуском

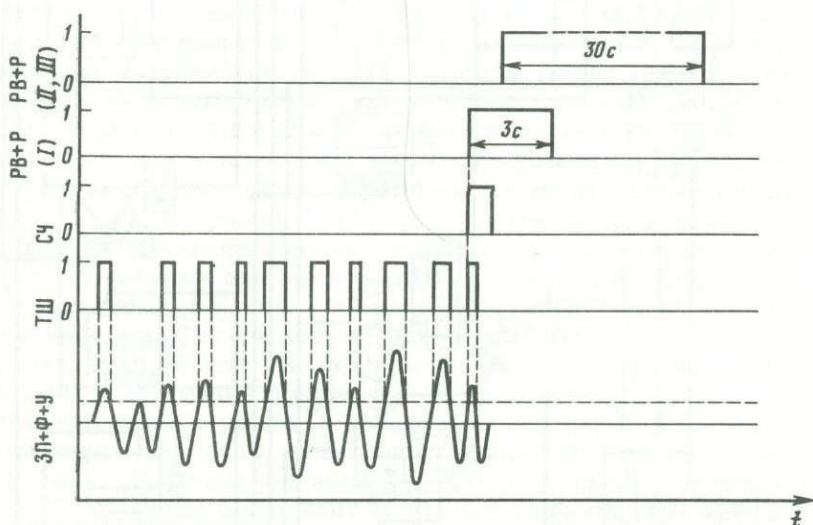


Рис. 2. Временная диаграмма работы сейсмографа с цифровым блоком
 I–III – режимы работы

реле времени, параметры которого согласованы с усредненными характеристиками близких сильных землетрясений.

Для того чтобы обеспечить включение сейсмографа от звуковых колебаний, предваряющих ощутимые сейсмические движения грунта, в прибор следует ввести канал акустического запуска (акустический стартер). При этом необходимо, во-первых, предусмотреть защиту от ложных включений при акустических помехах и, во-вторых, согласовать временные диаграммы работы сейсмического и акустического стартеров сейсмографа.

Блок-схема сейсмографа сильных землетрясений с комбинированным запуском приведена на рис. 1 б. На рис. 2 показана временная диаграмма работы основных узлов сейсмографа, на рис. 3 – принципиальная схема.

Сейсмограф работает следующим образом. При приходе акустического сигнала он воспринимается звукоприемником (использован капсуль динамического микрофона МД-52Б). Сигнал с выхода звукоприемника поступает на первый каскад селективного усилителя СУ, реализованного на операционном усилителе DA 1, включенном по схеме генератора прямоугольных импульсов, однако элементы обратной связи на неин-

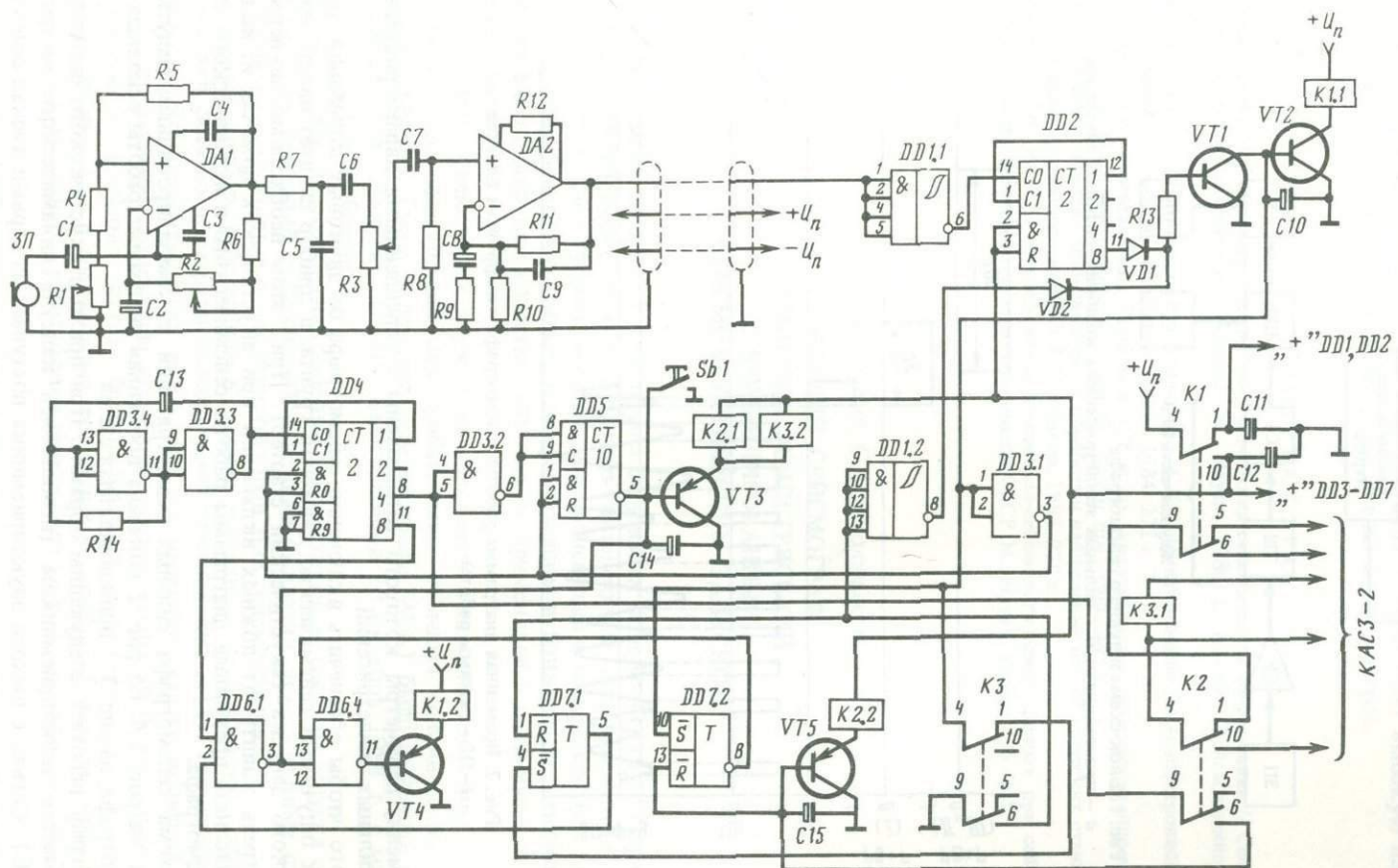


Рис. 3. Принципиальная схема усилителя и цифрового блока реле времени

DA1 – К 153 УД1; DA2 – К 140 УД 12; DD1 – К 155 ТЛ 1; DD2 – К 155 ИЕ5; DD3, DD6 – К 155 ЛА 3; DD4 – К 155 ИЕ 2; DD5 – К 155 ИЕ 1; DD7 – К 155 ТМ 2; VT1 – КТ 315Б; VT2, VT3, VT4, VT5 – ГТ 403Ж; VD1, VD2 – Д9Б; K1, K2, K3 – РПС-20

вертирующий вход (R_1, R_4, R_5) подобраны так, что возбуждения не происходит. Сигнал поступает на вход второго каскада операционного усилителя (используется вывод, предназначенный для подключения цепи коррекции). Резонансная частота зависит в основном от номиналов элементов C_3, C_2, R_2 и приближенно может быть вычислена по формуле

$$f_0 = 0,0288 / \sqrt{R_2 C_2 C_3}.$$

Резистором R_2 можно изменять резонансную частоту в пределах 85–180 Гц, а резистором R_1 устанавливать необходимую "добротность" селективного усилителя (изменяя крутизну спада АЧХ в пределах 8–25 дБ на октаву).

Второй каскад собран на микроомном операционном усилителе $DA 2$. Его полоса пропускания 90–180 Гц, крутизна спада АЧХ 10 дБ на октаву. Резистором R_3 устанавливается общий коэффициент усиления ($K_{\max} = 10^6$).

Указанные регулировки (R_1, R_2, R_3) позволяют оперативно подбирать частоту максимального усиления, ширину полосы пропускания усилителя и, исходя из конкретных условий, выбирать компромисс между чувствительностью усилителя к ожидаемым частотам гула и количеством ложных срабатываний от акустических помех.

Отфильтрованные и усиленные сигналы поступают на триггер Шмитта (ТШ) $DD 1.1$. При превышении сигналами на входе ТШ заданного уровня ($\sim 0,8$ В) на его выходе вырабатываются импульсы отрицательной полярности, поступающие на вход счетчика (Сч) $DD 2$, служащего для исключения срабатывания системы от одиночных акустических импульсов. После накопления на счетчике восьми импульсов, соответствующих ~ 8 периодам акустической волны, высокий уровень напряжения (логическая "1") сменится на низкий (логический "0"). Это приведет к срабатыванию ключа $VT 1, VT 2$, а следовательно, и поляризованного реле $K 1$ (обмотка $K 1.1$), при этом:

- 1) включается цифровое реле времени (ЦРВ) (элементы $DD 3-DD 7$);
- 2) через контакты 9–6 $K 1$ и 4–1 $K 2$ включается регистратор (Р), который начинает вести запись информации от сейсмических датчиков (СД);
- 3) отключаются от питания ТШ $DD 1$ и счетчик $DD 2$, что обеспечивает независимость работы системы от дальнейшей акустической обстановки;
- 4) напряжение низкого уровня, сохраняющееся некоторое время после включения с помощью конденсатора $C 10$, устанавливает триггер $DD 7.2$ в состояние "0", триггер $DD 7.1$ (через замкнутые контакты 4–1 $K 3$) в состояние "1" и, действуя через инвертор $DD 3.1$ на входы синхронного сброса & R счетчиков $DD 4, DD 5$, обнуляет их. Последовательность прямоугольных импульсов с периодом 0,375 с, играющих роль образцовых интервалов времени, формируется мультивибратором на элементах $DD 3.3$ и $DD 3.4$ и поступает на четырехразрядный счетчик с отдельными выходами $DD 4$.

Далее работа сейсмографа осуществляется в одном из трех режимов.

Первый режим. Если включение регистратора связано с акустической помехой и землетрясения не происходит, то по прошествии восьмого импульса, т.е. через 3 с, "0" на выходе 11 счетчика $DD 4$ сменится "1", что приведет к появлению "0" на выходе элемента $DD 6.1$, к срабатыванию ключа $VT 3$ и реле $K 2$ (обмотка $K 2.1$). Замкнувшиеся контакты 4–10 $K 2$ отключат лампу осветителя регистратора (двигатель транспортировки фотопленки продолжает работать). Еще через четыре импульса (т.е. через 1,5 с) от положительного перепада напряжения (т.е. от "0" к "1") с выхода 8-го счетчика $DD 4$ (прошедшего через замкнутые контакты 9–6 $K 2$) срабатывает ключ $VT 5$, реле $K 2$ (обмотка $K 2.2$), полностью выключится регистратор, триггер $DD 7.2$ перебросится в состояние "1", что вызовет появление "0" на выходе элемента $DD 6.4$, срабатывание ключа $VT 4$, реле $K 1$ (обмотка $K 1.2$), отключение исполнительной (элементы $DD 3-DD 7$) и подключение ждущей (элементы $DD 1, DD 2$) частей цифрового реле времени (при этом напряжение высокого уровня, некоторое время сохраняемое конденсатором $C 12$, обнулит счетчик $DD 2$, действуя на входы синхронного сброса & R). Таким образом, система вернулась в исходное состояние. Разделенность во времени

выключения лампы и двигателя регистратора позволяет сделать полторасекундную паузу на фотопленке между соседними записями, облегчающую их последующий анализ (аналогичную функцию выполняло ранее примененное механическое реле времени).

Второй режим. В случае, если через интервал времени до 3 с после включения регистратора происходят ощутимые сейсмические колебания, амплитуда которых достаточна для срабатывания сейсмического стартера СС, то от сигнала с его выхода срабатывает реле К3 (обмотка К3.1), при этом триггер DD7.1 перебросится из "1" в "0", т.е. "0" будет на входе 2 элемента DD6.1, а это значит, что при любом сигнале на входе 1 (поступающем с выхода 11 DD4) на выходе этого элемента будет "1", что не даст сработать ключу VT3. Но в это время импульсы с выхода 8 счетчика DD4, проходя через инвертор, будут считаться декадным счетчиком DD5, и через $0,375 \times 8 \times 10 = 30$ с на его выходе появится импульс отрицательной полярности ("0"), от которого срабатывают ключ VT3, реле К2 и К3 (обмотки К2.1 и К3.2 соответственно). В дальнейшем все будет, как в первом режиме. Таким образом, задержка выключения реле увеличилась до 30 с. В течение этого времени регистратор (Р) записывает информацию от сейсмических датчиков (СД).

Третий режим работы сейсмографа осуществляется в том случае, если акустический сигнал, предшествующий сейсмическим колебаниям, отсутствует. При этом с приходом сейсмических колебаний, уровень которых превышает порог срабатывания сейсмического стартера СС, сигнал с его выхода включит реле К3 (обмотка К3.1). Сигнал "0" через контакты 9–6 К3 попадет на триггер Шмитта DD1.2, и с его инверсного выхода "1" поступит на ключ VT1, VT2, сработает реле К1 (обмотка К1.1) и все будет, как в первом режиме, с той лишь разницей, что триггер DD7.1 окажется в состоянии "0", поскольку его вход \bar{R} отсоединен от прежней цепи через контакты 4–1 К3, а вход \bar{R} соединен с "0" через 9–6 К3, значит, как и во втором режиме, на выходе элемента DD6.1 будет "1" и задержка времени составит 30 с. В этом режиме цифровое реле времени совпадает по своим функциям с механическим. Для удобства наладки, установки и проверки прибора введена кнопка "сброс" SB1, при нажатии на которую система, находящаяся в любом из трех режимов, переходит в режим ожидания. Следует также отметить, что через нормально замкнутые контакты 5–9 К1 и 1–4 К2 схема электрических соединений собственного, механического реле времени сейсмографа полностью восстанавливается, и для его включения достаточно отключить питание от цифрового блока, когда тот находится в режиме ожидания.

В Институте физики Земли АН СССР был изготовлен и испытан в лабораторных условиях макет сейсмографа сильных землетрясений с комбинированным сейсмоакустическим запуском. В макете был использован серийный трехкомпонентный ждущий сейсмограф АСЗ-2, в корпусе которого размещалась плата с цифровым блоком. Сейсмическим стартером (СС на рис. 1) являлся внутренний магнитоэлектрический стартер сейсмографа. Звукоприемник и селективный усилитель с регулировками размещались в отдельном корпусе и соединялись с сейсмографом через кабель.

Макет был испытан во всех трех режимах работы. Результаты испытаний подтвердили все указанные выше параметры сейсмографа с сейсмоакустическим запуском, что дает основание рекомендовать такие приборы для использования их в ближних зонах сильных землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гутенберг Б. Основы сейсмологии ОНТИ. М.; Л., 1935. 149 с.
2. Кирнос Д.П., Касторский С.А., Соловьев В.Н., Чистяков В.А. Инженерно-сейсмометрический акселерограф АСЗ // Разработка и исследование сейсмической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 5–16. (Сейсмические приборы; Вып. 17).

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕЙСМОМЕТРЫ И АКСЕЛЕРОМЕТРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И НИЗКОЧАСТОТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ВИБРАЦИИ

В современной практике регистрации и измерений уровней ускорения абсолютных сейсмических колебательных движений земной поверхности и низкочастотной вибрации оборудования и сооружений крупномасштабных объектов наряду с широко известными механическими, магнитоэлектрическими, индуктивными, индукционными и другими находят широкое применение пьезоэлектрические одно- и трехкомпонентные сейсмометры и акселерометры.

Пьезоэлектрический однокомпонентный акселерометр, приведенный на рис. 1, предназначен для регистрации уровней ускорения слабых и сильных землетрясений, а также низкочастотной промышленной вибрации. Акселерометр может быть использован как индивидуально для работы в одном из горизонтальных или в вертикальном направлении, так и для компоновки трехкомпонентных сейсмометров.

Принцип действия акселерометра основан на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в том, что чувствительный пьезоэлемент в виде кольца, изготовленный на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца (ЦТС-19), при действии на него механических сил электрически поляризуется, т.е. происходит преобразование механической энергии в электрическую.

При воздействии сейсмических колебаний Земли или промышленной вибрации на корпус прибора с ускорением a грузик акселерометра, работающий как инерционный элемент, своей массой m изгибает с переменной силой мембрану, вызывая тем самым деформацию пьезоэлемента, закрепленного на мембране. Эта переменная сила равна $F = am$ и пропорциональна ускорению инерционного элемента. Следовательно, на выходных проводниках виброизмерительного преобразователя генерируется переменное электрическое напряжение, пропорциональное ускорению инерционного элемента и в конечном итоге пропорциональное ускорению сейсмических колебаний Земли или промышленной вибрации.

Устанавливаемые в акселерометрах пьезоэлементы проходят искусственное термоустарение, что повышает температурную стабильность, снижает погрешность вибропреобразований и повышает устойчивость параметров не менее чем на три года.

Основные параметры акселерометра:

Действительный коэффициент преобразования, мВ · с ² /м	Не менее 200
Относительный коэффициент поперечного преобразования, %	Не более 1,0
Неравномерность АЧХ, %	Не более 1,0
Нелинейность амплитудной характеристики, %	Не более 2,0
Частотный диапазон, Гц	0,1–500
Габаритные размеры, мм	70 × 70
Масса, кг	0,5

Конструкция акселерометра представляет собой устройство, состоящее из виброизмерительного преобразователя, согласующего усилителя и узла функционального контроля. Все функциональные узлы крепятся к основанию и защищены от окружающей среды колпаком, который совместно с уплотнительным кольцом герметизирует акселерометр. Акселерометр крепится к объекту с помощью винта и подключается к измерительной аппаратуре посредством кабеля с разъемом типа РС7.

Пьезоэлектрический трехкомпонентный сейсмометр, приведенный на рис. 2, предназ-

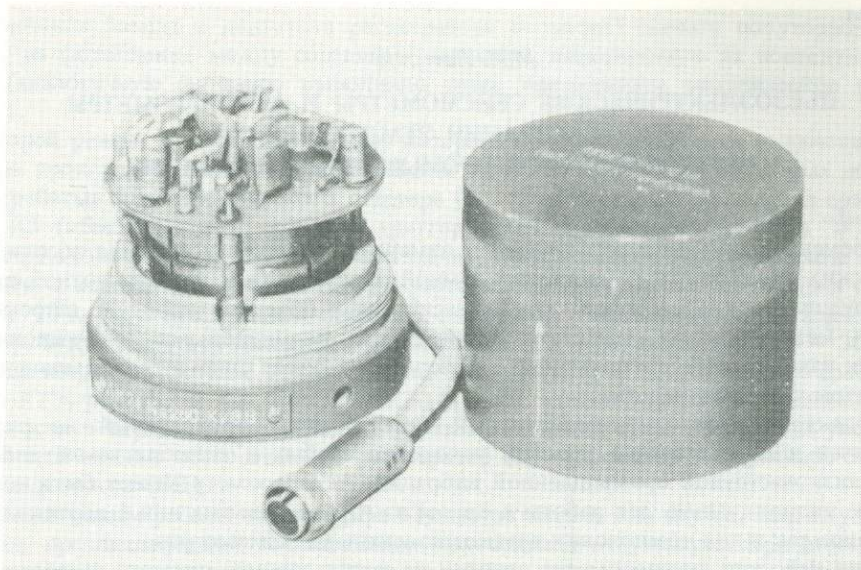


Рис. 1. Пьезоэлектрический однокомпонентный акселерометр

начен для измерения уровней ускорения абсолютных сейсмических колебательных движений земной поверхности, а также низкочастотной промышленной вибрации.

Принцип действия сейсмометра основан на работе трех идентичных однокомпонентных пьезоэлектрических акселерометров, приведенных на рис. 1.

Конструкция сейсмометра представляет собой устройство, состоящее из трех акселерометров, трех измерительных усилителей, трех ФНЧ и узла функционального контроля. Все функциональные узлы крепятся на поверхности круглого основания, имеющего три проушины для крепления на объекте. В боковую кольцевую выточку основания установлено уплотнительное кольцо, создающее вместе с крышкой герметизацию сейсмометра. В нижней части основания сейсмометра установлена планка, служащая для ручной переноски. Подключение сейсмометра к измерительной аппаратуре производится с помощью разъема типа РСГ19.

Основные параметры сейсмометра:

Частотный диапазон ФНЧ, Гц	0,1–31,5
Неравномерность АЧХ ФНЧ, %	± 10
Граничная частота среза ФНЧ, Гц	31,5 ± 10%
Крутизна среза ФНЧ, дБ	Не менее 40
Коэффициент усиления,	Не менее 10
Питание, В	± 15
Габаритные размеры, мм	289 × 166
Масса, кг	Не более 5

Работа сейсмометра заключается в следующем. Предварительно усиленные сейсмосигналы трех акселерометров подаются на измерительные усилители, собранные на микросхемах К140УД8. Далее сейсмосигналы поступают на фильтры нижних частот, представляющие собой трехкаскадные схемы, собранные на микросхемах К140УД8. Последовательно включенные каскады ФНЧ выполнены по одинаковой схеме активного фильтра и обеспечивают высокую крутизну спада АЧХ при усилении сигнала в полосе пропускания не менее чем на 40 дБ на октаву. Отфильтрованные сейсмосигналы поступают на выходной разъем.

Скважинный пьезоэлектрический трехкомпонентный сейсмометр, приведенный

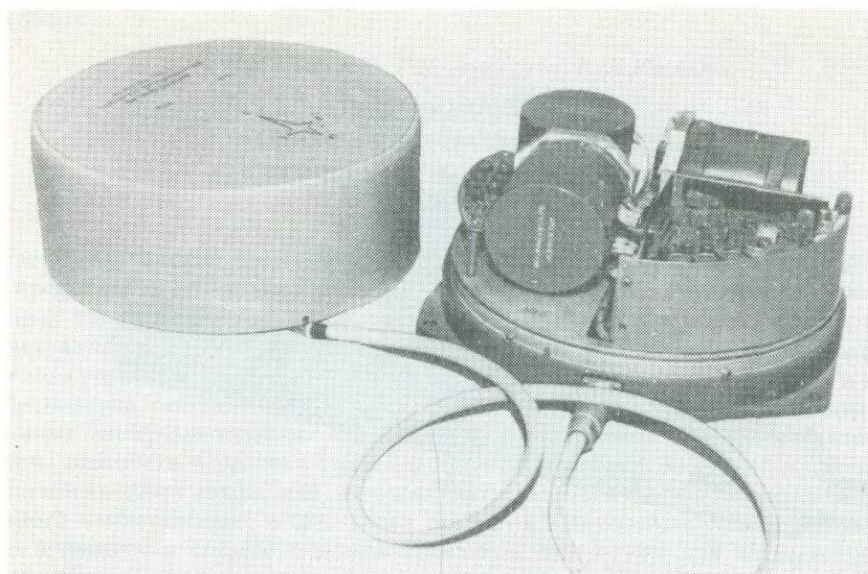


Рис. 2. Пьезоэлектрический трехкомпонентный сейсмометр

на рис. 3, предназначен для применения в области инженерно-сейсмологических исследований при скважинных инструментальных наблюдениях, необходимых для определения сейсмической опасности в районах строительства атомных электростанций и других крупномасштабных сооружений, для изучения слабых и сильных землетрясений, а также для детального сейсмо- и микросейсморайонирования.

Принцип действия сейсмометра основан на работе трех однокомпонентных виброизмерительных преобразователей, работающих соответственно в трех взаимно перпендикулярных направлениях — вертикальном и двух горизонтальных.

Конструкция сейсмометра представляет собой устройство, состоящее из трех ВИП и предварительных усилителей. Функциональные узлы крепятся как в нижней, так и в верхней части несущего корпуса. Герметизация сейсмометра обеспечивается с помощью двухрядных уплотнительных колец и двух колпаков. Закрепление сейсмометра в скважине производится с помощью четырех пят и эксцентрикового кулачка, приводимого в зажимающее действие посредством тросика с дневной поверхности Земли. Подключение сейсмометра к измерительной аппаратуре производится с помощью герметического кабеля и герметического разъема.

Основные параметры сейсмометра:

Диапазон преобразования виброускорений, м/с^2	0,03–2
Диапазон частот, Гц	0,1–150
Действительный коэффициент преобразования ВИП, $\text{мВ} \cdot \text{с}^2/\text{м}$	Не менее 500
Относительный коэффициент поперечного преобразования, %	Не более 1,0
Неравномерность АЧХ, %	Не более 1,0
Нелинейность амплитудной характеристики, %	Не более 2,0
Глубина установки, м	Не более 150
Диаметр скважины, мм	110–150
Питание от батарейного источника, В	± 15
Габаритные размеры, мм	740 x 90
Масса, кг	Не более 10

Работа сейсмометра заключается в следующем. Генерируемые сигналы виброизмерительных преобразователей подаются на предварительные усилители, собранные на микросхемах К140УД8, и далее по кабельной связи на измерительную аппаратуру.

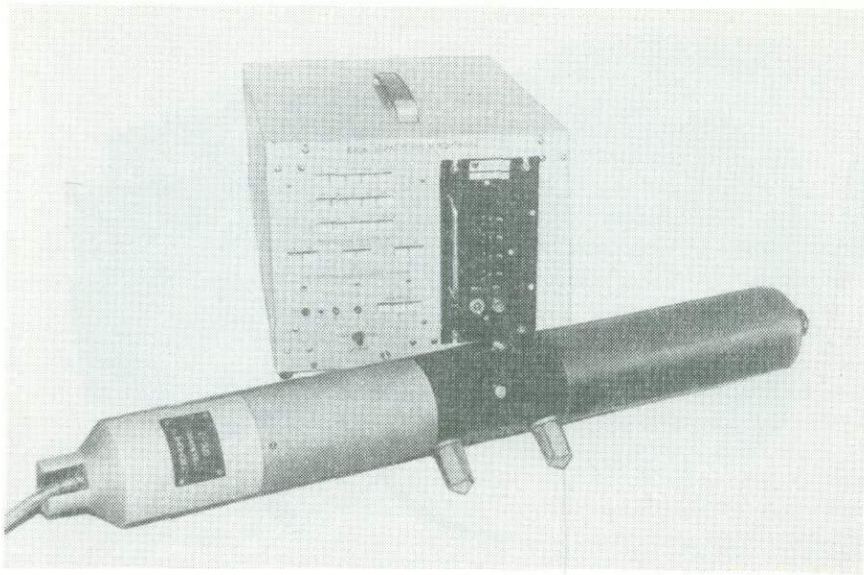


Рис. 3. Скважинный пьезоэлектрический трехкомпонентный сейсмомер

Климатическое исполнение акселерометров и сейсмометров наземного базирования удовлетворяет требованиям эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом. Сейсмомеры предназначены для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью, например, в неотапливаемых и неventилируемых подземных помещениях, в том числе в шахтах, подвалах, в почве, в некоторых цехах, где возможно наличие воды или наблюдается частая конденсация влаги на стенах и потолке.

Приведенные акселерометры и сейсмомеры по техническим характеристикам превосходят многие аналоги, как отечественные, так и зарубежные, и должны найти широкое применение на различных крупномасштабных сооружениях.

Скважинные сейсмомеры, акселерометры и сейсмомеры наземного базирования представлялись на межведомственные приемочные испытания и прошли метрологическую аттестацию.

В настоящее время проводятся работы по внедрению акселерометров и сейсмометров наземного базирования в микроэлектронную промышленность, что позволит значительно сократить процент брака выпускаемых интегральных микросхем, находящийся в прямой зависимости от воздействия низкочастотной промышленной вибрации.

М.М. Латыпов, Г.К. Аракелян, В.М. Касянюк

ТРЕХКОМПОНЕНТНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЕЙСМОМЕТР С КУБИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИОННОЙ МАССОЙ

Трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмометр с кубической инерционной массой предназначен для измерения и регистрации уровней ускорения абсолютных колебательных движений грунта и сооружений при микросейсмических, слабых и сильных землетрясениях, а также промышленной вибрации, возникающей в результате работы тяжелого ударного оборудования, движения транспорта, взрывных работах и т.д.

Применение сейсмометра может быть осуществлено в области сейсмометрии при наземных инструментальных наблюдениях, необходимых для определения сейсмической опасности в районах строительства атомных электростанций и других крупномасштабных сооружений, для изучения афтершоковой последовательности в районах сильного землетрясения и детального сейсмо- и микросейсмораионирования. Сейсмометр применим в составе специализированной аппаратуры для антисейсмической защиты различных крупномасштабных сооружений в таких областях промышленности, как атомная энергетика, газовая, химическая, нефтяная, нефтехимическая и др. Применение сейсмометра в области электронной промышленности приведет к значительному снижению процента брака изготавливаемых микросхем и полупроводниковых приборов, возникающего в результате воздействия на технологическое оборудование микросейсмической и промышленной вибрации.

Данный сейсмометр удовлетворяет требованиям эксплуатации в районах с умеренным и холодным климатом. Сейсмометр предназначен для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью, например в неотапливаемых и неветилируемых подземных помещениях, в том числе в шахтах, подвалах, в почве, в некоторых цехах, где возможно наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке.

Основные показатели назначения:

Действительный коэффициент преобразования ВИП, мВ · с ² /м	Не менее 600
Относительный коэффициент поперечного преобразования ВИП, %	Не более 5
Неравномерность АЧХ ВИП, %	Не более 2
Нелинейность амплитудной характеристики, %	Не более 3
Емкость ВИП, пФ	3000±5%
Сопротивление изоляции ВИП, ГОм	Не менее 10
Установочный резонанс ВИП, Гц	Не менее 500
Частота поперечного резонанса ВИП, Гц	Не менее 500
Диапазон ускорений, м/с ²	0,015–2
Диапазон частот, Гц	0,1–500
Питание от источника постоянного напряжения, В	± 15
Потребляемый ток, А	Не более 0,03
Габаритные размеры, мм	98 × 130
Масса, кг	Не более 3

Устройство сейсмометра представлено на рис. 1. Сейсмометр содержит дюралюминиевый корпус 1 с тремя проушинами 2, служащими для крепления на объекте, кольцевым уплотнителем 3 и герметичным разъемом 4 типа РСГ-7, колпак 5, кубическую инерционную массу 6, в три взаимно перпендикулярных отверстия которой вставлена шестилучевая крестовина 7, на лучах крестовины с помощью втулок 8 и гаек 9 закреплены кольцевые пьезоэлектрические виброизмерительные преобразователи 10 и

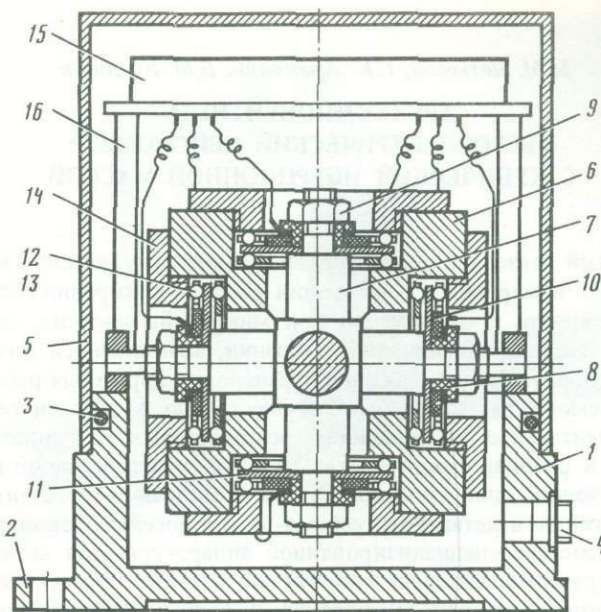


Рис. 1. Трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмометр с кубической инерционной массой

мембраны 11, скрепленные между собой, ВИП и мембраны находятся между сепараторами 12, снабженными шариками 13, заземленными между общей инерционной массой 6 и флянцем 14. ВИП с помощью проводов подключены к индивидуальным согласующим усилителям, смонтированным на печатной плате, которая закреплена на стойках 16.

Колпак 5 вместе с кольцевым уплотнителем герметизирует сейсмометр от окружающей среды. Крепление сейсмометра на объекте производится с помощью винтов, вставляемых в отверстия проушин. Подключение сейсмометра к вторичной аппаратуре осуществляется посредством герметического разъема.

Установленные пьезоэлементы имеют следующие основные данные:

Пьезомодуль, Кл · Н	$2 \cdot 10^{-10}$
Модуль упругости, Н/м ²	$0,85 \cdot 10^{11}$
Относительная диэлектрическая проницаемость	$1,5 \cdot 10^3$

Пьезоэлементы перед установкой проходят искусственное термостарение, что повышает температурную стабильность, снижает погрешность вибропреобразований и повышает временную стабильность параметров не менее чем на три года.

Работа сейсмометра построена на основе трех тандем-акселерометров с чувствительными пьезоэлектрическими ВИП, работающих в трех взаимно перпендикулярных направлениях — вертикальном и двух горизонтальных.

Принцип действия пьезоэлектрических ВИП основан на использовании прямого пьезоэлектрического эффекта, заключающегося в том, что чувствительный пьезоэлемент, изготовленный на основе твердых растворов цирконата-титаната свинца ЦТС-19, при действии на него механических сил электрически поляризуется, т.е. происходит преобразование механической энергии в электрическую.

При воздействии сейсмических колебаний земли или промышленной вибрации на корпус сейсмометра с некоторым ускорением общий кубический инерционный элемент действует (изгибает) с переменной силой на мембрану, ВИП, вызывая тем самым деформацию кольцевых пьезоэлементов. Эта переменная сила пропорцио-

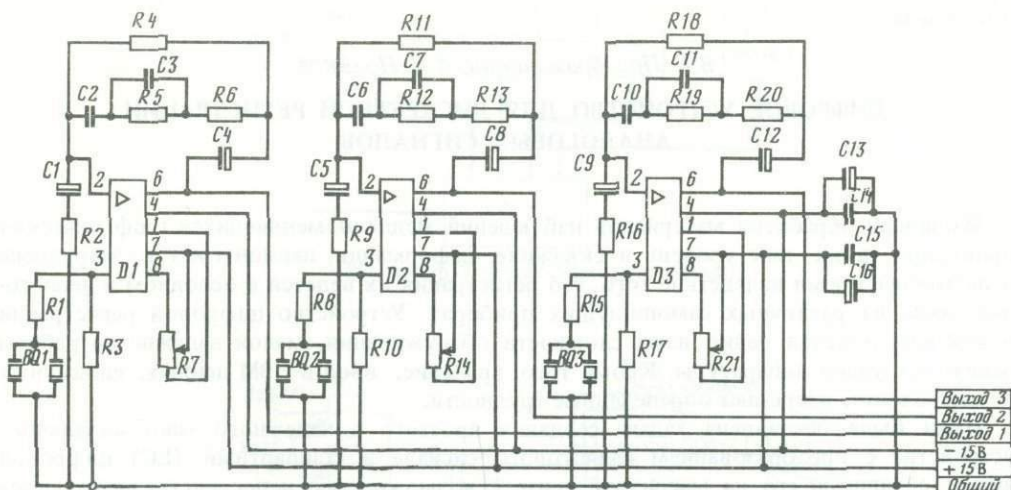


Рис. 2. Электрическая схема согласующих усилителей

нальна ускорению общей инерционной массы. Следовательно, на выходных проводах ВИП генерируется переменное электрическое напряжение, пропорциональное ускорению общей инерционной массы и в конечном итоге пропорциональное ускорению сейсмических колебаний Земли или промышленной вибрации.

На рис. 2 представлена электрическая схема индивидуальных согласующих усилителей. Генерируемые напряжения пьезоэлектрических тандем-акселерометров подаются на входы согласующих усилителей, собранных на операционных усилителях типа К544УД1А. Между выходами и инвертирующими входами усилителей включены обратные отрицательные связи, сформированные резисторами R2, R4–R6, R9, R11–R13, R16, R18–R20 и конденсаторами C1–C3, C5–C7, C9–C11, которые определяют зависимости коэффициентов передачи усилителей от частоты и задают величину входного сопротивления схемы. Компенсация влияния входных токов и напряжений смещения операционных усилителей производится подстройкой величины резисторов R3, R10, R17, что обеспечивает хорошую линейность выходных напряжений схем усилителей на низких частотах. Конденсаторы C1, C5, C9 обеспечивают развязку по постоянному току. Частотный диапазон усилителей определяется величиной конденсаторов C2, C3, C6, C7, C10, C11, величиной емкости пьезоэлемента и выходным сопротивлением усилителей. Конденсаторы C3, C7, C11 задают верхнюю граничную частоту, а входное сопротивление усилителей и емкости пьезоэлементов задают нижнюю граничную частоту.

Усилители смонтированы на печатной плате таким образом, что их входные и выходные элементы разнесены и не имеют перекрестных связей. Электрический монтаж входных цепей усилителей выполнен навесным способом на фторопластовых втулках в целях обеспечения минимальных паразитных утечек.

Основные параметры усилителей:

Коэффициент усиления, дБ	40
Диапазон линейного изменения выходного напряжения, В	0–10
Частотный диапазон, Гц	$0,1-3 \cdot 10^5$
Температурный дрейф напряжения смещения, мкВ/°С	Не более 50
Входное сопротивление, ГОм	2

ЦИФРОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИСКРЕТНОЙ РЕГИСТРАЦИИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ

Машинная обработка материалов наблюдений медленноменяющихся геофизических процессов, таких, как уровень в скважине, деформации, наклоны и т.д., затруднена в настоящее время вследствие того, что регистрация их ведется в основном в аналоговом виде на различных самопишущих приборах. Устройство цифровой регистрации К-484 используется редко из-за сложности обслуживания, малой надежности работы отдельных узлов аппаратуры. Кроме того, хранение, ввод в ЭВМ данных, записанных на перфоленте, встречают определенные трудности.

Нами была поставлена задача создания простого и надежного многоканального устройства с преобразованием аналогового сигнала в стандартный (ЕС) цифровой вид и с записью его на магнитной ленте с возможностью непосредственного ввода данных в ЭВМ. При этом мы старались максимально возможно использовать готовые промышленные устройства цифровой техники.

Структурная схема устройства представлена на рис. 1. Аналоговые сигналы поступают на вход коммутатора каналов К, на выходе которого образуется последовательность импульсов опросов каналов. Эти импульсы посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП) преобразуются в 11-разрядный параллельный двоичный код. Этот код посредством схемы формирования слова (СФС) преобразуется в двухбайтовое восьмибитовое слово, стандартное для цифровых систем типа ЕС. Эти слова, сопровождаемые специальным сигналом ШППБ, и записываются в память устройства подготовки данных ЕС 9004, а затем при заполнении памяти (80 двухбайтовых слов) сбрасываются на магнитную ленту устройства. Запуск цикла измерения и записи сигналов осуществляется от любого таймера с перепадом "высокий уровень — ноль".

Сигналы синхронизации и управления всеми узлами устройства вырабатываются схемой формирования сигналов управления СФСУ.

Функциональная схема устройства представлена на рис. 2.

Измеряемые сигналы с входов 1–16 поступают на ячейки коммутатора 1'–16', выполненные на полевых транзисторах. С выхода коммутатора выбранный измеряемый сигнал поступает на вход АЦП 7.

Управляющее напряжение на транзисторы коммутатора (УПР1–УПР16) поступает с дешифратора 14.

Генератор тактовых импульсов 2 вырабатывает прямоугольные тактовые импульсы (ТИ).

Схема запуска, состоящая из узлов 3, 4, 6, обеспечивает пуск устройства при подаче на его контакт "Запуск" перехода напряжения от +5 — +10 В до нуля. Эмиттерный повторитель 3 обеспечивает срабатывание схемы запуска при разных высоких уровнях запускающих напряжений.

Дифференцирующая цепь 4 служит для выделения фронта запускающего импульса и выработки пускового импульса (ПИ), который вызывает появление на выходах триггера 6 сигнала сброса (С) и сигнала разрешения выдачи импульсов (СРВИ).

Сброс триггера 6 в исходное состояние происходит по фронту сигнала окончания коммутации (СОК), вырабатываемого устройством выбора числа каналов 16.

От генератора 2 ТИ поступает на устройство формирования сигналов управления, состоящее из узлов 5, 8, 10, 12, 13. Схема совпадения 5 разрешает прохождение ТИ при наличии СРВИ. При этом ТИ поступает на счетчик-делитель 8, вырабатывающий сигнал

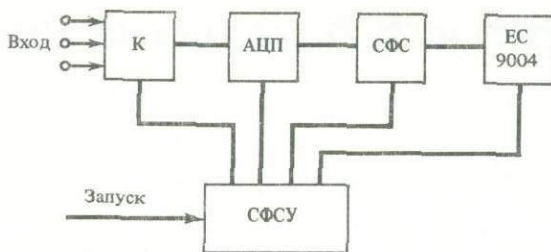


Рис. 1. Структурная схема устройства

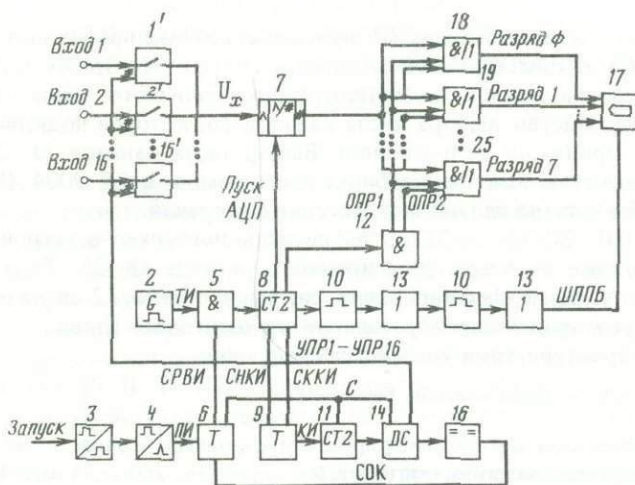


Рис. 2. Функциональная схема устройства

запуска АЦП (пуск АЦП) и сигналы, необходимые для формирования сигналов спроса и сигналов ШППБ, управляющего работой ЕС 9004.

Работа АЦП рассмотрена в техническом описании АЦП Ф7077/2 ТУ 25-04.3333-77.

Схема формирования сигналов опроса 2 вырабатывает сигналы ОПР1 и ОПР2, поступающие в устройство формирования слова.

С выхода счетчика-делителя 8 сигнал поступает на схему формирования сигнала ШППБ, состоящую из формирователей короткого импульса 0 и формирователей импульсов 3. Такое построение схемы вызвано тем, что для работы ЕС 9004 необходимо, чтобы импульсы ШППБ (малой длительности) поступали на него, когда на входы разрядов 0-7 уже поступила соответствующая информация (требуется сдвиг во времени между передними фронтами информационных импульсов и импульсов ШППБ).

С выхода счетчика-делителя 8 также снимается сигнал начала коммутирующего импульса (СНКИ) и сигнал конца коммутирующего импульса (СККИ). Эти сигналы поступают в устройство управления коммутатором, состоящее из узлов 9, 11, 14, 16.

В устройстве управления коммутатором происходит формирование сигналов УПР1-УПР16, необходимых для управления работой коммутатора.

На основе СНКИ и СККИ в формирователе коммутирующего импульса 9 образуется коммутирующий импульс (КИ), поступающий на счетчик 1. С выхода счетчика импульс, соответствующий порядковому номеру КИ, поступает на входы дешифратора 4, на выходах которого появляется один из сигналов УПР1-УПР16.

Эти сигналы поступают на коммутатор для управления включением его ячеек 1'-16'.

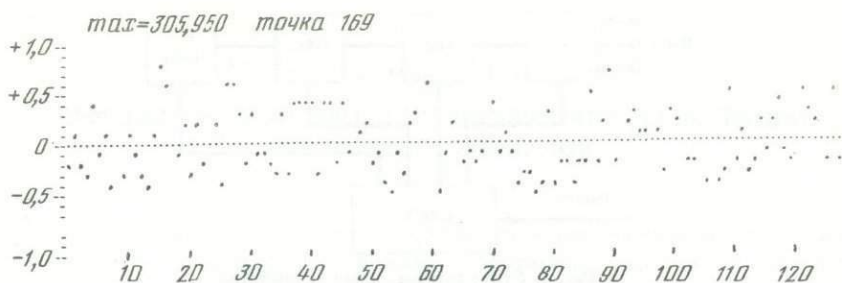


Рис. 3. Образец распечатки одного из каналов регистрации

Сброс счетчика 1 и дешифратора 4 в нулевое состояние происходит при поступлении сигнала сброса (С) от триггера 6 схемы запуска.

Для обеспечения возможности подключения различного числа каналов (до 16) предусмотрено устройство выбора числа каналов 16, которое подключает к цепи СОК сигнал с канала, принятого за последний. Выбор числа каналов (1, 2, 4, 5, 8, 10, 16) вызван необходимостью заполнения блока информации в ЕС 9004 (80 двухбайтовых слов) целиком без остатка целым числом серий измерений.

С выхода в АЦП "2", "2" ... "2" и "+" сигналы поступают в устройство формирования слова, состоящее из ячеек формирования разряда 18–25. Туда же поступают и сформированные в схеме формирования сигналов опроса 12 сигналы ОПР1 и ОПР2, с помощью которых происходит образование двухбайтового слова.

Технические характеристики устройства следующие:

Максимальная частота опроса каналов, Гц	2
Число каналов	16, 10, 8, 5, 4, 2, 1
Время опроса 16 каналов, мс	16
Максимальный уровень аналоговых сигналов, В	± 1 или ± 10
Запись данных на магнитную ленту производится блоками по 80 двухбайтовых слов и позволяет вводить информацию в любую ЭВМ без предварительной ее обработки	
Динамический диапазон регистрации, дБ	66
Питание, В	220, 50

Устройство прошло полевые испытания. Аппаратура была смонтирована на автомашине ГАЗ-66. Там же были установлены мини-ЭВМ "Электроника ДЗ-28" и АЦПУ. Это позволило в полевых условиях контролировать работу аппаратуры и производить экспресс-обработку материалов наблюдений. На вход подавались сигналы с выходов набора фильтров, работающих от широкополосного высокочастотного зонда и установленных в скважине нефтяного месторождения. Запуск опроса каналов (8) проводился с частотой 1 Гц от кварцевых часов АКВ-8. На рис. 3 представлен образец распечатки одного из каналов регистрации. Полевые испытания цифрового устройства для дискретной регистрации аналоговых сигналов показали высокую надежность его работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аранович З.И., Казак Б.Н., Негребецкий С.А. и др. Программноуправляемый сейсмологический комплекс "Пуск-1" // Приборы и методы регистрации землетрясений. М.: Наука, 1987. С. 17–21. (Сейсмические приборы; Вып. 19).
2. Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К. Проектирование портативной цифровой сейсмической станции // Исследования по сейсмометрии. М.: Наука, 1988. С. 78–82. (Сейсмические приборы; Вып. 20).

II. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 550.34

Гаро Х. Мардиросян

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКОГО ФОТОРЕГИСТРАТОРА ПРИ ПОМОЩИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКСПОЗИЦИИ

В последние годы в геофизической регистрирующей аппаратуре широко используются новые методы регистрации (видимая, аналоговая, цифровая и магнитная и др.). Несмотря на это, все же по ряду соображений гальванометрическая фоторегистрация остается основным способом для прецизионной записи большинства геофизических параметров, и на первом месте — землетрясений. В данный момент в тысячах сейсмологических обсерваториях в мире эксплуатируются десятки тысяч сейсмографов с гальванометрической фоторегистрацией. Широчайшее распространение среди этих фоторегистраторов имеют РС-II, РС-II-M, Sprengnether и др. Наряду со многими преимуществами у этих исключительно широко распространенных фоторегистраторов есть и один недостаток — плохое экспонирование фотоматериала (фотобумага, фотолента) при записи близких и сильных землетрясений, т.е. при движении светового блика по фотоматериалу с большой скоростью. Это приводит к некачественной записи, а часто записи и вообще отсутствует, вследствие чего правильная интерпретация близких и сильных землетрясений невозможна [1].

В целях избежания этого недостатка разработан метод автоматической регулировки экспозиции геофизического фоторегистратора [2].

Суть этого метода в основном заключается в изменении яркости коллиматора фоторегистратора в зависимости от скорости движения $v(t)$ светового зайчика по фотоматериалу регистрограммы [3]. При увеличении $v(t)$, т.е. при уменьшении времени освещения Δt , необходимо увеличить яркость источника света коллиматора таким образом, чтобы произведение, выражающее экспозицию ΔH , осталось постоянным:

$$\Delta H = E \Delta t = E \Delta Y / v(t), \quad (1)$$

где E — освещенность, созданная световым зайчиком на фотоматериале; Y — амплитуда записи.

Основным моментом является выбор управляющего сигнала, который можно использовать для регулирования источника света по закону изменения скорости светового блика $v(t)$.

Система дифференциальных уравнений [4], которая описывает движение гальванометрического сейсмографа, представлена в следующем виде:

$$\ddot{\theta} + 2\epsilon_S \dot{\theta} + n_S^2 \theta = \frac{\ddot{x}}{L_S} + \frac{4\epsilon_S \epsilon_G}{\bar{k}} M^2, \quad (2)$$

$$\ddot{\varphi} + 2\epsilon_G \dot{\varphi} + n_G^2 \varphi = k\ddot{\theta},$$

где θ и φ — углы отклонения маятника сейсмоприемника и рамки гальванометра от положения равновесия; ϵ_S и ϵ_G — коэффициенты затухания собственных колебаний сейсмоприемника и гальванометра; n_S и n_G — круговые частоты маятника сейсмоприемника и рамки гальванометра; \ddot{x} — ускорение объекта (грунта); k — переводящий множитель гальванометрической регистрации; L_S — приведенная длина маятника сейсмоприемника; M^2 — коэффициент связи.

Если предположить наличие установившегося возбуждающего колебания типа $x = x_m \sin \omega t$, решение (2) дает законы вынужденных колебаний сейсмоприемника

$$\theta(t) = \frac{x_m}{L_S} F_S \sin(\omega t + \Phi_S) + \frac{4\epsilon_S \epsilon_G}{k n_S^2} M^2 \quad (3)$$

и гальванометра

$$\varphi(t) = k \frac{x_m}{L_S} \frac{F_S F_G}{\omega} \sin(\omega t + \Phi_S) + \Phi_G - \frac{\pi}{2}, \quad (4)$$

где F_S и F_G — частотные характеристики сейсмоприемника и гальванометра; Φ_S и Φ_G — фазовые характеристики сейсмоприемника и гальванометра.

После математических преобразований можно выразить v с помощью коэффициента увеличения сейсмографа K_0 и его частотной характеристики F :

$$v = K_0 F x_m \frac{2\pi}{T} \cos(\omega t + \Phi). \quad (5)$$

Совершая соответствующие преобразования, индуцированное в сейсмоприемнике ЭДС u_S можно выразить через магнитоэлектрическую постоянную G_S преобразователя:

$$u_S = G_S \frac{x_m}{L_S} F_S \frac{2\pi}{T} \cos(\omega t + \Phi_S). \quad (6)$$

Для реализации автоматического регулирования экспозиции необходимо определить три основных параметра.

1. Порог включения, т.е. значение амплитуды ЭДС u_S , индуцированного в сейсмоприемнике, при котором запись уже трудно читается.

С этой целью определены значения амплитуд для v и u :

$$v_{\max} = K_0 F x_m 2\pi/T, \quad (7)$$

$$u_{\max} = \frac{G_S}{L_S} F_S x_m \frac{2\pi}{T}. \quad (8)$$

Тогда для граничного значения ЭДС, индуцированного в сейсмоприемнике, получается следующая зависимость:

$$u_{\text{гр}} = (G_S/L_S)(v_{\max}/K_0)(F_S/F), \quad (9)$$

где v_{\max} — максимальная скорость светового блика, при которой запись все еще читается.

$$v_{\max} = v_{\text{ср}} \pi/2 = (2Y/T)\pi. \quad (10)$$

Для практического определения необходимого порога включения автоматического регулирования экспозиции были обработаны записи сейсмографа СКМЗ + ГКVII + РС-II-M, коллиматором К-VII, при увеличении $K_0 = 50\,000$. Из обработанных около 100 записей, полученных за двухлетний период, следует, что

$$v_{\max} \geq 80 \text{ мм/с.}$$

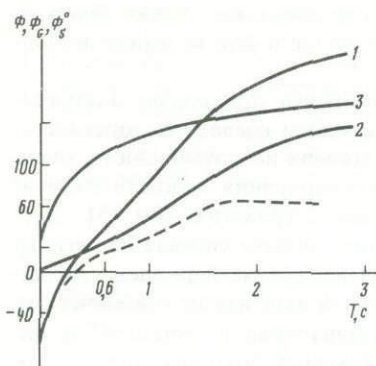
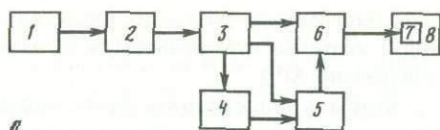
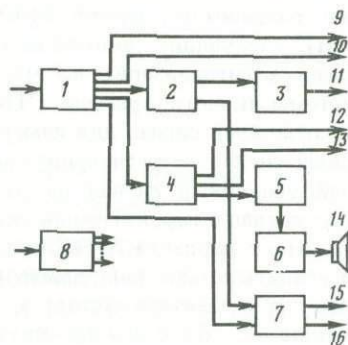


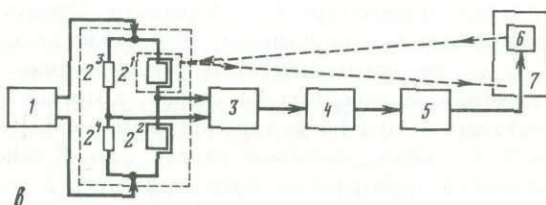
Рис. 1. Фазовые разности для разных периодов сейсмических волн
1 — Φ ; 2 — Φ_S ; 3 — Φ_G



а



б



в

Рис. 2. Блок-схема устройства АРЭ
а — с активным дефазатором;
б — без дефазатора; в — АРЭ при
использовании сигнала, не дефазиро-
ванного по отношению к скоро-
сти движения светового блика

2. Фазовая разность $\bar{\Phi}$ между управляющим сигналом и скоростью движения светового блика, т.е. $\bar{\Phi} = \Phi = \Phi_S$. Вычисленные фазовые разности для разных периодов сейсмических волн $\Phi = f(T)$ показаны в графическом виде на рис. 1, где 1 — Φ , 2 — Φ_S , 3 — Φ_G , а пунктиром показана разность $\bar{\Phi} = \Phi - \Phi_S$.

Чтобы реализовать прецизионное автоматическое регулирование экспозиции, эту фазовую разность следует компенсировать [1, 3].

3. Способ управления яркостью светового источника коллиматора фоторегистратора. Как известно, на изменение яркости осветительных ламп преобладающее влияние оказывает изменение тока. Например, для наиболее широко используемой в фоторегистраторах осветительной лампы СЦ-79 возрастание тока в 1,45 раза соответствует возрастанию яркости H приблизительно в 10 раз. Подобные зависимости получаются и для других осветительных ламп, используемых в геофизических фоторегистраторах.

Следовательно, для управления световым источником коллиматора целесообразно использовать генератор тока. На базе общей принципиальной схемы были изготовлены различные варианты устройств АРЭ.

1. Устройство АРЭ с активным дефазатором. Общий вид блочной схемы этого варианта показан на рис. 2, а, где 1 — сейсмоприемник; 2 — электронный усилитель; 3 — выпрямитель в обоих направлениях; 4 — измеритель периода (частотомер); 5 — активный дефазатор; 6 — генератор тока; 7 — коллиматор; 8 — фоторегистратор.

С помощью активного дефазатора компенсируется данная фазовая разность $\bar{\Phi}$ в зависимости от периодов сейсмических волн.

2. АРЭ без дефазатора. Значительное упрощение схемотехники и повышение надежности получится при использовании АРЭ без дефазатора, так как в этом случае подбором параметров сейсмического канала (T_S , T_G , D_S , D_G , M^2 и т.д.) можно достичь симметрии кривой $\Phi = f(T)$ по отношению к среднему периоду регистрируемых

колебаний. В большей степени, это касается короткопериодных колебаний близких землетрясений, которые в конечном счете намного интереснее и для которых, в сущности, предназначено АРЭ.

Для того чтобы удовлетворять требованиям оперативности при подаче экспресс-информации о землетрясениях, так же как и для того, чтобы сделать фоторегистраторы универсальными и использовать в максимальной степени их возможности, было целесообразно разработать, кроме автоматического регулирования яркости осветительной лампы, следующие дополнительные возможности устройства АРЭ [5]: дискретную звуковую сигнализацию во время землетрясения; подачу сигнала на регистр "память" системы точного времени СТВ [6]; цифровое измерение периодов сейсмических волн; исходный сигнал для измерения максимальной амплитуды сейсмических волн; исходный сигнал на регистрирующие аппараты, оставленные в "ждушем" режиме; исходный усиленный сигнал на различных регулируемых уровнях для других регистраторов; сигнал о переключении скорости движения сейсмограммы.

Блок-схема этого варианта АРЭ-8 показана на рис. 2, б. Основные блоки: 1 — предварительный усилитель; 2 — выпрямитель в обоих направлениях; 3 — генератор тока; 4 — компаратор, 5 — делитель частот; 6 — низкочастотный усилитель; 7 — блок для измерения периодов; 8 — блок для преобразования питания.

Выходы сигналов: 9 — для измерения величины A_{\max} ; 10 — на видимую запись; 11 — на коллиматор; 12 — в регистр "Память"; 13 — на ждущие регистраторы; 14 — дискретный звуковой сигнал; 15 — для индикации T_i ; 16 — на печать T_i .

В случае автоматического регулирования экспозиции для управления яркостью коллиматора используется сигнал, который не дефазирован относительно движения светового блика на фоторегистрограмме [7]. Блок-схема устройства АРЭ, реализующая этот метод, показана на рис. 2, в. К сейсмоприемнику 1 подключена диагональ питания измерительного мостового блока 2, который состоит из основного (рабочего) зеркального гальванометра 2^1 , пассивного гальванометра 2^2 и двух одинаковых резисторов 2^3 и 2^4 . Оба гальванометра включены в два соседних плеча моста, а резисторы — в два других плеча. Измерительная диагональ моста, определяемая точкой между двумя гальванометрами 2^1 , 2^2 и точкой между двумя резисторами 2^3 , 2^4 , подключена к входам дифференциального усилителя 3, выход которого соединен с двухполупериодным выпрямителем 4. Он питает усилитель мощности 5, к которому подключен коллиматор 6 фоторегистратора 7. В покое мост 2 сбалансирован и на вход дифференциального усилителя 3 напряжение не подается. Регистрируя данное геофизическое событие при движении основного зеркального гальванометра 2^1 , в его рамке индуцируется противо-ЭДС. Это напряжение не компенсируется, и мост 2 разбалансирован. Напряжение, появляющееся в диагонали моста, усиливается в дифференциальном усилителе 3, после чего выпрямляется в блоке 4 и усиливается в усилителе мощности 5. Таким образом, яркость осветительной лампы коллиматора 6 в каждый момент времени пропорциональна этому напряжению, т.е. пропорциональна скорости движения самой рамки зеркального гальванометра 2^1 , которая, в сущности, является скоростью движения светового блика на фоторегистрограмме.

Благодаря своим конструктивным параметрам (большому сопротивлению на входе) все варианты АРЭ можно подключать к любому виду уже калиброванных и работающих сейсмографов с магнитоэлектрическими сейсмоприемниками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мардиросян Г.Х. Кандидатская диссертация. Центральная лаборатория космических исследований. София.: БАН, 1984. 90 с.
2. А.с. 28372 (НРБ), МПК G 01 V 1/16. Устройство для автоматического регулирования сейсмического фоторегистратора / Г.Х. Мардиросян, Б.Б. Григоров, № 42244; Заявл. 25.01.1979; Оpubл. 1980, Бюл. № 15.

3. Григоров Б.Б., Мардиросян Г.Х., Овчаров С.Г. Автоматично регулиране експозицията на сеизмологичен фоторегистратор // Бълг. геофиз. сп. Т. 5; № 4; София.: БАН, 1979. С. 75–82.
4. Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: ГИТТЛ, 1955. 543 с.
5. Мардиросян Г.Х., Григоров Б.Б., Овчаров С.Г. Устройство для автоматического регулирования экспозиции геофизического фоторегистратора с некоторыми дополнительными функциями // Докл. Болгарской академии наук. София.: БАН, 1981. Т. 34, № 4. С. 505–508.
6. А.С. 40118 (НРБ), МПК G 01 Y 1/16. Геофизичен фоторегистратор / Д.Г. Михайлов, Г.Х. Мардиросян. № 70383; Заявл. 05.05.85; Оpubл. 1987, Бюл. № 34.

УДК 550.34

*Э.Б. Агаларова, З.И. Аранович, О.А. Корчагина,
Х.Г. Наврузов, Н.Л. Трапезников*

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ РЕГИСТРАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИБОРОВ С ФОТОГАЛЬВАНOMETРИЧЕСКОЙ И ВИДИМОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ

В настоящее время на некоторых сейсмических станциях Советского Союза работают сейсмометрические каналы, построенные на базе стандартного сейсмометра СМ-3 с последующей корректировкой характеристики с помощью универсального, разработанного в ИФЗ АН СССР и описанного в [1] блока формирования характеристик БФХ. Приборы эти являются аналогами высокочувствительных приборов СКМ-3 с гальванометрической регистрацией, работающих в нашей сети со стандартными характеристиками I–IV типов. Начиная с 1986 г. несколько таких приборов установлено в региональной сейсмической сети Азербайджана.

Опыт эксплуатации аналогичного канала на сейсмической станции "Бакуриани" [2] показал, что комплект СМ-3 + БФХ при соответствующей корректировке характеристики идентичен прибору СКМ-3 в пределах точности стандартной обработки. Времена вступлений Р-волн и значения периодов соответствующих волновых фаз различаются на этих приборах не более чем на 0,1 с, а средняя разность определения магнитуд не превышает $\pm 0,05$ ед. магнитуды, что находится в пределах ошибок измерений.

В качестве опыта на сейсмической станции "Джебраил" Азербайджанской ССР параллельно с трехкомпонентной установкой с фотогальванометрической регистрацией (назовем ее для краткости ССК_{ф-г}) с 1 января 1987 г. с номинально идентичной характеристикой начал работу аналогичный комплект – короткопериодная сейсмическая станция ССК [3] с видимой (чернильной) регистрацией (условно ССК_в).

Ранее на станции "Джебраил" работал сейсмограф Харина с характеристикой I типа с $V_{\max} = 60$ тыс. В настоящее время приборы ССК работают в режиме непрерывной регистрации с характеристикой IV типа и $V_{\max} = 20$ тыс.

Уровень микросейсмического фона позволяет задавать аппаратуре на сейсмической станции большое увеличение. Сравнительные возможности станции "Джебраил" по отношению к другим станциям Азербайджана можно видеть на рис. 1, где приведены участки записи активных микросейсм одинаковой длительности и относящиеся к одному и тому же времени на трех станциях: "Исмаиллы" ($V_{\max} = 20$ тыс.), "Шемаха" (10 тыс.) и "Джебраил" (20 тыс.). Как видно из рисунка, станция "Джебраил" имеет самый низкий уровень каспийских ($T = 2,5$ с) микросейсм. Переход от характеристики I типа на характеристику IV типа несколько изменил регистрационные возможности станции, ослабив ее роль индикатора первых вступлений слабых явлений, но вопрос о рациональности такой замены здесь не рассматривается и должен быть изучен отдельно.

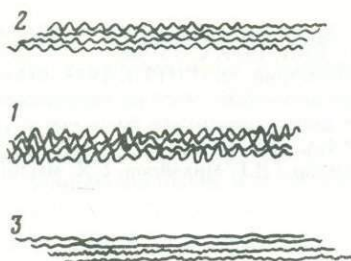


Рис. 1

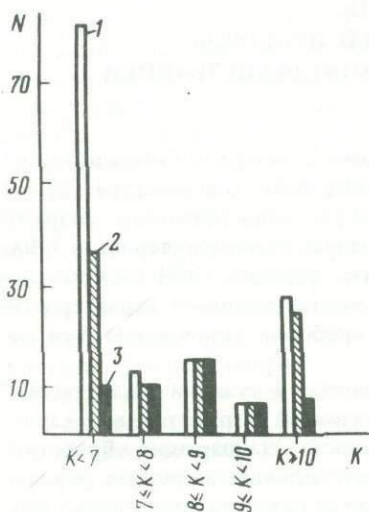


Рис. 3

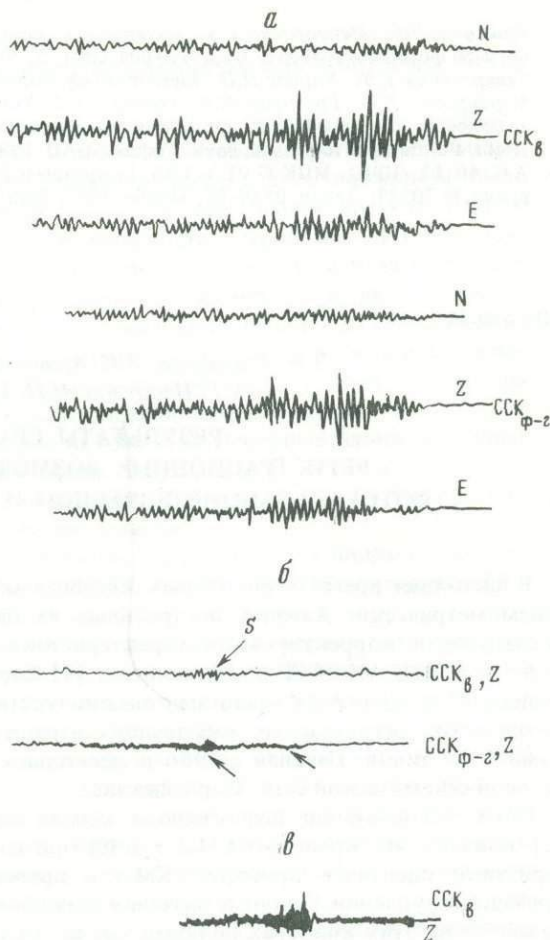


Рис. 2

Рис. 1. Сравнение уровня микросейсмического фона по записям сейсмических станций "Шемаха" (1), "Исмаиллы" (2), "Джебраил" (3)

Рис. 2. Примеры записей одних и тех же землетрясений приборами ССК_{Ф-Г} и ССК_В
 а — запись 28.06.87 г.; б — 6.01.87 г.; в — 18.02.87 г. (ССК_В)

Рис. 3. Гистограмма распределения числа сейсмических событий в зависимости от энергетического класса K

Для сравнительного анализа записей ССК_{Ф-Г} и ССК_В были просмотрены сейсмограммы этих приборов за первую декаду января, третью декаду июня и февраль 1987 г.

Сравнительный просмотр сейсмограмм приборов, в частности с записями роя шемахинских землетрясений, имевших место в конце третьей декады июня 1987 г., показал, что при землетрясениях, когда двойная амплитуда на записи достигает 5 мм и более, они практически подобны по времени, знаку и характеру первого вступления, приходу основных волновых фаз, периодам и амплитудам колебаний и общей длительности процесса.

В случаях, когда амплитуды сейсмических волн имеют величину $2 \text{ мм} < 2A < 4-5 \text{ мм}$, подобие по временам вступлений, амплитудам, периодам остается, а форма колебаний на сейсмограммах ССК_В теряет плавность и приобретает характер прерывистый, угловатый. На малых амплитудах момент вынуждающей силы становится срав-

нимым с моментом сил сцепления, вызываемых трением пера о бумагу, это и является причиной нелинейности процесса.

Если двойная амплитуда на записи ($ССК_{Ф-Г}$) ≤ 2 мм, то такая информация на сейсмограммах видимой записи и вовсе может быть потеряна.

В случае записей местных землетрясений, если периоды колебаний $\leq 0,5$ с, запись на $ССК_{В}$ становится плохо разрешенной во времени и точное определение периодов колебаний затруднительно.

На рис. 2 приведены примеры, иллюстрирующие эти случаи. Эти примеры практически идентичны записи близкого землетрясения 28.VI.87 г., время вступления на сейсмограмме 00-54-45. Запись $ССК_{В}$ для удобства сравнения здесь и далее приведена в ее зеркальном отображении. Обе сейсмограммы четкие, имеют хорошее разрешение и идентичны по периодам, амплитудам и временам вступлений.

Рис. 2, б — пример регистрации одного и того же толчка приборами $ССК_{Ф-Г}$ и $ССК_{В}$ с такими малыми амплитудами, что для видимой записи это явление находится на границе чувствительности регистрирующего устройства. Так, мы видим, что сейсмограмма землетрясения 6.01.87 г. на $ССК_{Ф-Г}$ начинается раньше, чем на $ССК_{В}$. Это запись волны P , которая на $ССК_{В}$ не идентифицируется вовсе, в качестве первого вступления здесь можно выделить лишь волну S .

Рис. 2, в — пример очень короткопериодных колебаний, когда трудно измерить периоды по сейсмограмме $ССК_{В}$. Фотозапись при этом вполне может быть обработана; сейсмограмма $ССК_{Ф-Г}$ не приводится, так как детальность проработки находится за пределами разрешающих свойств копировальной техники.

Чтобы создать представление о некоторых закономерностях в сходстве и различии записей $ССК_{Ф-Г}$ и $ССК_{В}$, рассмотрим данные за один месяц — февраль 1987 г. Общее число сейсмических событий, упоминание о которых есть в станционном бюллетене, составленном по обработке сейсмограмм $ССК_{Ф-Г}$, равно 142. Из них в сводный бюллетень Кавказа попало 47, а на сейсмограммах $ССК_{В}$ обнаружено 80 явлений, из них качественно записано 57. Такая большая разница в числе сейсмических событий, зафиксированных приборами $ССК_{Ф-Г}$ и $ССК_{В}$, говорит на первый взгляд о заметно большей информативности первого прибора в сравнении со вторым. Однако обращение к сейсмограммам $ССК_{Ф-Г}$ показывает, что большинство слабых землетрясений записано на $ССК_{Ф-Г}$ некачественно.

Гистограмма рис. 3 составлена на основе рассмотренных выше данных и сведений об энергетических классах землетрясений, происшедших в течение февраля 1987 г. Здесь представлено распределение числа событий: 1 — помещенных в станционном бюллетене "Джебраил"; 2 — обнаруженных на сейсмограммах $ССК_{В}$; 3 — упомянутых в сводном бюллетене Кавказа в зависимости от величины K . Больше половины землетрясений, отмеченных в станционном бюллетене, относятся к слабым событиям, для которых энергетический класс не определен вовсе или имеет величину $K < 7$. Половина из этих событий обнаружена на сейсмограммах $ССК_{В}$ (и 13 попали в сводный бюллетень). Это значит, что при $K < 7$ двойная амплитуда колебаний в волнах P не превышает на сейсмограмме 1–2 мм, что находится на границе или за пределами разрешающей способности $ССК_{В}$, но еще в пределах разрешающей способности $ССК_{Ф-Г}$. С ростом энергетического класса общее число событий уменьшается, при этом в пределах $7 \leq K \leq 10$ приборы $ССК_{Ф-Г}$ и $ССК_{В}$ записывают одинаковое число событий, и практически все они попадают в сводный бюллетень. Для $K \geq 10$ число событий по сведениям этих трех источников опять не совпадает; это связано с тем, что землетрясения с $K \geq 10$ относятся в основном к далеким событиям, которые могут быть записаны с амплитудами за пределами пороговой чувствительности $ССК_{В}$, но еще в пределах таковой прибора $ССК_{Ф-Г}$. В сводный бюллетень Кавказа большинство таких землетрясений не попадает.

Следует отметить, что наиболее многочисленные события, отмеченные в станционном бюллетене, с $K < 7$ часто записаны прибором $ССК_{Ф-Г}$ некачественно, их трудно

идентифицировать; вступления, отмеченные в бюллетене как P -волны, часто оказываются фазой S .

В заключение следует отметить, что принципиальным различием фото- и чернильной записи является то, что с изменением скорости фотозапись резко меняет свою толщину, при этом чем больше скорость движения светового зайчика, тем линия записи становится тоньше. Отсюда вытекают и недостатки и преимущества $ССК_{\text{в}}$ перед $ССК_{\text{ф-г}}$: чем выше частота колебаний при землетрясениях, тем с худшим разрешением они записываются на $ССК_{\text{в}}$ по сравнению с $ССК_{\text{ф-г}}$; при сильном же росте амплитуд высокочастотных сигналов фотогоальванометрическая запись исчезает, "не печатывается" на сейсмограмме, тогда как видимая запись остается почти такой же яркой, как и на малых амплитудах. Это позволяет не ошибиться при энергетических оценках местных землетрясений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг И.М., Трапезников Н.Л. Повышение чувствительности канала регистрации с электрографическим осциллографом АСЭО-1 // Разработка и исследование сейсмической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 83–86. (Сейсмические приборы; Вып. 17).
2. Аранович З.И., Корчагина О.А., Трапезников Н.Л., Фабрициус З.Э. Опыт эксплуатации электронных сейсмометрических каналов, построенных на базе серийных узлов // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1983. С. 143–146. (Сейсмические приборы; Вып. 15).
3. Аранович З.И., Воробьев Б.Т., Трапезников Н.Л., Трифонов Н.В. Сейсмическая станция с видимой записью $ССК$ // Наст. сб.

УДК 550.34

Л.К. Шведчиков

ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО СЕЙМОПРИЕМНИКА С АКТИВНЫМИ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

По исследуемому вопросу в последние годы имеется значительное количество публикаций [1, 2]. В данной работе предпринята попытка рассмотреть АЧХ сейсмоприемника с активными обратными связями разных типов в достаточно общем случае при наличии внутренних индуктивных связей между проводящим каркасом катушки сейсмоприемника и ее обмотками и при отсутствии этих связей.

Поскольку конечной целью настоящего исследования является получение (в виде, удобном для численного расчета) формул для построения АЧХ и ФЧХ сейсмоприемника, будем искать выражение для передаточной функции в комплексной форме.

Для определения передаточной функции сейсмоприемника с активными обратными связями воспользуемся электромеханической моделью, схема которой приведена на рис. 1.

В левой части рисунка изображена механическая часть сейсмоприемника, где m — масса подвижной части, K — жесткость поддерживающих массу пружин. Диссипативными потерями в механической части сейсмоприемника пренебрегаем.

В правой части изображена электрическая часть схемы. Сигнальная обмотка сейсмоприемника представлена контуром с индексом 1, n_1 — число витков обмотки, L_1 — индуктивность обмотки, R_k — активное сопротивление обмотки, $R_{ш}$ и C_3 — внешнее сопротивление шунта и емкость, включенная параллельно шунту.

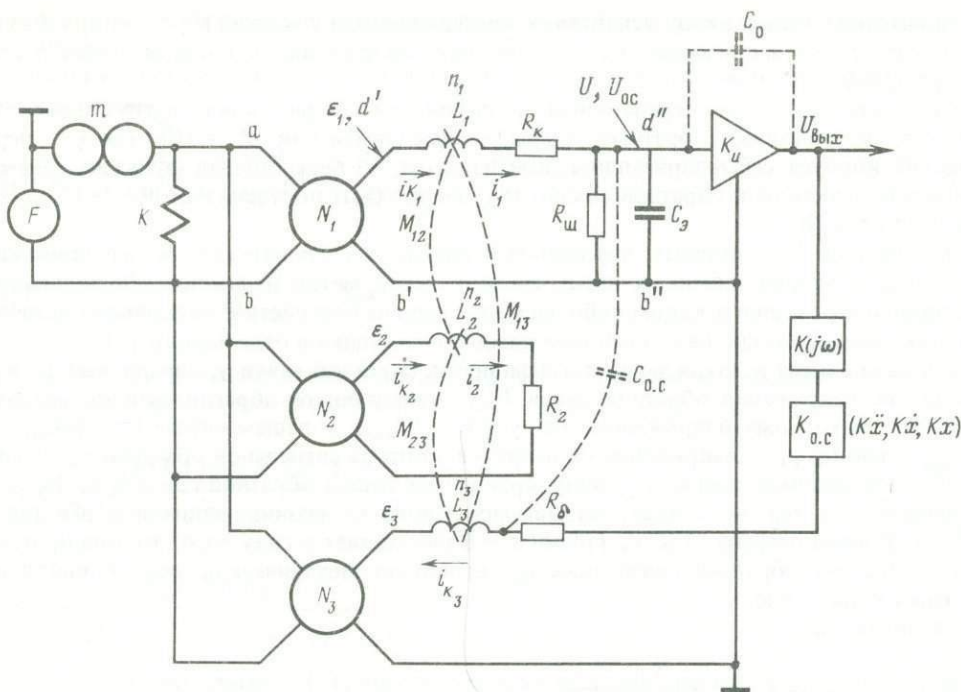


Рис. 1. Схема электромеханической модели сейсмоприемника с активными обратными связями

Проводящий каркас катушки представлен контуром с индексом 2, а обмотка обратной связи — контуром с индексом 3 с соответствующими параметрами. Число витков каркаса $n_2 = 1$.

Все три контура индуктивно связаны между собой; M_{12} , M_{23} , M_{13} — взаимные индуктивности контуров. Связь контуров между собой принимаем полной. Следовательно, имея в виду, что $L_2 = L_1 n_2^2 / n_1^2$ и $L_3 = L_1 n_3^2 / n_1^2$, взаимные индуктивности можно определить как $M_{12} = L_1 / n_1$; $M_{13} = L_1 n_3 / n_1$; $M_{23} = L_1 n_2 n_3 / n_1^2$.

Коэффициент преобразования N определим как отношение ЭДС ϵ на выходе преобразователя к скорости смещения его механических полюсов: $N = \epsilon / \dot{x}$. Коэффициенты преобразования второго и третьего контуров, выраженные через N_1 , равны $N_2 = N_1 n_2 / n_1$, $N_3 = N_1 n_3 / n_1$.

Выход сигнальной обмотки подключен к входу усилителя с коэффициентом усиления по напряжению K_u , выход которого подключен через цепь обратной связи $K(j\omega) - K_{0.c} - R_\sigma$ к обмотке обратной связи. Принимаем, что $R_\sigma \gg |Z_3|$ и, следовательно, в цепи обратной связи обеспечивается независимость тока обратной связи i_{k3} от изменения $|Z_3|$ с частотой (режим генератора тока). $K(j\omega)$ — передаточная функция цепи обратной связи, которой в дальнейшем будем придавать различные значения, обеспечивающие операции дифференцирования, прямой передачи сигнала и интегрирования в зависимости от типа вводимой активной обратной связи — по ускорению, по скорости или по перемещению механических полюсов преобразователя соответственно. $K_{0.c}$ — коэффициент усиления сигнала в цепи обратной связи для обеспечения необходимой ее глубины ($K_{\ddot{x}}$, $K_{\dot{x}}$, K_x соответственно).

Усилитель K_u будем рассматривать как усилитель, охваченный обратной связью с коэффициентом обратной связи γ , причем в цепь обратной связи входит как электрическая, так и механическая часть сейсмоприемника.

Если коэффициент обратной связи определен, то коэффициент усиления усилителя, охваченного обратной связью K_γ , получится по известной формуле $K_\gamma = K_u / (1 - \gamma K_u)$.

Следовательно, если к входу усилителя с коэффициентом усиления K_u будет приложено в точках $a''-b''$ напряжение U , то выходное напряжение усилителя будет равно $U_{\text{вых}} = UK_\gamma$.

Следовательно, если передаточная функция сейсмоприемника, нагруженного на емкость, без активных обратных связей, определяемая как $W_c = U/\xi$, где ξ — перемещение корпуса сейсмоприемника, нам известна, то передаточная функция сейсмоприемника с активной обратной связью $W_{o.c}$ может быть получена как $W_{o.c} = U_{\text{вых}}/\xi = = K_\gamma (U/\xi) = K_\gamma W_c$.

При выводе $W_{o.c}$ принять, что система линейна и, следовательно, к ней применим известный в теории линейных электрических цепей метод наложения, позволяющий рассчитывать реакцию в каком-либо элементе цепи на воздействие нескольких источников как сумму реакций на воздействие каждого источника в отдельности [3].

Задача сводится к нахождению коэффициента обратной связи γ , определяемого как отношение напряжения обратной связи $U_{o.c}$, попадающего обратно на вход усилителя, к его выходному напряжению, т.е. $\gamma = U_{o.c}/U_{\text{вых}}$. В нашем случае $U_{o.c} = U_{o.c1} + U_{o.c2}$, где $U_{o.c1}$ — напряжение на нагрузке контура сигнальной обмотки Z_H (точки $a''-b''$), вызываемое током i_{k1} , индуцированным током обратной связи i_{k3} ; $U_{o.c2}$ — напряжение на тех же точках, вызываемое током i_1 , возникающим под действием ЭДС ϵ_1 . В свою очередь, ЭДС ϵ_1 (точки $a'-b''$) возникает в силу того, что при протекании в обмотке обратной связи тока i_{k3} возникает механическая сила, приводящая катушку в движение.

Следовательно,

$$U_{o.c1} = i_{k1} Z_H = i_{k1} \frac{R_{ш}}{1 + j\omega\tau_c R_1/R_K}, \quad (1)$$

$$U_{o.c2} = i_1 Z_H = i_1 \frac{R_{ш}}{1 + j\omega\tau_c R_1/R_K},$$

где $\tau_c = C_3 \frac{R_K R_{ш}}{R_1}$ и $R_1 = R_K + R_{ш}$.

Токи i_{k1} , i_{k2} , i_{k3} определяются из совместного решения системы дифференциальных уравнений, отображающих второй закон Кирхгофа для индуктивно-связанных контуров:

$$\begin{aligned} i_{k1} \left(R_1 + \frac{R_{ш}}{1 + j\omega\tau_c R_1/R_K} \right) + L_1 \frac{di_{k1}}{dt} + M_{12} \frac{di_{k2}}{dt} + M_{13} \frac{di_{k3}}{dt} &= 0, \\ i_{k2} R_2 + L_2 \frac{di_{k2}}{dt} + M_{12} \frac{di_{k1}}{dt} + M_{23} \frac{di_{k3}}{dt} &= 0, \\ i_{k3} R_6 = K_{o.c} K(j\omega) U_{\text{вых}} \quad (R_6 \gg |Z_3|) \end{aligned} \quad (2)$$

Полагая, что $U_{\text{вых}}$, а следовательно, и i_{k1} , i_{k2} , i_{k3} являются гармоническими функциями времени, с учетом определенных выше значений L_2 , L_3 , M_{12} , M_{13} , M_{23} через L_1 и n получаем

$$\begin{aligned} i_{k1} &= -i_{k3} \frac{n_3}{n_1} \frac{j\omega\tau_1 (1 + j\omega\tau_c R_1/R_K)}{1 - \omega^2 \tau' \tau_c + j\omega(\tau_{12} + \tau_c)}, \\ i_{k2} &= -i_{k3} \frac{n_3}{n_2} \frac{j\omega\tau_2 (1 + j\omega\tau_c)}{1 - \omega^2 \tau' \tau_c + j\omega(\tau_{12} + \tau_c)}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\tau_1 = L_1/R_1$, $\tau_2 = L_2/R_2 = L_1/R_2 n_1^2 = L_1/R_2'$, $\tau_{12} = L_1(1/R_1 + 1/R_2')$, $\tau' = L_1(1/R_K +$

+ $1/R_2'$) (R_2' — пересчитанное в контур сигнальной обмотки сопротивление каркаса катушки).

Аналогично токи i_1 и i_2 находятся из совместного решения системы дифференциальных уравнений

$$i_1 \left(R_K + \frac{R_{ш}}{1 + j\omega\tau_c R_1/R_K} \right) + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} = N_1 \dot{x}, \quad (4)$$

$$i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} = N_2 \dot{x},$$

$i_3 = 0$ (в силу большой величины R_6), где x — перемещение входных механических полюсов преобразователя (точки $a-b$).

Откуда

$$i_1 = \frac{N_1 \dot{x} (1 + j\omega\tau_c R_1/R_K)}{R_1 [1 - \omega^2 \tau' \tau_c + j\omega (\tau_{12} + \tau_c)]}, \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{N_2 \dot{x} (1 + j\omega\tau_c)}{R_2 [1 - \omega^2 \tau' \tau_c + j\omega (\tau_{12} + \tau_c)]}.$$

Величина \dot{x} , входящая в (5), определяется из решения уравнения движения подвижной массы под действием силы F , возникающей вследствие наличия тока обратной связи $i_{к3}$ и индуцированных им токов $i_{к1}$ и $i_{к2}$ и равной

$$F = N_1 i_{к1} + N_2 i_{к2} + N_3 i_{к3} = i_{к3} N_3 \frac{1 + j\omega\tau_c}{1 - \omega^2 \tau' \tau_c + j\omega (\tau_{12} + \tau_c)}. \quad (6)$$

Выпишем уравнение движения подвижной массы под действием этой силы (при отсутствии возбуждения с механической стороны):

$$m\ddot{x} + kx + i_1 N_1 + i_2 N_2 = F. \quad (7)$$

Подставляя значения i_1 , i_2 и F , найденные ранее, и имея в виду, что умножение на $j\omega$ эквивалентно дифференцированию, находим из решения уравнения (7) для гармонических колебаний \dot{x} в виде

$$\dot{x} = i_{к3} \frac{N_3}{m} \frac{j\omega (1 + j\omega\tau_c)}{\omega_0'^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2)}, \quad (8)$$

где $\omega_0'^2 = \omega_0^2 + \frac{N^2}{mL_1}$, $\omega_0''^2 = \omega_0^2 + \frac{\tau_{12}}{\tau_{12} + \tau_c} \cdot \frac{N_1^2}{mL_1}$, $\omega_0^2 = \frac{K}{m}$.

Располагая значениями величин $i_{к1}$, $i_{к3}$, i_1 , Z_H и \dot{x} , получаем из (1) выражения для $U_{o.c1}$ и $U_{o.c2}$, а следовательно, и для их суммы

$$\begin{aligned} U_{o.c} &= U_{o.c1} + U_{o.c2} = \\ &= -\frac{U_{вых}}{R_6} K(j\omega) K_{o.c} \frac{R_{ш}}{R_1} M_{13} \frac{j\omega (\omega'^2 - \omega^2)}{\omega_0'^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Отсюда непосредственно получается выражение для коэффициента обратной связи γ , определенного выше как отношение $\gamma = U_{o.c}/U_{вых}$, а следовательно, и для коэффициен-

та усиления усилителя, охваченного обратной связью:

$$K_{\gamma} = \frac{K_u}{1 - \gamma K_u} = \frac{K_u \{ \omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2) \}}{\omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2) + j\omega K_u K(j\omega) K_{o.c} \frac{R_{ш}}{R_1} \frac{M_{13}}{R_6} (\omega'^2 - \omega^2)}$$
(10)

Искомое выражение для передаточной функции сейсмоприемника с активными обратными связями находим умножением (10) на W_c (передаточную функцию сейсмоприемника, нагруженного на емкость), полагая при этом, что сейсмоприемник возбуждается с механической стороны. Выражение для W_c и его детальный анализ приведены в работе [4]. Выпишем это выражение:

$$W_c = \frac{U}{\xi} = \frac{R_{ш}}{R_1} \frac{N_1 \omega^2}{\omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2)}$$
(11)

Умножая (10) на (11), получаем

$$W_{o.c} = \frac{U_{\text{вых}}}{\xi} = W_c K_{\gamma} = \frac{R_{ш}}{R_1} \times \frac{\omega^2 N_1 K_u}{\omega_0^2 - \omega^2 \left[1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2) + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2) + j\omega K(j\omega) K_u K_{o.c} \frac{R_{ш}}{R_1} \frac{M_{13}}{R_6} (\omega'^2 - \omega^2) \right]}$$
(12)

Сопоставляя (11) и (12), видим, что $W_{o.c}$ отличается от W_c наличием дополнительного члена в знаменателе, вид которого зависит от значения функции $K(j\omega)$, определяющей тот или иной вид активной обратной связи.

Полагая, что в $W_{o.c}$ $K_{o.c} = 0$ (цепь обратной связи разомкнута), приходим к выражению для W_c .

Для определения $W_{o.c}$ по ускорению, скорости и перемещению будем поочередно придавать $K(j\omega)$ значение передаточной функции однократного дифференциатора, линейного передаточного элемента и однократного интегратора.

Заметим, что при "идеальном" дифференцировании и интегрировании возникающая вследствие наличия ОС дополнительная механическая сила сдвинута по фазе по отношению к перемещению подвижной массы на 0° (положительная) или на 180° (отрицательная ОС), т.е. совмещена с действительной осью на комплексной плоскости.

В общем случае эта сила сдвинута по отношению к перемещению на некоторый угол φ и может быть заменена ее проекциями на действительную и мнимую оси, в связи с чем в знаменателе $W_{o.c}$ появились бы дополнительные слагаемые как в действительном, так и в мнимом члене.

Для упрощения дальнейших выкладок ограничимся случаем "идеального" дифференциатора и интегратора, т.е. потребуем, чтобы в пределах заданной полосы частот соблюдалось условие $\omega \tau_x \ll 1$ для дифференциатора и $\omega \tau_x \gg 1$ для интегратора, где τ_x и τ_x — постоянные времени дифференциатора и интегратора соответственно.

Знак функции $K(j\omega)$ выбираем, исходя из требований снижения значения собственной частоты ω_0 и необходимой корректировки степени затухания β .

Таким образом функции $K(j\omega)$ будем придавать значения $K(j\omega)_{\dot{x}} = j\omega \tau_x$, $K(j\omega)_{\ddot{x}} = \pm 1$, $K(j\omega)_x = -1/j\omega \tau_x$. Подставляя поочередно значения $K(j\omega)$ в (12), можно по-

лучить выражения $W_{o.c}$ для соответствующих активных ОС, которые нетрудно свести в одну обобщенную формулу для $W_{o.c}$:

$$W_{o.c} = \frac{U_{\text{вых}}}{\xi} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_1} \frac{\omega^2 N_1 K_u}{\omega_0^2 - \omega^2 [1 + (\omega'^2 - \omega^2)(\tau' \tau_c + A)] - \frac{B(\omega'^2 - \omega^2) + j\omega[(\tau_{12} + \tau_c)(\omega''^2 - \omega^2) \pm B(\omega'^2 - \omega^2)]}{\omega_0^2 - \omega^2}} \quad (13)$$

где $A = K_{\dot{x}} \tau_0 \tau_{\dot{x}}$, $B = K_x (\tau_0 / \tau_x)$, $V = K_{\dot{x}} \tau_0$, $\tau_0 = K_u \frac{R_{\text{ш}} M_{13}}{R_1 R_6}$. $K_x, K_{\dot{x}}, K_{\ddot{x}}$ — коэффициенты усиления в цепях обратной связи, необходимые для получения заданной глубины ОС. Очевидно, что для реализации комбинации из двух или трех типов одновременно используемых ОС необходимо использовать соответствующие параллельно включенные цепи ОС с суммированием токов ОС в обмотке ОС (см. рис. 1).

Таким же образом можно получить обобщенную формулу для передаточной функции усилителя с обратными связями K_{γ} . Для этого достаточно заменить знаменатель в (10) на знаменатель из (13).

Из (13) видим, что, поскольку τ_c из-за наличия внутренней емкости в сейсмоприемнике никогда не равна нулю, передаточная функция сейсмоприемника, как с ОС, так и без них, описывается уравнением четвертого порядка [4]. Следовательно, сейсмоприемник имеет две собственные частоты — ω_{01} и ω_{02} , которые находятся как корни приравненного нулю действительного члена знаменателя $W_{o.c}$.

Для нахождения приближенного значения ω_{01} положим, что $\omega_{01}^2 \ll \omega'^2$, и, придавая текущей переменной ω значение ω_{01} , получим

$$\omega_{01}^2 \cong \frac{\omega_0^2 - B\omega'^2}{1 + \omega'^2 (\tau' \tau_c + A)} \cong \frac{(\omega_{01}^2)_B}{1 + \omega'^2 (\tau' \tau_c + A)} \quad (14)$$

Здесь $(\omega_{01}^2)_B = \omega_0^2 - B\omega'^2$ — значение ω_{01}^2 при $\omega'^2 (\tau' \tau_c + A) \rightarrow 0$, очевидно, что при $B = 0$ $(\omega_{01}^2)_B = \omega_0^2$, при $A = 0$, $B = 0$, $\tau_c \rightarrow 0$, $\omega_{01}^2 \rightarrow \omega_0^2$.

При значении $\omega = \omega_{02}$ действительный член знаменателя $W_{o.c}$ приводится к биквадратному уравнению, приближенное решение которого для ω_{02} дает

$$\omega_{02}^2 \cong 1/(\tau' \tau_c + A) + \omega'^2 \quad (15)$$

Для определения степени затухания β_{01} и β_{02} на частотах ω_{01} и ω_{02} преобразуем (13) в безразмерный вид, пронормировав по ω_{01} и вынеся из знаменателя постоянный член, не зависящий от текущей переменной. Получим

$$W_{o.c} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_1} N_1 K_u \frac{\omega_{01}^2}{(\omega_{01}^2)_B} \frac{\omega^2 / \omega_{01}^2}{1 - \frac{\omega^2}{(\omega_{01}^2)_B} [1 + (\omega'^2 - \omega^2)(\tau' \tau_c + A)] + j\omega / (\omega_{01}^2)_B + \frac{B(\omega'^2 - \omega^2) + j\omega[(\tau_{12} + \tau_c)(\omega''^2 - \omega^2) \pm B(\omega'^2 - \omega^2)]}{(\omega_{01}^2)_B}} \quad (16)$$

Модуль выражения (16) определяет приведенную к нормированному по ω_{01} уровню АЧХ и аргумент ФЧХ сейсмоприемника с активными ОС. Множитель $\omega_{01}^2 / (\omega_{01}^2)_B = \omega_{01}^2 / \omega_0^2 \cdot \omega_0^2 / (\omega_{01}^2)_B$ указывает на снижение коэффициента передачи сейсмоприемника при введении ОС. Подразумевается, что ω_{01} — результат введения ОС при $\tau_c \neq 0$, $A \neq 0$ и $B \neq 0$. Множитель $\omega_0^2 / (\omega_{01}^2)_B$ дает поправку для случая $B \neq 0$, поскольку введение ОС по перемещению не сопровождается уменьшением передачи.

При $\omega = \omega_{01}$ и $\omega = \omega_{02}$ действительный член в (16) обращается в нуль и из значения

модуля $W_{0,c}$ определяются β_{01} и β_{02} :

$$\beta_{01} = \frac{\omega_0}{(\omega_{01})_B} \frac{\omega_{01}}{\omega_0} \frac{(\tau_{12} + \tau_c)(\omega''^2 - \omega_{01}^2) \pm B(\omega'^2 - \omega_{01}^2)}{2(\omega_{01})_B}, \quad (17)$$

$$\beta_{02} = \frac{\omega_0^2}{(\omega_{01}^2)_B} \frac{\omega_{01}^2}{\omega_0^2} \frac{(\tau_{12} + \tau_c)(\omega''^2 - \omega_{02}^2) \pm B(\omega_1^2 - \omega_{02}^2)}{2\omega_{02}}. \quad (18)$$

В (18) должно быть взято абсолютное значение числителя.

Воспользовавшись выражением (14), определим постоянные, от которых зависит изменение собственной частоты сейсмоприемника, а именно: C_3 — емкости, шунтирующей сейсмоприемник (а следовательно, и τ_c), постоянных А и Б — через величину желаемой "затяжки" и параметры прибора.

При А = 0 и Б = 0

$$C_3 = \left(\frac{\omega_0^2}{\omega_{01}^2} - 1 \right) \frac{1}{\omega^2 L_1} \frac{R_K + R_{III}}{R_K + R_2'} \frac{R_2'}{R_{III}}, \quad (19)$$

при Б = 0

$$A = \left[\frac{\omega_0^2}{\omega_{01}^2} - (1 + \omega'^2 \tau' \tau_c) \right] \frac{1}{\omega'^2}, \quad (20)$$

$$\text{при } \tau' \tau_c + A \rightarrow 0 \quad B = \frac{\omega_0^2 - (\omega_{01}^2)_B}{\omega'^2}. \quad (21)$$

Определив величины А и Б, устанавливаем значения K_x и $K_{\ddot{x}}$:

$$K_x = B \tau_0 / \tau_x; \quad K_{\ddot{x}} = A / \tau_0 \tau_{\ddot{x}}. \quad (22)$$

Значения τ_x и $\tau_{\ddot{x}}$ должны быть выбраны, исходя из заданной полосы пропускания сейсмоприемника и приведенных выше соображений.

Если C_3 представляет собой не физическую емкость, а получается при помощи конвертора импеданса [4], реализуемого на усилителе ОС, то дополнительные ограничения накладываются на K_u усилителя ОС, а именно

$$K_u = (C_3 / C_0) - 1, \quad (23)$$

где C_0 — физическая емкость, преобразуемая конвертором импеданса в C_3 .

Постоянная В определяется из выражения для β_{01} (17):

$$B = \pm \left[2(\omega_{01})_B \beta_{01} \frac{\omega_0}{\omega_{01}} \frac{(\omega_{01})_B}{\omega_0} - (\tau_{12} + \tau_c)(\omega''^2 - \omega_{01}^2) \right] \frac{1}{\omega'^2}, \quad (24)$$

где β_{01} — заданная степень затухания на частоте ω_{01} .

Следовательно,

$$K_{\ddot{x}} = B / \tau_0. \quad (25)$$

Таким образом, для вычислений по формулам (13) и (16) необходимо иметь следующие исходные данные сейсмоприемника: N_1 , m , ω_0 , L_1 , n_1 , n_3 , C_3 или C_0 , R_K , R_{III} , R_2' .

Поскольку R_2 (активное сопротивление проводящего каркаса катушки) невозможно измерить непосредственно, величина $R_2' = R_2 n_1^2$ определяется из измеренного значения степени затухания $\beta_{0,x}$ подвижной массы при разомкнутых обмотках:

$$R_2' = N_1^2 / 2m \omega_0 \beta_{0,x}. \quad (26)$$

Из исходных параметров определяются τ' , τ_c , τ_{12} , τ_0 , ω' , ω'' , M_{13} , K_u . Далее необходимо задать значения $(\omega_{01})_B / \omega_0$, ω_{01} / ω_0 , β_{01} , τ_x , $\tau_{\ddot{x}}$, R_B (для каждой цепи ОС). Из заданных величин и исходных параметров определяются постоянные А, Б, В. Исковыми величинами являются $|W_{0,c}|$, $\arg W_{0,c}$, K_x , $K_{\ddot{x}}$, $K_{\dot{x}}$.

Приведем краткий оценочный анализ полученных выражений. Из (14) следует, что при использовании ОС_x сейсмоприемник становится потенциально неустойчивым, что ограничивает возможность снижения ω_0 и накладывает жесткие требования к стабильности K_u и K_x .

При снижении ω_0 путем увеличения τ_c ω_{02} приближается к ω' (при этом всегда $\omega_{02} > \omega'$), однако в силу того, что при этом за счет увеличения потерь на сопротивление R_k увеличивается β_{02} (β_{02} не может быть изменена независимо от β_{01}), реальная граничная частота справа становится существенно меньше ω_{02} (или ω'). Таким образом, влияние емкости приводит как к снижению ω_0 , так и к уменьшению рабочей полосы частот.

При использовании для снижения ω_0 ОС_x возникают некоторые осложнения.

Между обмоткой обратной связи и сигнальной обмоткой сейсмоприемника существует межобмоточная емкость (см. рис. 1 — пунктирная цепь с $C_{o.c}$), образующая прямую связь обмотки ОС с входом усилителя. Поскольку напряжение на L_3 , при соблюдении режима генератора тока на выходе цепи ОС, равно $i_{k3} j\omega L_3$, сигнал, поданный на вход усилителя при прохождении через цепь ОС, оказывается продифференцированным дважды — на $K(j\omega)$ и на L_3 , что означает положительную обратную связь по цепи $C_{o.c}$. При малых значениях C_3 усилитель самовозбуждается.

Простейший способ предотвратить генерацию — увеличить C_3 . Практически генерация предотвращается при значениях C_3 (а следовательно, τ_c) малых с точки зрения влияния ее на изменение ω_0 .

Однако при малых τ_c введение ОС_x приводит к снижению затухания на частоте ω_{02} и появлению на АЧХ сейсмоприемника на этой частоте резкого подъема. Объясняется это тем, что при малых значениях τ_c $\omega'' \rightarrow \omega'$, а при относительно больших значениях A (см. (15)) $\omega_{02} \rightarrow \omega'$, в силу чего β_{02} становится малым (см. (17)). Сейсмоприемник при этом не теряет устойчивости, поскольку действительный и мнимый члены знаменателя $W_{o.c}$ не могут быть одновременно равны нулю и, следовательно, $|W_{o.c}|$ всегда имеет конечное значение.

Из сказанного следует интересный вывод. Поскольку для затягивания ω_0 до значения ω_{01} необходимо обеспечить некоторое значение суммы $\tau' \tau_c + A$ при $B = 0$, а это значение может быть получено при разных соотношениях τ_c и K'_x , оказывается возможным подобрать такие значения τ_c и K'_x , при которых увеличение β_{02} за счет τ_c будет скомпенсировано соответствующим уменьшением β_{02} за счет ОС_x. Используя дополнительную корректировку β_{01} введением ОС_x, можно получить АЧХ, линейную до частоты ω_{02} , т.е. расширить рабочую полосу частот.

На рис. 2 показаны АЧХ, иллюстрирующие эту возможность. Для расчетов были использованы следующие данные одного из макетов сейсмоприемника:

$$\omega_0 = 2\pi \cdot 3,5 \text{ рад/с}, \quad N_1 = 297 \text{ В} \cdot \text{с/м}, \quad L_1 = 8,2 \text{ Гц}, \quad m = 6,1 \cdot 10^{-3} \text{ кг},$$

$$n_1 = 16 \cdot 10^3, \quad n_3 = 2 \cdot 10^3, \quad R_k = 13 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \quad R_{ш} = \infty, \quad \beta_{0xx} = 0,56,$$

$$R'_2 = 58,7 \cdot 10^3 \text{ Ом}, \quad C_3 = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Исходная АЧХ при указанных параметрах макета представлена на рис. 2, а графиком 1. При указанном значении C_3 введение ОС_x приводит к генерации. Для предотвращения генерации C_3 увеличена до значения $C_3 = 0,2 \cdot 10^{-6}$ Ф. Получаемой при этом АЧХ соответствует кривая 2.

При введении ОС_x, глубиной обеспечивающей значение $\omega_{01} = 2\pi \cdot 0,7$ рад/с ($\omega_0/\omega_{01} = 5$), и ОС_x, обеспечивающей $\beta_{01} = 0,6$, получена АЧХ, изображаемая кривой 3. Как видим, на частоте ω_{02} имеется резкий максимум. Подсчитанная для этого случая на основании формулы (10) АЧХ K_γ изображена кривой 4. Как видим, подъем АЧХ сейсмоприемника на ω_{02} объясняется подъемом усиления K_γ на этой частоте. В принятом логарифмическом масштабе кривая 3 определяется суммой ординат кривых 2 и 4.

Для компенсации подъема на частоте ω_{02} емкость C_3 увеличена до $5 \cdot 10^{-6}$ Ф. АЧХ сейсмоприемника (при отсутствии ОС_x) при этом дается кривой 5. При введении до-

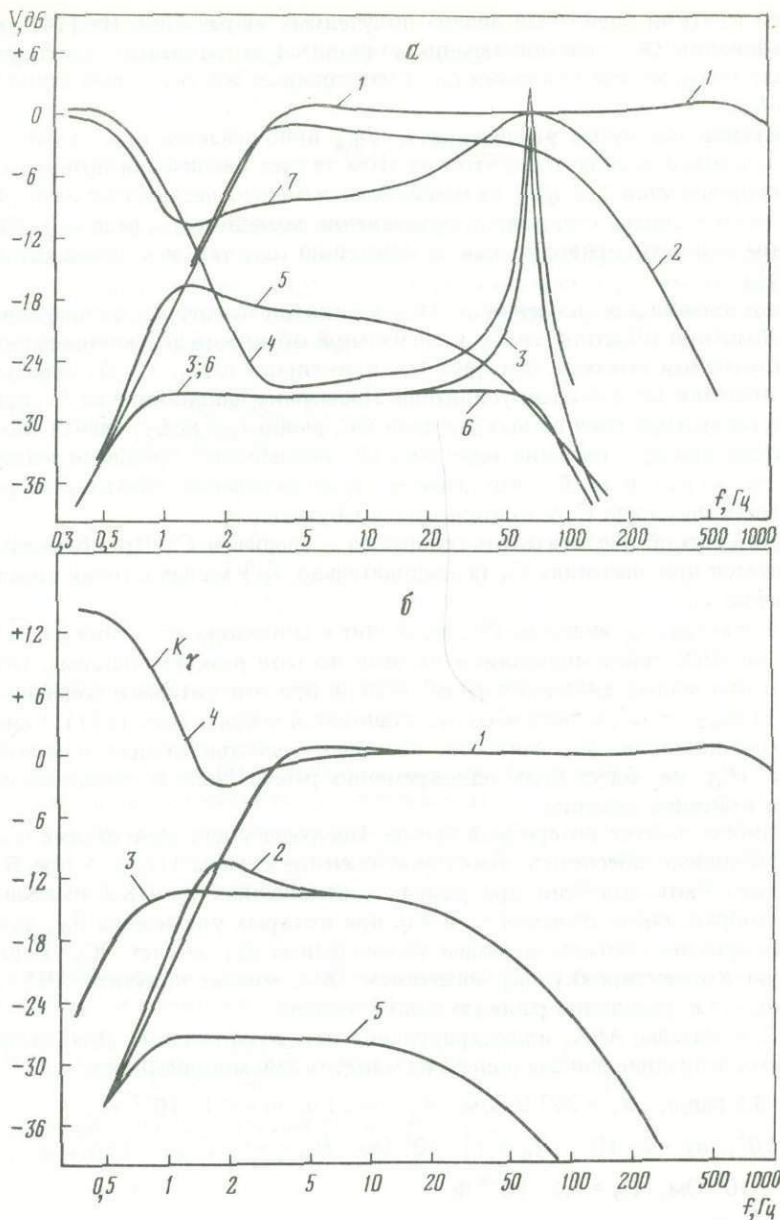


Рис. 2. АЧХ сейсмоприемника с активными обратными связями V и K_{γ_1}/K_u

$$V = |w_{0.c.}| \frac{R_1}{R_{ш}} \cdot \frac{1}{N_1} K_u, \text{ дБ}$$

полнительной ОС \ddot{x} ; обеспечивающей значение $\omega^{01} = 2\pi \cdot 0,7$ рад/с, и ОС \dot{x} , обеспечивающей $\beta_{01} = 0,6$, полученная АЧХ изображается кривой 6. При этом АЧХ K_{γ} дается кривой 7. АЧХ 6 получается как сумма ординат кривых 5 и 7.

Как видим, в итоге получена АЧХ с вполне удовлетворительной линейностью до частоты ω_{02} .

На рис. 2, б показаны АЧХ, вычисленные для того же макета сейсмоприемника при комбинированной затяжке его собственной частоты шунтированием емкостью $\omega_{01} =$

$= \omega_0/\sqrt{5}$ и введением дополнительной положительной обратной связи по перемещению, обеспечивающей дополнительное затягивание ω_0 до значения $\omega_{01} = \omega_0/\sqrt{5}$.

Кривая 1 дает АЧХ исходного сейсмоприемника. Кривая 2 – АЧХ сейсмоприемника, затянутого емкостью в $\sqrt{5}$ раз. Кривая 3 – АЧХ после дополнительного затягивания ω_0 до значения $\omega_{01} = \omega_0/5$. Кривая 4 – АЧХ K_γ при введении ОС_x. Кривая 3 получается суммированием кривых 4 и 2. Кривая 5 представляет АЧХ сейсмоприемника, затянутого лишь шунтированием емкостью до значения $\omega_{01} = \omega_0/5$.

Из сопоставления кривых 5 и 3 видно, что при использовании комбинированной затяжки за счет τ_c и ОС_x может быть получена та же АЧХ, но с меньшей потерей передачи сейсмоприемника, поскольку введение ОС_x, затягивая ω_0 , не вызывает потерь в передаче.

Сопоставление экспериментальных АЧХ с расчетными проводилось на аналогичном макете сейсмоприемника по АЧХ 5 (см. рис. 2, б) и 3 (см. рис. 2, а) и показало их хорошее совпадение. Обнаружено незначительное несовпадение частоты ω_{02} для АЧХ 3 (см. рис. 2, а), что можно объяснить зависимостью индуктивности и полных активных потерь от частот, не учтенных в расчете.

АЧХ K_γ позволяет оценить собственный шум сейсмоприемника по $U_{\text{ВЫХ}}$. Если для исходного сейсмоприемника (кривая 1 на рис. 2, а) его передача характеризуется значением коэффициента преобразования N_1 при K_u усилителя, равном единице, то шум на выходе усилителя будет определяться шумом, приведенным к его входу (собственным шумом преобразователя и механической части сейсмоприемника пренебрегаем).

Результативная, после введения комбинированной ОС, АЧХ сейсмоприемника в полосе его пропускания обладает передачей в ω_{01}^2/ω_0^2 раз меньшей. Для получения прежней передачи необходимо увеличить коэффициент усиления K_u усилителя в такое же количество раз. Соответственно возрастет и шум на его выходе. Изменение спектра шума на выходе легко оценить по кривой АЧХ K_γ .

Расширение полосы пропускания сейсмоприемника как в сторону низких, так и в сторону высоких частот с сохранением линейности АЧХ в пределах полосы пропускания может быть получено при исключении индуктивной связи между обмоткой обратной связи и сигнальной обмоткой и ее проводящим каркасом. Известны патенты, реализующие эту идею.

Для анализа этого варианта ОС выведено выражение для передаточной функции сейсмоприемника с активными ОС при отсутствии индуктивных связей.

Полагая, что при отсутствии индуктивных связей обмотки ОС

$$i_{k1} = 0, \quad i_{k2} = 0, \quad i_{k3} = K_{o.c} K(j\omega) U_{\text{ВЫХ}} / R_6.$$

Следовательно, в уравнении (7) значение силы F в правой части должно быть заменено на $F = N_3 (K_{o.c} K(j\omega) U_{\text{ВЫХ}} / R_6)$, в связи с чем решение уравнения (7) приведет к иному значению \dot{x} (обозначим его \dot{x}_1):

$$\dot{x}_1 = \frac{U_{\text{ВЫХ}} K_{o.c} K(j\omega) N_3}{R_6} \frac{1}{m} \frac{j\omega [1 - \omega^2 \tau' \tau_c + j\omega(\tau_{12} + \tau_c)]}{\omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega(\tau_{12} + \tau_c)(\omega'^2 - \omega^2)} \quad (27)$$

Подставляя (27) в (5) и полученное выражение для i_1 в (1), получим выражение для $U_{o.c2}$ ($U_{o.c1} = 0$, поскольку $i_{k1} = 0$):

$$U_{o.c2} = i_1 \frac{R_{\text{ш}}}{1 + j\omega \tau_c R_1 / R_k} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_1} \frac{N_1 N_3}{m} \frac{U_{\text{ВЫХ}} K(j\omega) K_{o.c}}{R_6} \times \frac{j\omega}{\omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega(\tau_{12} + \tau_c)(\omega'^2 - \omega^2)} \quad (28)$$

Определив из (28) значение $\gamma = \gamma_1 = U_{\text{о.с.2}}/U_{\text{вых}}$, найдем выражение для $K_{\gamma_1} = K_u/(1 - \gamma_1 K_u)$:

$$K_{\gamma_1} = \frac{K_u [\omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2)]}{\omega_0^2 - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2)] + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2) + j\omega \frac{R_{\text{ш}} N_1 N_3}{R_1 m} \frac{K_u K(j\omega) K_{\text{о.с.}}}{R_{\text{б}}}} \quad (29)$$

Умножая (29) на (11), получим выражение для $W'_{\text{о.с.}}$ — передаточной функции сейсмоприемника с активными обратными связями при отсутствии индуктивной связи с обмоткой ОС:

$$W'_{\text{о.с.}} = \frac{U_{\text{вых}}}{\xi} = \frac{U}{\xi} K_{\gamma_1} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_1} \times \\ \times \frac{\omega^2 N_1 K_u}{\omega_0^2 - \omega^2 \left[1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2) + j\omega (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2) + j\omega \frac{R_{\text{ш}} N_1 N_3}{R_1 m} \frac{K_u K(j\omega) K_{\text{о.с.}}}{R_{\text{б}}} \right]} \quad (30)$$

Придавая, как и прежде, различные значения $K(j\omega)$, перейдем к обобщенной формуле для $W'_{\text{о.с.}}$:

$$W'_{\text{о.с.}} = \frac{R_{\text{ш}}}{R_1} \times \\ \times \frac{\omega^2 N_1 K_u}{\omega_0^2 - B' - \omega^2 [1 + \tau' \tau_c (\omega'^2 - \omega^2) + A'] + j\omega [(\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega^2) \pm B']} \quad (31)$$

$$\text{где } B' = \omega_0^2 - (\omega_{01}^2)_{B'} = K_x \frac{N_1 N_3}{m L_1} \frac{\tau'_0}{\tau_x} = \omega_0^2 \left[1 - \frac{(\omega_{01}^2)_{B'}}{\omega_0^2} \right],$$

$$A' = \frac{\omega_0^2}{\omega_{01}^2} \frac{(\omega_{01}^2)_{B'}}{\omega_0^2} - (1 + \tau' \tau_c \omega'^2) = K_x \frac{N_1 N_3}{m L_1} \tau'_0 \tau_x,$$

$$B' = 2(\omega_{01})_{B'} \beta_{01} \frac{(\omega_{01})_{B'}}{\omega_{01}} - (\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega_{01}^2) = K_x \frac{N_1 N_3}{m L_1} \tau'_0,$$

$$\tau'_0 = \frac{R_{\text{ш}} L_1}{R_1 R_{\text{б}}} K_u.$$

Полагая, как и прежде, $\omega_{01}^2 \ll \omega'^2$, получим

$$\omega_{01}^2 \cong \frac{(\omega_{01}^2)_{B'}}{1 + \tau' \tau_c \omega'^2 + A'} \quad (32)$$

$$\omega_{02}^2 \cong \omega_B^2 \frac{(\omega_{01}^2)_{B'}}{\omega_0^2} \frac{\omega_0^2}{\omega_{01}^2} \frac{R_{\text{к}} + R_{\text{ш}}}{R_{\text{к}} + R_2'} \frac{R_2'}{R_{\text{ш}}}, \quad \text{где } \omega_B^2 = 1/L_1 C_3, \quad (33)$$

$$\beta_{01} \cong \frac{\omega_{01}}{\omega_0} \frac{\omega_0}{(\omega_{01})_{B'}} \frac{(\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega_{01}^2) \pm B'}{2(\omega_{01})_{B'}} \quad (34)$$

$$\beta_{02} \cong \frac{\omega_{01}^2}{\omega_0^2} \frac{\omega_0^2}{(\omega_{01}^2)_{B'}} \frac{(\tau_{12} + \tau_c) (\omega''^2 - \omega_{02}^2) \pm B'}{2\omega_{02}} \quad (35)$$

Из (33) следует, что при полном отсутствии связей между сигнальной обмоткой и обмоткой возбуждения значение C_2 может быть малым без опасности самовозбуждения и, следовательно, ω_B будет большой. Множитель ω_0^2/ω_{01}^2 показывает, что $\omega_{02} > \omega_B$. Это объясняется тем, что АЧХ при затягивании ω_0 вписывается в АЧХ исходного сейсмоприемника, имеющего справа отрицательную крутизну 12 дБ/окт., на уровне передачи меньшем, чем у исходного сейсмоприемника, в ω_0^2/ω_{01}^2 раз.

Все замечания, сделанные выше, относительно порядка вычислений остаются в силе. Заметим лишь, что в произведении $N_1 \cdot N_3$ нельзя выражать N_3 через N_1 и наоборот, так как преобразователи N_1 и N_3 не связаны между собой индуктивно и могут иметь различные магнитные системы. Также следует иметь в виду, что в качестве подвижной массы m можно рассматривать как подвижную катушку с обмотками, так и магнитную систему, подвижную относительно закрепленной на корпусе катушки. Для расчета АЧХ подобного сейсмоприемника надо использовать его реальные параметры, определяемые выбранным схемно-конструктивным решением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Железняк Т.К. Анализ длиннопериодных каналов с различными типами коррекции // Проблемы и методы сейсмологии. М.: Наука, 1981. С. 24–37. (Сейсмические приборы; Вып. 14).
2. Трапезников Н.Л. Влияние взаимной индукции катушек магнитоэлектрического преобразователя на характеристики сейсмометра с обратной связью // Там же. С. 63–66.
3. Лосев А.К. Линейные радиотехнические цепи. М.: Высш. шк. 1971. 600 с.
4. Шведчиков Л.К., Данилин В.П. Низкочастотный сейсмоприемник для региональных работ // Прикладная геофизика. М.: Недра, 1982. Вып. 103. С. 84–100.

УДК 550.34

*А.С. Гаспарян, С.А. Мхитарян, С.В. Карапетян,
Т.А. Дозоров*

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЯМОЙ АНАЛОГОВОЙ ЗАПИСИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ОТ 0,1 ДО 15 Гц

В автономных донных сейсмических станциях (АДСС) в основном используют цифровые или аналоговые способы регистрации с прямой магнитной записью (ПМЗ). Магнитную регистрацию с ЧМ и ШИМ используют реже из-за повышенных требований к лентопротяжным механизмам и большому расходу магнитной ленты.

Как аналоговые, так и цифровые методы регистрации имеют свои преимущества и недостатки.

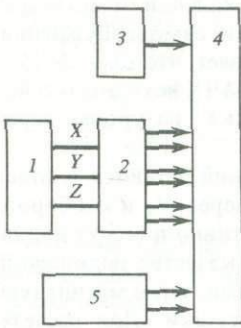
Главными недостатками ПМЗ с ВЧ подмагничиванием можно считать ограниченный динамический диапазон (обычно 35–40 дБ) и большие амплитудные погрешности (порядка 10%).

При необходимости для повышения динамического диапазона ПМЗ применяются традиционные способы сжатия входного сигнала или запись на двух-трех уровнях с перекрытием [1, 2]. Амплитудные же погрешности зависят от качества магнитной ленты, лентопротяжного механизма записи–воспроизведения и могут быть существенно уменьшены [3–5].

Так как для глубоководной аппаратуры главными факторами являются минимальные габариты, масса, энергопотребление, а также повышенная плотность записи, автономность и надежность, то наибольшее распространение получили АДСС с ПМЗ [1, 4,

Блок-схема АДСС с ПМЗ

1 — сейсмоприемник; 2 — усилитель записи; 3 — генератор подмагничивания; 4 — механизм транспортировки магнитной ленты; 5 — кварцевые часы



6, 7]. Имея в виду, что вероятность утраты АДСС еще достаточно высока, по экономическим соображениям тоже целесообразно применение аналоговых АДСС, которые существенно дешевле и доступнее, чем цифровые.

Однако несмотря на вышеприведенные достоинства АДСС с ПМЗ, область их применения ограничена из-за трудностей, возникающих при регистрации длиннопериодных сейсмических процессов (частотой ниже 0,2 Гц). Из-за этого для регистрации длиннопериодных процессов вынужденно принимают АДСС с цифровой или ЧМ записью, если даже не требуются высокие метрологические характеристики.

В частности, как известно [4, 7], АДСС с ПМЗ для регистрации сейсмической информации в диапазоне частот ниже 0,2 Гц не существуют, хотя имеются сведения [8] о двухканальном записывающем устройстве, которое регистрирует колебательные процессы в диапазоне периодов 1–30 с.

В данной работе рассматриваются основные результаты разработки АДСС с ПМЗ для регистрации сейсмических процессов в частотном диапазоне 0,1–15 Гц.

Из-за отсутствия математических моделей процесса магнитной записи—воспроизведения для выявления возможности осуществления ПМЗ в диапазоне частот 0,1–15 Гц и определения ее оптимальных характеристик проведены экспериментальные исследования тракта записи—воспроизведения.

В экспериментальных исследованиях были применены различные магнитные головки (ЛШЗ.253.236, ГПО153, РЫЗ.253.027, ЛШЗ.253.934) и ленты (И-4404-12, И-4406-12, ORWO тип 415, 640).

Ниже приведены данные, полученные с помощью восьмиканальной магнитной головки ЛШЗ.253.934 и магнитной ленты И-4406-12.

Скорость записи выбрана $v_z = 0,32$ мм/с, а скорость воспроизведения — $v_v = 95,3$ мм/с для транспортировки спектра 0,1–15 Гц с коэффициентом транспортирования $K_T = 300$ в область звуковых частот 300–4500 Гц, где для обработки и анализа записей можно применять различные стандартные устройства [5,8].

В результате экспериментальных исследований получены следующие данные: оптимальный ток подмагничивания 1,9–2 мА, частота подмагничивания 1 кГц, динамический диапазон записи—воспроизведения около 37 дБ.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований была разработана АДСС с ПМЗ, блок-схема которой приведена на рисунке.

Сейсмоприемник представляет собой трехкомпонентный пьезоэлектрический акселерометр и имеет следующие основные параметры:

Частотный диапазон, Гц	0,01–20
Коэффициент преобразования, В · с ² /м	25
Средний собственный шум, приведенный к входу, м/с ²	10 ⁻⁷
Динамический диапазон, дБ	90
Минимальный выходной сигнал, мкВ	10
Инертная масса, кг	3,6
Потребляемая мощность мВт	150

Усилитель записи состоит из трех идентичных усилителей постоянного тока (УПТ). Каждый УПТ включает в себя предварительный усилитель с коэффициентом усиления $K_{yc} = 30$ на микросхемах 140УД13 и 140УД12 и оконечный усилитель на микросхеме 140УД12, обеспечивающий $K_{yc} = 200$ и $K_{yc} = 14$. С выходов усилителей записи через делители напряжения сигналы поступают на первичные обмотки магнитной головки

ЛЩЗ.253.934, обеспечивая шестиканальную запись входных сигналов на двух уровнях с перекрытием 14 дБ.

Усилитель записи имеет следующие основные параметры:

Коэффициент усиления	6000/420
Среднеквадратические шумы, мкВ	0,75
Динамический диапазон, дБ	90
Температурный дрейф по входу, мкВ/°С	0,95
Потребляемая мощность, мВт	180

Генератор подмагничивания выполнен на микросхеме 140УД14. Он представляет собой генератор Вина с автоматической регулировкой усиления и предварительным детектированием колебаний [9]. Для повышения выходного тока генератора на выходе предусмотрен двухтактный эмиттерный повторитель на транзисторах КТЗ107Ж и КТЗ102Е.

С выхода генератора подмагничивания сигнал подмагничивания поступает на последовательно соединенные вторичные обмотки магнитной головки.

Генератор подмагничивания имеет следующие основные параметры:

Частота подмагничивания, кГц	1
Нестабильность частоты,	$\pm 0,01\%$
Коэффициент нелинейных искажений,	0,3%
Потребляемая мощность, мВт	4,5

Механизм транспортирования магнитной ленты (МТМЛ)

Исходя из конструктивных соображений, а также с целью улучшения условий эксплуатации была выбрана конструкция лентопротяжного механизма с планарным расположением кассет.

Это дало возможность получить прямолинейную рабочую зону, удобную как при изготовлении, так и при эксплуатации.

Рабочая зона с двух сторон изолирована от влияний боковых узлов.

Со стороны подающего узла установлен дополнительный обрезиненный вал с прижимным роликом, а со стороны приемного узла — ведущий вал с прижимным роликом.

Тракт движения магнитной ленты выбран таким образом, что лента обхватывает ведущий вал более чем на 90° . Этим создается хороший контакт с ведущим валом и при высоком классе изготовления ведущего вала обеспечивается стабильность скорости движения магнитной ленты.

Приемный узел и ведущий вал приводятся в движение при помощи отдельных электродвигателей. Конструкции приемного и подающего узлов идентичны.

МТМЛ имеет следующие основные параметры:

Скорость продвижения магнитной ленты, мм/с	0,32
Число каналов записи	8
Ширина магнитной ленты, мм	12,7
Количество электродвигателей	2
Длина магнитной ленты в кассете, м	360
Потребляемая мощность, мВт	60

Кварцевые часы функционально состоят из кварцевого генератора с делителями частот и кодировщика времени. Для обеспечения большой стабильности в качестве опорного генератора применен экономичный высокостабильный генератор "Сонет-А" с относительным долговременным отклонением частоты от номинального значения порядка $0,5 \cdot 10^{-7}$.

Синусоидальный сигнал кварцевого генератора с напряжением 250 мВ и частотой 10 МГц через повышающий трансформатор и схему формирования импульсов поступает в делитель частоты на 10. Далее импульсы с частотой 1 МГц последовательно делятся на 25, 625, 64, 60 и на выходах счетчиков получается набор положительных импульсов с частотами повторения 40 кГц, 64, 1, 1/60 Гц соответственно, которые поступают в кодировщик времени.

Кодировщик времени состоит из счетчика минут, часов и суток, последовательных регистров, устройств управления параллельной записью и последовательной выдачей двоично-десятичного кода текущего времени, а также устройства формирования кодированных сигналов текущего времени. На седьмой канал магнитной головки от кварцевых часов поступает последовательный код минут, часов и суток с периодом повторения 60 с, в котором информация кодируется с периодом повторения 1 с с вариациями длительности импульсов.

Начало периода повторения кода соответствует началу минуты текущего времени и отмечается восьмью импульсами длительностью 62,5 мс. В последующем последовательном коде логическим единицам соответствуют четыре импульса длительностью 62,5 мс, а нулям — два импульса.

Кварцевые часы выполнены на микросхемах серии K561, кроме входного делителя 10 МГц на 10, выполненного на микросхемах серии K1564.

На восьмой канал магнитной головки с кварцевых часов поступает пилот-сигнал частотой 16 Гц, применяемый для аналого-цифрового преобразования сейсмических процессов при воспроизведении.

Аналоговый магнитофон донной станции имеет следующие характеристики:

Ширина магнитной ленты, мм	12,7
Скорость записи, мм/с	0,32
Количество каналов	
сейсмических	6
служебных	2
Диапазон регистрируемых частот, Гц	0,1–15
Динамический диапазон записи, дБ	2 × 37
Чувствительность, мкВ	2
Автономность, сут	13
Потребляемая мощность, Вт	0,75
Масса, кг	2
Диапазон рабочих температур, °С	0 – +50

В СОКТИ АН АрмССР в 1986 г. успешно завершены лабораторные испытания макетного образца разработанного магнитографа. Опытные образцы изготовлены в 1988 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арнетт Р.А., Ньюхауз Т.В. Донный сейсмограф // ТИИЭР. 1965, № 12. С. 2110–2116.
2. Дозоров Т.А. Канал обработки сигнала для донной сейсмической станции с логарифмическим преобразованием // Сейсмометры, регистраторы и сейсмические каналы. М.: Наука, 1986. С. 43–41. (Сейсмические приборы; Вып. 18).
3. Аксенов В.А., Вичис А.И., Гитлиц Н.В. Точная магнитная запись. М.: Энергия, 1973. 280 с.
4. Зверев С.М., Фурсов А.Н., Халилулов Ш.Ш. Аппаратура для сейсмических исследований на дне моря // Сейсмологические исследования мирового океана. М.: Наука, 1983. Вып. 8. С. 34–50.
5. Бугров В.А. Физика магнитной звукозаписи. М.: Искусство, 1973. 496 с.
6. Лунарский Г.Н. Особенности зарубежных донных сейсмографов. М., 1983. 15 с. Деп. в ВИНТИ 23.П.83, № 6203.
7. Соловьев С.Л. История и перспективы развития морской сейсмологии. М.: Наука, 1985. 152 с.
8. Жиляев И.И., Рыкунов Л.Н. Некоторые характеристики низкоскоростных магнитных записей колебательных процессов в диапазоне периодов 1–30 с // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1969. № 2. С. 71–74.
9. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: Мир, 1983. Т. 1. 598 с.

К ПРОБЛЕМЕ ИНФРАНИЗКОЧАСТОТНОГО СЕЙСМОГРАФА

В сейсмологии существует задача наблюдений сейсмических волн, охватывающих весь диапазон сейсмических частот. Условно можно принять за низкочастотную границу диапазона частоту вертикальных колебаний Земли, при которой делаются равными инерционные и гравитационные эффекты пробной массы сейсмометра [1]. Для телесейсмических событий диапазон частот составит примерно 0,0003–5 Гц. Одной из попыток продвинуться в наблюдениях колебаний грунта в сторону инфранизких частот было стремление создать длиннопериодный сейсмометр, используя для измерения часть его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), для которой чувствительность к смещениям грунта не зависит от частоты. Нижняя граница частотного диапазона определяется в этом случае периодом собственных колебаний механической системы сейсмометра. Единственным на практике такого рода сейсмографом является прибор СДШ [2], который работает непрерывно с 1973 г. в обсерватории Обнинск. Маятник сейсмометра настроен на механический период 60 с и продлен электронным способом с помощью отрицательной обратной связи (ОС) по ускорению движения инертной массы до 300 с. Этот путь развития сейсмометрии оказался тупиковым. Для этого заключения существуют две основные причины. Во-первых, в настоящее время не обнаружен способ существенного повышения периода сейсмометра. Достижение периода, равного 3600 с, принципиально невозможно. В лабораторных условиях путем кропотливых действий удавалось настроить сейсмометр типа СДШ на период 120 с. Во-вторых, сейсмометр с большим периодом собственных колебаний неустойчив: быстро уходит от среднего положения и не сохраняет величину периода собственных колебаний. Поэтому сейсмологи обратились к другим частям АЧХ сейсмометра: к участку с постоянной, не зависящей от частоты чувствительностью к скорости движения грунта сильно демпфированного маятника [3]; к участку с не зависящей от частоты чувствительностью к ускорению движения грунта [4–6]. Вариант демпфированного сейсмометра является промежуточным между длиннопериодным сейсмометром и акселерометром и не решает проблемы наблюдений всего спектра сейсмических колебаний. В этом смысле акселерометр представляется наиболее перспективным, и с его помощью получены наиболее впечатляющие результаты. Вышесказанное относится к механической системе сейсмометра, а не к АЧХ всего сейсмометрического канала, который может содержать любые фильтры, выделяющие в заданных частотных полосах смещение, скорость или ускорение грунта. Дифференциальное уравнение движения маятника сейсмометра, работающего в режиме акселерометра, предельно упрощается:

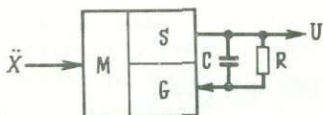
$$\omega_0^2 \theta = - (1/l) \ddot{X}, \quad (1)$$

где ω_0 – циклическая частота собственных колебаний и θ – угловая амплитуда колебаний инертной массы сейсмометра; l – приведенная длина маятника; X – смещение грунта. В уравнении X представлен в виде ускорения. Для электрического измерения угла θ в сейсмометр вводят параметрический преобразователь механического смещения маятника в электрическое напряжение U с крутизной преобразования (чувствительностью) S_T :

$$U = S_T \theta. \quad (2)$$

Сейсмометр становится электронным прибором, который вырабатывает напряжение

$$U = - (S_T/l\omega_0^2) \ddot{X}. \quad (3)$$



Функциональное изображение схемы акселерометра с глубокой отрицательной связью

Прибор имеет коэффициент или крутизну S преобразования ускорений грунта:

$$S = U/\ddot{X} = S_T/l\omega_0^2. \quad (4)$$

Знак преобразования не имеет существенного значения, так как в электронном устройстве выходное напряжение может быть выбрано любой удобной полярности. Формула (4) показывает, что чувствительность преобразования, кроме электронного усиления S_T , зависит также от собственной частоты механической системы. Чем меньше частота, тем больше чувствительность прибора, тем меньше требуемое усиление в сейсмометрическом канале. Так как существует естественное опасение увеличения шума в усилительном тракте, это соображение кажется достаточным аргументом для выбора решения в реализации инфранизкочастотного сейсмографа, в котором используется среднепериодный сейсмометр с периодом 15–20 с. В практике работы с таким прибором, как и в работе с длиннопериодным сейсмометром, сохраняется в определенной степени трудность в измерении, настройке и сохранении стабильного механического периода. В метрологическом отношении это очень важно, так как от его величины многократно зависит чувствительность прибора. Из формулы (4) получим относительное изменение чувствительности A_1 (ошибку) в зависимости от частоты ω_0 :

$$A_1 = \Delta S/\Delta\omega_0 = (2S_T/l)(1/\omega_0^3). \quad (5)$$

Можно было бы предложить частичное преодоление трудности в установке требуемого периода сейсмометра косвенным методом, при котором во время подготовки аппаратуры к наблюдениям у сейсмометра настраивается любой период в интервале между рабочим периодом и бесконечным, когда маятник не имеет устойчивого положения равновесия. В сейсмометр вводится плавно регулируемая ОС по смещению, под действием которой сейсмометр приобретает определенный период. От генератора в обмотку магнитоэлектрического преобразователя сейсмометра подается синусоидальный ток с периодом колебаний, заведомо большим периода сейсмометра. Ток определяется напряжением v и сопротивлением R . Регулировкой ОС добиваются, чтобы измеряемое выходное напряжение U было равно напряжению, рассчитанному по формуле

$$U = (S_T G/\omega_0^2 KR) v, \quad (6)$$

где G – генераторный коэффициент преобразования магнитоэлектрической системы; K – момент инерции маятника сейсмометра. При этом полученная чувствительность сейсмометра и его рабочий период соответствуют друг другу.

Однако радикальным решением проблемы улучшения метрологии и обеспечения максимальной простоты обращения с прибором является применение глубокой ОС по смещению. Схематическое изображение такого сейсмометра приведено на рисунке. Ускорение грунта \ddot{X} воздействует на инертную массу M , жестко связанную с параметрическим преобразователем S_T и с магнитоэлектрическим преобразователем G . ОС осуществлена включением резистора R между выходом напряжения U и обмоткой преобразователя G . Образована хорошо известная компенсационная схема измерения, обладающая высокой метрологией (линейность, стабильность, точность) [6]. Конденсатор C выполняет служебную задачу гашения свободных колебаний сейсмометра. Уравнение движения без учета действия конденсатора в области АЧХ акселерометра будет

$$\omega_0^2 \theta = (1/l)\ddot{X} - GU/KR. \quad (7)$$

Переходя от амплитуды угла к выходному напряжению, получим

$$U = \frac{S_T}{l(\omega_0^2 + (GS_T/KR))} \ddot{X}, \quad S_{o.c} = \frac{S_T}{l(\omega_0^2 + (GS_T/KR))}. \quad (8)$$

Действие ОС равносильно увеличению частоты собственных колебаний сейсмометра, которая при малой величине механической частоты становится во много раз больше. Для того чтобы начальная частота сейсмометра вообще не влияла на метрологические характеристики прибора, и в частности на коэффициент преобразования $S_{o.c.}$, она должна быть малой. Тогда величиной ω_0^2 по сравнению с величиной GS_T/KR можно пренебречь и крутизна преобразования прибора будет

$$S_{o.c.} = KR/Gl. \quad (9)$$

Чувствительность определяется очень стабильными элементами. Возникают новые возможности в практике работы с приборами, например можно приближенно установить в сейсмометре период собственных колебаний в пределах от порога устойчивости до собственного периода. И при этих условиях применение глубокой ОС эффективно обеспечит работоспособность и точность функционирования сейсмографа. По формуле (9) крутизна ошибки чувствительности в зависимости от величины ω_0 будет

$$A_2 = \frac{\Delta S_{o.c.}}{\Delta \omega_0} = \frac{2S_T}{l\omega_0^3} \frac{1}{\left(1 + \frac{GS_T}{\omega_0^2 KR}\right)^2}. \quad (10)$$

Сравнивая (5) и (10), получим, что относительная ошибка A_1 для сейсмометра без ОС в $(1 + GS_T/\omega_0^2 KR)^2$ раз больше относительной ошибки A_2 для сейсмометра с ОС. Формула (10) позволяет в каждом конкретном случае произвести оценку правильности выбора параметров и требований по установке сейсмометра.

Применение ОС по смещению приводит к снижению коэффициента преобразования S , которое необходимо компенсировать повышением усиления в сейсмометрическом канале, который не охвачен петлей ОС. В связи с этим возникает существенный вопрос об уровне инструментальных шумов. Успехи развития современной электроники операционных усилителей обеспечивают низкий уровень шумов в усилительном тракте и в низкочастотных фильтрах. Главный источник инструментального шума находится в системе исходных преобразователей — в механической части сейсмометра и в преобразователе механических перемещений в электрическое напряжение. Поэтому не будет большой ошибкой, если примем, что в канале усиления и фильтрации, не охваченном ОС сейсмометра, уровень шума меньше, чем в системе первичного преобразователя. Для любой системы уровень шума на выходе равен произведению уровня шума на входе на коэффициент преобразования:

$$U_n = S\ddot{X}_n.$$

Применение ОС, в обратной цепи которой отсутствуют источники шума, не влияет на уровень приведенного ко входу шума \ddot{X}_n , но, снижая коэффициент преобразования $S_{o.c.}$, уменьшает уровень шума на выходе системы. Повышение усиления в канале, компенсирующее снижение чувствительности преобразователя, приведет к подъему шума до уровня, который имел место в сейсмометрическом канале до применения ОС.

ВЫВОДЫ

Инфранизкочастотный сейсмограф, выполненный на основе широкополосного акселерометра с глубокой отрицательной обратной связью по смещению инертной массы, обладает очевидными преимуществами по сравнению с другими способами его реализации.

Преимущества проявляются в полной мере только в случае использования сейсмометра с низкой частотой собственных колебаний.

1. Рыков А.В. К проблеме наблюдений колебаний Земли // Аппаратура, методы и результаты сейсмометрических наблюдений. М.: Наука, 1979. С. 3–7. (Сейсмические приборы; Вып. 12).
2. Рыков А.В., Архангельский В.Т., Забелин М.В. и др. Длиннопериодная широкополосная сейсмо-станция СДШ // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1983. С. 28–33. (Сейсмические приборы; Вып. 15).
3. Willmore P.L. Some properties of heavily damped electromagnetic seismographs // Geophys. Journ. of Royal Astronom. Soc. 1961. N 4. P. 389–404.
4. Agnew D., Berger R., Buland R., Farrell W., et al. International deployment of accelerometers: a network for very long period seismology // Trans. Amer. Geophys. Union, 1976. Vol. 57, N 4. P. 180–188.
5. Peterson J., Orsini N. Seismic research observations: upgrading the worldwide seismic data network // Trans. Amer. Geophys. Union, 1976. Vol. 57, N 8. P. 1129–1134.
6. Wielandt E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1982. Vol. 72, N 6. P. 2349–2387.

УДК 550.34

И.В. Уломов

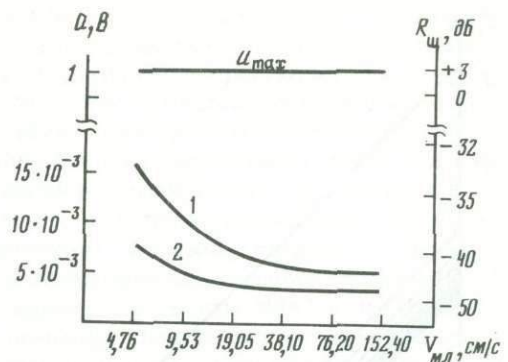
СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ РЕГИСТРАЦИИ СИЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

Быстро развивающаяся в последние годы сейсмология сильных движений предъявляет ряд требований к сейсмометрической аппаратуре. Таковыми, в частности, являются: возможность записи колебаний в ближней зоне при крупных сейсмических событиях; способность регистрировать афтершоковую деятельность, охватывающую диапазон амплитуд от микросейсм до близких к основному толчку; микроземлетрясения. При решении этих задач у исследователей возникает естественное желание наиболее полно использовать возможности имеющейся у них неспециализированной аппаратуры.

Рассмотрим сейсмометрические каналы с применением модернизированных пьезоакселерометров АПТ-1 [1] и доступных магнитографов типа Н067 (Н068). Эти магнитографы представляют собой многоканальные приборы (соответственно семи- и четырехнаддвухканальный), предназначенные для магнитной частотно-модуляционной записи – воспроизведения информации в аналоговой форме на 12,7 миллиметровую магнитную ленту. Имея широкий набор стандартных скоростей движения носителя, магнитографы позволяют вести запись электрических сигналов в широком частотном диапазоне (минимальная полоса регистрируемых частот составляет 0–625 Гц) и с этой точки зрения, безусловно, подходят для записи сейсмических колебаний в интересующем нас интервале частот 0,05–100 Гц. Динамические возможности ЧМ-каналов магнитографов ограничены сверху предельным входным сигналом U_{\max} , который может быть воспринят с допустимыми нелинейными искажениями. Снизу ограничения накладывают собственные шумы ЧМ-каналов, возникающие в основном из-за колебаний скорости записи – воспроизведения. В магнитографах предусмотрена возможность уменьшения при воспроизведении появляющихся при этом погрешностей с помощью двух режимов компенсации. Первый реализуется введением пилот-сигнала по одному из каналов при записи, который при воспроизведении влияет на скорость движения магнитной ленты. Второй режим использует критерий синфазности детонационных шумов, вводя их в противофазе со служебного канала в рабочие [2]. В этих случаях запись информации по соответствующему каналу исключается. Зависимость уровней собственных шумов ЧМ-каналов от скорости движения носителя показана на рис. 1. Из графика видно, что каналы магнитографов обеспечивают отношение сигнал/шум в 40 дБ в

Рис. 1. Собственные шумы ЧМ-каналов магнитографов Н067, Н068 (эффективные значения) при разных скоростях движения магнитной ленты ($V_{м.л.}$)

1 — без режима компенсации собственных шумов; 2 — с режимом компенсации



режиме компенсации и 33 дБ без нее на самой низкой скорости (4,76 см/с) и соответственно 46 и 43 дБ на самой высокой скорости (152,4 см/с) при максимальном входном сигнале $U_{max} = 1$ В. Учитывая требования по динамическому диапазону, предъявляемые к сейсмометрическим каналам регистрации сильных движений [3], можно сделать вывод о возможности применения магнитографов Н067 (Н068) в качестве оконечных устройств регистрации.

Выбор в качестве датчика АПТ-1М объясняется, с одной стороны, необходимостью получения оригинальных акселерограмм сильных движений с возможностью дальнейшего использования их в инженерных целях, с другой стороны, как имеющего стабильную жесткую механическую систему и обладающего практически идеальными частотными и фазовыми характеристиками в рассматриваемом интервале частот. Далее под АПТ-1М будем понимать собственно пьезопреобразователь датчика.

Сравнительная оценка пьезоэлектрических датчиков и современных усилителей с малым, приведенным ко входу уровнем собственных шумов и использующих полевые транзисторы во входных каскадах показывает, что при оптимальном согласовании датчика с усилителем нижнюю границу динамического диапазона в интересующей нас частотной полосе определяют собственные шумы пьезопреобразователей [4]. Среднеквадратичное напряжение шума для них может быть представлено [5] так:

$$U_{дш} = \left(\frac{kT}{C} \operatorname{tg} \delta \frac{2}{\pi} \int_{f_n}^{f_v} \frac{1}{f} df \right)^{1/2},$$

где k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; C — емкость пьезопреобразователя; $\operatorname{tg} \delta$ — угол диэлектрических потерь на выходе пьезопреобразователя; f_v, f_n — верхняя и нижняя частоты диапазона измерения; kT/C характеризует дисперсию шумового напряжения на емкости датчика. Для АПТ-1М с учетом температурного фактора и разброса параметров компонент $U_{дш}$ не превышает 0,3 мкВ. В дальнейшем полагаем, что суммарная величина шума АПТ-1М и приведенного ко входу шума усилителя $(U_{дш}^2 + U_{уш}^2)^{1/2} \approx 0,3$ мкВ.

Динамические возможности АПТ-1М представим в виде отношения сигнал/шум:

$$R_{ш} = 10 \lg \left(\frac{\ddot{X}_{дм}}{\ddot{X}_{дш}} \right)^2 - 3 \text{ дБ},$$

где $\ddot{X}_{дм}$ — максимальная амплитуда синусоидального ускорения, воспринимаемая с допустимыми нелинейными искажениями, $\ddot{X}_{дш}$ — эффективное шумовое ускорение корпуса датчика, определяемое $U_{дш}$ и его чувствительностью по ускорению S_d : $\ddot{X}_{дш} = U_{дш}/S_d$.

Как показывают исследования, конструкция АПТ-1М и используемые в ней пьезо-керамические материалы позволяют сохранять линейность амплитудной характеристики преобразователя в широком диапазоне ускорений, причем амплитуды, соответствующие верхней границе динамического диапазона датчиков, во много раз превышают

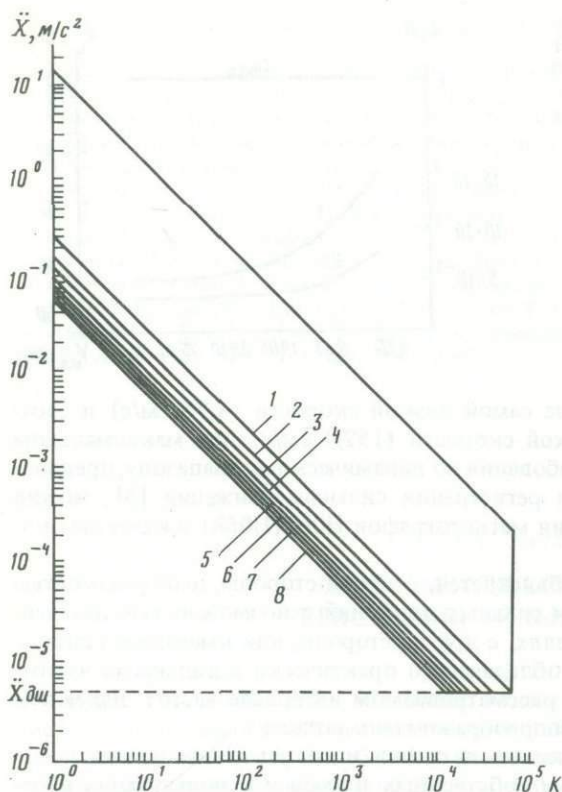


Рис. 2. Зависимость амплитуд ускорений, регистрируемых каналом на различных скоростях движения магнитной ленты
 1 — 4,76; 2 — 9,53; 3 — 19,05, 4,76 +;
 4 — 38,10; 5 — 76,20; 6 — 152,40, 9,53 +;
 7 — 19,05 +; 8 — 38,10 +, 76,20 +, 152,40 +
 ” + ” — режим компенсации собственных шумов

максимальные величины, регистрируемые в сейсмологии сильных движений. Ограничимся предельной амплитудой ускорения, равной $2g$, и оценим регистрационные возможности канала ”АПТ-1М—усилитель—магнитограф”.

При среднем значении чувствительности АПТ-1М $S_d = 60 \text{ мВ} \cdot \text{с}^2/\text{м}$ эффективное шумовое ускорение $X_{\text{дш}}$ составит около $5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}^2$. Соответственно $R_{\text{ш}} \approx 130 \text{ дБ}$. На рис. 2 изображена зависимость регистрируемых каналом ускорений от величины коэффициента усиления при разных скоростях и режимах работы магнитографов. Диапазон регистрируемых каналом ускорений ограничен сверху предельным амплитудным значением, воспринимаемым АПТ-1М при заданном K :

$$\ddot{X}_{\text{max}} = U_M / (S_d K).$$

Снизу диапазон ограничен прямыми, характеризующими эффективные значения собственных шумов ЧМ-каналов магнитографов:

$$\ddot{X}_{\text{min}} = U_{\text{мши}} / (S_d K),$$

где $U_{\text{мши}}$ — значение собственных шумов при скорости движения магнитной ленты i . Нижняя граница рассчитана, исходя из равенства $U_{\text{дш}} K = U_{\text{мши}}$. При этом величина K , необходимая для усиления минимальных регистрируемых АПТ-1М ускорений, составит

$$K_{\text{max}} = U_{\text{мши}} / (S_d \ddot{X}_{\text{дш}}).$$

Очевидно, что для регистрации минимальных ускорений для полного использования динамического диапазона каналов значение K следует брать не более K_{max} (на соответствующей скорости), так как при дальнейшем усилении шумов АПТ-1М будут преобладать над шумами ЧМ-каналов магнитографов. Таким образом, изменяя чувствительность полного канала посредством K , можно смещать диапазон регистрируемых ускорений в область больших или меньших значений. Кроме того, регистрируя на двух уровнях чувствительности, можно записывать сигналы с расширенным динамическим диапазоном.

При использовании Н067(Н068) в режиме непрерывной регистрации возникает проблема выбора скорости записи в смысле промежутка времени между сменой лент. При низкой повторяемости естественных сейсмических событий и длительных наблюдениях целесообразнее вести запись на минимальной скорости. При этом время записи на одной стандартной катушке с лентой длиной 1000 м составляет около 6 ч. Уменьшение скорости движения носителя с целью увеличения времени регистрации путем

доработки электрической и механической схем прибора неэффективно, так как приводит к невозможности применения режима компенсации шумов в связи со специфической схемотехнической схемой устройства. В результате происходит чрезмерное возрастание уровня собственных шумов ЧМ-каналов и соответственно снижение отношения сигнал/шум до ≈ 27 дБ. Очевидно, что такие характеристики не удовлетворяют требованиям по регистрации сильных движений. Выходом из ситуации может явиться введение ждущего режима с использованием промежуточной памяти, например твердотельной [6]. При этом в процессе записи могут использоваться высокие скорости движения носителя для увеличения динамического диапазона каналов. Возможно применение методов обработки сигнала с логарифмическим преобразованием [7].

При организации сейсмометрических наблюдений с помощью Н067 и записи временных сигналов по отдельному каналу магнитографа следует учесть, что в этом случае при регистрации на двух уровнях чувствительности (или с двух трехкомпонентных установок) из-за отсутствия свободных каналов нельзя ввести режим компенсации шумов в магнитографе. Запись на минимальной скорости при этом желательно не производить либо подмешивать импульсы временной информации к одному из рабочих каналов.

При использовании в качестве регистратора магнитографа Н086 14-канального устройства аналоговой магнитной записи трудностей не возникает. Каналы прибора имеют нормированное отношение сигнал/шум не хуже 45 дБ с режимом компенсации шумов и 40 дБ без него. Низкие скорости движения ленты (2,38–0,38 мм/с) обеспечивают продолжительность записи на километровой бобине ленты от пяти суток до одного месяца, что позволяет вести долгосрочные наблюдения. При этом необходимо учитывать рабочий диапазон частот магнитографа, составляющий 0–30 Гц на верхней скорости движения ленты и сужающийся до 0–5 Гц на нижней.

ВЫВОДЫ

1. Организация долгосрочной сейсмометрической службы с применением магнитографов Н067 (Н068) в принципе возможна, но затруднена необходимостью частой смены лент. Схемотехническая доработка приборов на меньшую скорость движения ленты неэффективна, так как при этом резко ухудшаются характеристики ЧМ-каналов магнитографов.

2. Оптимальный вариант построения сейсмометрических каналов с применением Н067 (Н068) — организация ждущего режима с использованием промежуточной памяти, например твердотельной, и высоких скоростей движения магнитной ленты.

3. Возможно применение в качестве оконечного регистратора "медленного" магнитографа аналоговой записи Н086. Воспроизведение информации в этом случае осуществляется на магнитографе Н068.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенберг И.М., Фремд В.М., Цыганов В.М. Модернизированные трехкомпонентные пьезосейсмометры для экспериментов на шельфе // Исследования по сейсмометрии, М.: Наука, 1988, С. 10–15. (Сейсмические приборы; Вып. 20).
2. Гитлиц М.В. Магнитная запись сигналов, М.: Радио и связь, 1981, 160 с.
3. Фремд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений, М.: Наука, 1978, 176 с.
4. Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Унифицированный измерительный сейсмопреобразователь // Измерения в гидроаэродинамике и геофизической акустике, М.: ВНИИФТРИ, 1984, С. 96–106.
5. Гросул А.Б., Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Тепловые шумы пьезокерамических преобразователей элементов в диапазоне частот 0,5–1000 Гц // Тез. докл. II Всесоюз. конф. "Получение и применение сегнето- и пьезокерамических материалов", М., 1984, Ч. I, С. 48.
6. Фридман А.А. О согласовании твердотельного блока памяти с ЧМ-магнитографом // Приборы и методы регистрации землетрясений, М.: Наука, 1987, С. 160–165. (Сейсмические приборы; Вып. 19).
7. Дозоров Т.А. Канал обработки сигнала для донной сейсмической станции с логарифмическим преобразованием // Сейсмометры, регистраторы и сейсмометрические каналы, М.: Наука, 1986, С. 34–41. (Сейсмические приборы; Вып. 18).

Г.В. Дубровина, В.М. Фремд

РЕГИСТРАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ТОНКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ СРЕДЫ

Разрешающая способность методов решения обратных задач в сейсмологии и сейсморазведке существенно зависит от параметров используемой аппаратуры. Здесь играют роль как принципиальные границы возможностей каналов (частотный и динамический диапазоны), так и точность калибровки приборов.

Особенно необходимым становится учет регистрационных возможностей аппаратуры при изучении тонких особенностей среды, когда сигналы лежат вблизи порога чувствительности сейсмографа.

Тонкие особенности среды можно разделить на физические (анизотропия, нелинейность) и структурные (тонкая слоистость, горизонтальная неоднородность). Изучение таких особенностей в каждом конкретном случае предъявляет определенные требования к приборам.

Оценим эти требования на примере задачи поиска структурной горизонтальной неоднородности границы фундамента земной коры. Неоднородность границы может проявляться как неоднородность либо величин граничной скорости, либо величин коэффициента поглощения вдоль границы. Изучению горизонтальной неоднородности границ по граничным скоростям посвящены, например, работы [1, 2], в которых используется метод интервальных граничных скоростей [3].

Новые возможности для определения горизонтальных неоднородностей среды открывает использование динамических характеристик преломленных волн [4]. Рассмотрим влияние изменения скоростей преломленных волн и коэффициентов поглощения вдоль границы на ход амплитудных кривых и оценим, какие минимальные различия в граничных скоростях и коэффициентах поглощения можно выявить по амплитудным кривым для аппаратуры с заданной точностью (заданным динамическим диапазоном).

Динамический диапазон, трактуемый, например, как отношение максимального и минимального регистрируемых сигналов, — один из важнейших параметров сейсмометрического канала. При этом величина, обратная динамическому диапазону, которую можно выразить в процентах, очевидно, определит минимальные относительные изменения амплитуды регистрируемого сигнала, которые могут быть выявлены с помощью этого канала. Эта величина, по существу, представляет собой максимальную достижимую точность канала. Это означает, что аппаратура с аналоговой записью, имеющая динамический диапазон 40 дБ, в принципе позволяет обнаружить изменения амплитуды регистрируемого сигнала на 1%.

Фактически при работе с реальными сейсмометрическими каналами необходимо учитывать точность их динамической (амплитудной) калибровки. К сожалению, эта точность обычно не превышает 10–15% [5].

В СТ СЭВ 993–78 [6] точность задания коэффициентов преобразования разведочных сейсμοприемников нормируется величиной $\pm 10\%$. С учетом того факта, что сплошная динамическая калибровка сейсмометрических каналов разведочных станций в настоящее время не производится, указанная точность задания коэффициентов преобразования сейсμοприемников и определяет точность относительных измерений амплитуд колебаний грунта на профиле, в том числе при изучении горизонтальных неоднородностей.

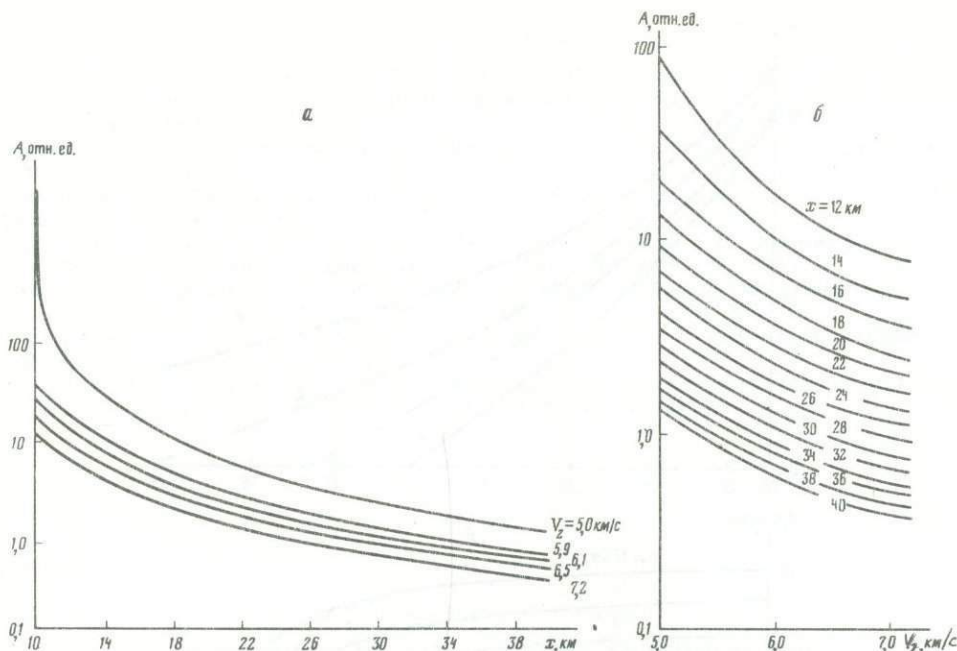


Рис. 1. Зависимости амплитуды преломленных волн на поверхности от расстояния (а) и скорости в нижней среде (б) при постоянной скорости в верхней среде и отсутствии поглощения

Таким образом, как для аналоговых, так и для цифровых сейсмометрических каналов точность, с которой на основе динамических измерений могут определяться горизонтальные неоднородности, реально не превышает 20%. Оценим, какие величины горизонтальных неоднородностей по граничным скоростям и коэффициентам поглощения могут быть при этом надежно выделены на основе амплитудных кривых.

В работе [7] приведена асимптотическая формула для амплитуды преломленной (головной) волны

$$A = \frac{p T \exp[-x_n(\alpha_1/p - \alpha_2)] \exp(-\alpha_2 x)}{\pi m (1 - p^2) x^2 (1 - x_n/x)^{3/2}},$$

где $p = v_1/v_2$ — отношение скоростей в средах выше и ниже преломляющей границы, $v_2 > v_1$; T — период колебаний; $m = \rho_2/\rho_1$ — отношение плотностей нижней и верхней сред; $x_n = 2Hp/\sqrt{1 - p^2}$ — абсцисса начальной точки преломленной волны; H — глубина преломляющей границы; x — расстояние от пункта взрыва; α_1 и α_2 — коэффициенты поглощения в верхней и нижней средах.

Рассмотрим случай непоглощающих сред ($\alpha_1 = \alpha_2 = 0$). Скорость в верхней среде примем постоянной ($v_1 = 3,8$ км/с) и оценим влияние скорости v_2 на амплитуду преломленных волн. На рис. 1, а приведена зависимость амплитуды от расстояния для переменной скорости во второй среде. На рис. 1, б показана построенная на основе рис. 1, а зависимость $A(v_2)$.

Теперь будем считать обе скорости и коэффициент поглощения в верхней среде постоянными ($v_1 = 3,8$ км/с, $v_2 = 6,5$ км/с, $\alpha_1 = 7 \cdot 10^{-3}$ м⁻¹). Рассмотрим зависимость амплитуды от расстояния для переменного коэффициента поглощения в нижней среде (рис. 2, а) и построенную на ее основе зависимость $A(\alpha_2)$, представленную на рис. 2, б.

Как видно из рис. 1, б, изменения амплитуд преломленной волны на поверхности порядка 10–20%, поддающиеся уверенному измерению в соответствии с реальной

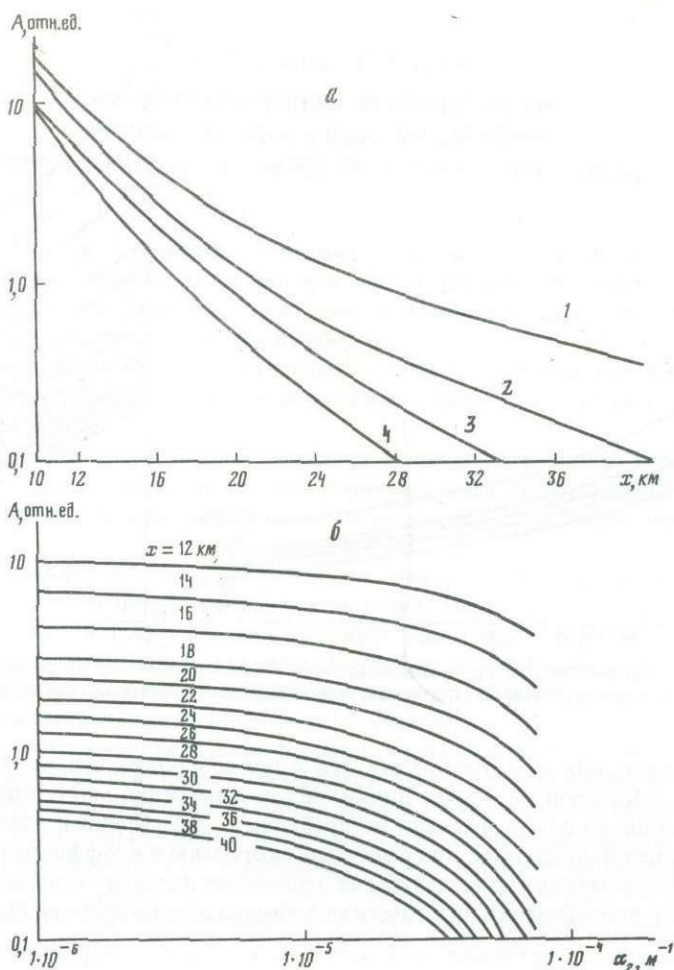


Рис. 2. Зависимости амплитуды преломленных волн на поверхности от расстояния (а) и коэффициента поглощения в нижней среде (б)
 1 — $7 \cdot 10^{-6}$; 2 — $3,5 \cdot 10^{-5}$; 3 — $5,6 \cdot 10^{-5}$; 4 — $8 \cdot 10^{-5}$

точностью сейсмометрических каналов, соответствуют малым горизонтальным неоднородностям границы по скорости, составляющим около 0,05–0,1 км/с.

Такого же порядка изменения амплитуд вызываются и малыми горизонтальными неоднородностями границы по коэффициентам поглощения — $(0,1-0,2) \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ (см. рис. 2, б).

Дальнейшее повышение детальности измеряемых по амплитудным кривым горизонтальных неоднородностей до пределов, определяемых динамическим диапазоном используемых сейсмометрических каналов, очевидно, может быть достигнуто в первую очередь за счет увеличения точности динамической калибровки сейсмометрических каналов.

Таким образом, динамические регистрационные возможности метода решения конкретной обратной задачи сейсмологии или сейсморазведки можно оценить на основе зависимостей между определяемыми величинами и исходными динамическими параметрами колебаний с учетом известной реальной точности используемых сейсмометрических каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Епинатьева А.М., Александрова Т.В., Баюк Е.И.* и др. Прогноз вещественного состава кристаллического фундамента по величине граничной скорости сейсмических волн // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1980, № 5, С. 42–55.
2. *Епинатьева А.М.* Горизонтальная неоднородность некоторых границ в земной коре // Там же. 1986, № 6, С. 49–54.
3. *Епинатьева А.М., Невский М.В.* Граничная скорость. Киев.: Наук. думка, 1975, С. 3–14. (Геофизический сборник; Вып. 65.)
4. *Берзон И.С., Епинатьева А.М., Парийская Г.Н., Стародубровская С.П.* Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М.: Изд-во АН СССР, 1962, 511 с.
5. *Троцкий П.А., Фрейд В.М.* Способ текущей импульсной калибровки сейсмографов // Сейсмические приборы; Вып. 8, М.: Наука, 1975, С. 99–103.
6. Сейсмоприемники электродинамические. Основные параметры и требования. Стандарт СЭВ 993–78, М.: Изд-во стандартов, 1978, 6 с.
7. *Епинатьева А.М.* Изучение продольных сейсмических волн, распространяющихся в некоторых реальных слоистых средах // Тр. ИФЗ АН СССР. 1960, № 14 (181), 262 с.

УДК 550.34

Н.В. Трифонов, В.А. Чистяков

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕЙСМОМЕТРОВ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

Ситуация, сложившаяся в настоящее время в сейсмометрии, такова, что существует большое число сейсмометров самых различных конструкций, решающих в каждом случае частные задачи. Во всем этом обилии приборов можно выделить тем не менее два основных варианта конструкторских решений, примерами которых могут служить сейсмометры СМ-3 и С5-С. Основным отличием сейсмометра С5-С в сравнении с СМ-3 является расширенный в низкочастотную область диапазон рабочих частот, что достигнуто увеличением периода собственных колебаний маятника сейсмометра за счет установки противовеса. Добиться увеличения периода собственных колебаний маятника можно и путем введения электрических обратных связей [1, 2].

Сопоставим возможности изменения параметров маятников сейсмометров путем внесения изменений в конструкцию и путем введения обратных связей.

В простейшем случае без учета сил трения и других потерь, существующих в механической системе, а также при идеальном упругом подвесе, можно считать, что на маятник сейсмоприемника, имеющего конструкцию, подобную СМ-3, действуют две силы — сила инерции и восстанавливающая сила. Тогда дифференциальное уравнение движения маятника может быть записано следующим образом:

$$Y\ddot{\varphi} + k\varphi = 0, \quad (1)$$

где Y — момент инерции маятника относительно его оси вращения; k — угловая жесткость упругого подвеса; φ — угол поворота маятника относительно положения равновесия. Откуда частота собственных колебаний маятника $\omega_0 = \sqrt{k/Y}$, а статический коэффициент преобразования момента, действующего на маятник, в угол его поворота определяется величиной k .

При введении обратной связи появляется еще одна сила, действующая на маятник. Уравнение движения маятника при введении положительной обратной связи по его углу

поворота приобретет вид

$$Y\dot{\varphi} + k\varphi = B\varphi \quad \text{или} \quad Y\ddot{\varphi} + (k - B)\varphi = 0, \quad (2)$$

где B — параметр, характеризующий глубину обратной связи. Частота собственных колебаний маятника с обратной связью

$$\omega_1 = \sqrt{(k - B)/Y},$$

и новое значение угловой жесткости определяется разностью k и B .

При введении отрицательной обратной связи по угловому ускорению уравнение движения запишется следующим образом:

$$Y\ddot{\varphi} + k\varphi = -C\ddot{\varphi}, \quad (3)$$

где C — параметр, характеризующий глубину обратной связи. Частота собственных колебаний маятника в этом случае получается равной

$$\omega_2 = \sqrt{k/(Y + C)},$$

а статическая угловая жесткость не изменяется.

Уравнение движения маятника, аналогичного по конструкции сейсмометру С5-С, с принятыми выше упрощениями может быть записано следующим образом:

$$Y\ddot{\varphi} + k\varphi = -Y_1\ddot{\varphi}, \quad (4)$$

где Y — момент инерции массы маятника, находящейся с одной стороны от оси вращения, а Y_1 — момент инерции противовеса, расположенного на другой стороне относительно оси вращения.

Из приведенных соотношений нетрудно видеть, что уменьшение частоты собственных колебаний маятника при введении положительной обратной связи по углу вызвано уменьшением эквивалентной жесткости, а при введении отрицательной обратной связи по ускорению — эффектом, равноценным увеличению момента инерции маятника.

Сравнение (1) и (2) показывает, что маятник с положительной обратной связью ведет себя аналогично маятнику без обратной связи, жесткость упругого подвеса которого уменьшена каким-либо конструктивным образом, например за счет уменьшения толщины плоских пружин, образующих его ось вращения, если говорить о сейсмометре СМ-3. При этом заметим, что с помощью обратной связи возможно получение таких параметров, достижение которых путем изменения конструкции неосуществимо вследствие технологических трудностей или из соображений прочности. Такой же результат — уменьшение действующей жесткости подвеса и увеличение периода собственных колебаний маятника — достигается при использовании астазирования. Побочным следствием глубокого астазирования является усиление нелинейных эффектов, выражающееся, например, в зависимости периода собственных колебаний маятника от его положения равновесия и приводящее в конечном итоге к потере положения равновесия — отсутствию устойчивости [3].

Все свойства астазированного маятника: повышение коэффициента передачи, сужение полосы пропускания, проявление нелинейности — совпадают с общеизвестными свойствами, присущими устройствам с положительной обратной связью.

Сказанное позволяет рассматривать астазированный маятник как устройство с положительной обратной связью, реализованное внутри механической колебательной системы.

Остается только восхищаться совершенством механических систем, способных надежно работать с коэффициентом астазирования порядка 10–20. Например, настроив маятник сейсмоприемника СКД на период 10 с, получим коэффициент астазирования, равный 12. Следовательно, чувствительность маятника к действующим на него силам возрастает в 144 раза. То есть известное выражение для коэффициента передачи

устройства с обратной связью

$$W_3 = W_p / (1 - W_p \beta),$$

где W_3 — коэффициент передачи системы с замкнутой петлей обратной связи (астазированный маятник); W_p — коэффициент передачи системы с разомкнутой петлей обратной связи (маятник без астазирования); β — коэффициент обратной связи, после подстановки значения петлевого коэффициента $W_p \beta$, обеспечивающего рост коэффициента преобразования в 144 раза, примет вид

$$W_3 = W_p / (1 - 0,994).$$

Из полученного результата нетрудно увидеть, сколь сильно проявляется нестабильность параметров цепей прямой W_p и обратной связи β в сильно астазированном маятнике. Надо подчеркнуть, что коэффициент преобразования силы, действующей на маятник, в его смещение относительно основания при астазировании возрастает в полосе частот от 0 до нового значения частоты собственных колебаний. И хотя частотный спектр дестабилизирующих воздействий, таких, как изменение температуры окружающей среды, влажности, барометрического давления, старение элементов конструкции, часто лежит вне пределов полосы пропускания сейсмометрического канала, воздействия эти проявляются в нестабильности формы амплитудно-частотной характеристики сейсмометрического канала, в "заваливании" маятника при сильных возмущениях. Последнее, в свою очередь, приводит к необходимости эксплуатировать приборы в особых условиях (штольнях, шахтах и т.п.).

Сравнение (3) и (4) показывает, что уравнения различаются лишь определениями коэффициентов C и Y_1 , стоящих перед $\dot{\varphi}$ в правой части. Первый коэффициент определяется параметрами цепи обратной связи, а второй — конструкцией маятника. При $C = Y_1$ маятник с обратной связью по ускорению ведет себя аналогично маятнику, масса которого состоит из двух частей, установленных по разные стороны от оси вращения.

Как следует из изложенного выше, введение обратной связи является универсальным путем, обеспечивающим возможность реализации разнообразных требований к сейсмометрам. Таким образом, для решения самых разных задач может применяться сейсмометр единственного конструктивного исполнения, маятник которого охватывается цепью электрической обратной связи с параметрами, обеспечивающими выполнение заданных в данном случае требований.

Реализация любого устройства с обратной связью обязательно приводит к необходимости рассмотрения вопросов обеспечения устойчивости. Практика работы с реальными сейсмоприемниками показывает, что едва ли не важнейшую роль в обеспечении устойчивости играют паразитные резонансы элементов конструкции и узлов прибора, а также существование дополнительных степеней свободы у реального маятника.

Рассмотрим силы, действующие на маятник сейсмоприемника типа СМ-3, охваченного петлей отрицательной обратной связи, считая, что преобразование электрического сигнала обратной связи в силу осуществляется с помощью одной из имеющихся катушек, а потери и трение отсутствуют. На маятник действуют три силы: сила инерции, приложенная к центру масс, восстанавливающая сила, приложенная в точке крепления упругого элемента, и сила, вызванная действием обратной связи, приложенная к катушке, связанной с маятником с помощью кронштейна. При глубокой обратной связи момент, создаваемый восстанавливающей силой, намного меньше момента, вызванного воздействием обратной связи. Из сказанного видно, что между центром масс и концом кронштейна действуют противоположно направленные силы, стремящиеся прогнуть кронштейн. Ввиду конечной жесткости кронштейна маятник можно рассматривать как двухмассовую систему с упругой связью, как показано на рис. 1.

Дифференциальные уравнения вынужденных колебаний такой системы при возбуждении внешней силой, соответствующей подаче сигнала в катушку сейсмометра, запишутся

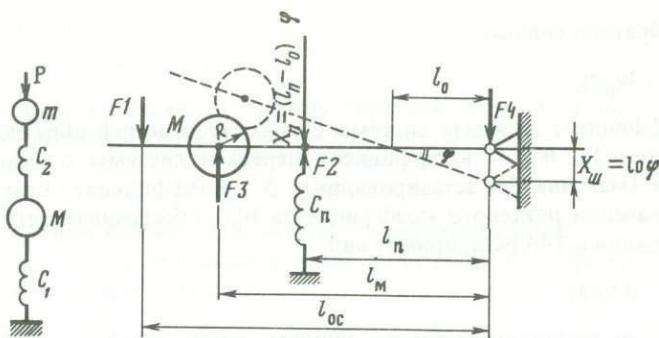


Рис. 1. Двухмассовая модель маятника с изгибающимся кронштейном

Рис. 2. Силы, действующие на маятник сейсмометра

следующим образом:

$$\begin{aligned} M \ddot{x}_1 + c_1 x_1 - C_2 (x_2 - x_1) &= 0, \\ m \ddot{x}_2 + C_2 (x_2 - x_1) &= P \sin \omega t, \end{aligned} \quad (5)$$

где x_1 и x_2 — смещение центров масс маятника и катушки от положения равновесия; M — масса маятника; m — масса катушки; C_1 — жесткость подвеса маятника; C_2 — жесткость кронштейна; P — амплитуда возбуждающей силы.

Решив систему, можно получить связь между x_1 и x_2 и найти таким образом передаточную функцию двухмассовой системы от смещения конца кронштейна к смещению центра масс маятника:

$$x_1/x_2 = C_2/(C_1 + C_2 - M\omega^2).$$

Так как жесткость кронштейна C_2 во много раз превосходит жесткость упругого подвеса C_1 , частота возникающего паразитного резонанса, как видно из полученного результата, определяется массой маятника M и жесткостью кронштейна C_2 . На частотах, лежащих выше резонансной частоты, центр масс маятника и конец кронштейна с закрепленной на нем катушкой начинают двигаться противофазно. Ввиду того что потери в изгибающемся кронштейне малы, добротность возникшего паразитного колебательного звена оказывается высокой (порядка 30–100). Если глубина обратной связи окажется достаточно большой, это обязательно приведет к появлению автоколебаний в системе с обратной связью на частоте паразитного резонанса.

Ранее мы исходили из предположения, что подвес маятника идеален, т.е. шарнир, образующий ось вращения маятника, не вносит потерь и не дает возможности оси перемещаться под воздействием приложенных к ней сил. Реальные шарниры не обладают такими свойствами. Поэтому сила, приложенная к шарниру со стороны маятника, приводит к смещению оси вращения маятника от положения равновесия.

Рассмотрим движение маятника сейсмоприемника СМ-3 под воздействием силы, вызванной протеканием тока через катушку (рис. 2). В этом случае на маятник действуют четыре силы. Первая приложена к концу кронштейна, на котором закреплена катушка. Вторая, создающая восстанавливающий момент, — к точке крепления пружины, третья (сила инерции) приложена к центру масс. И наконец, четвертая сила скомпенсирована упругой деформацией шарнира, образующего ось вращения маятника. При этом жесткость шарнира в направлении, совпадающем с горизонтально расположенной осью симметрии маятника, считаем бесконечно большой, потерями и трением в рассматриваемой системе пренебрегаем, массу маятника считаем распределенной по окружности радиуса R , а угол поворота маятника ограничиваем значениями, при которых можно считать $\sin \varphi = \varphi$.

Дифференциальные уравнения движения маятника запишутся следующим образом:

$$F_1 + C_{ш} \varphi l_0 = C_{п} \varphi (l_{п} - l_0) + \ddot{\varphi} M (l_{м} - l_0),$$

$$F_1 (l_{0.c} - l_0) - C_{ш} \varphi l_0^2 = C_{п} \varphi (l_{п} - l_0)^2 + M [(l_{м} - l_0)^2 + R^2] \ddot{\varphi},$$

где F_1 — возбуждающая сила; $C_{ш}$ и $C_{п}$ — линейные жесткости шарнира и упругого подвеса; φ — угол поворота маятника; M — масса маятника; l_0 — смещение оси вращения маятника от оси шарнира; $l_{п}$, $l_{м}$, $l_{0.c}$ — расстояния от оси шарнира до точки крепления упругого подвеса, центра масс и точки приложения возбуждающей силы соответственно.

Решив систему представленных уравнений, можно получить

$$\varphi = \frac{F}{C_{п} l_{п} - M \omega^2 l_{м} - l_0 (C_{п} - M \omega^2 + C_{ш})},$$

$$l_0 = \frac{l_{п} C_{п} (l_{0.c} - l_{п}) + M \omega^2 (l_{м}^2 + R^2)}{C_{п} (l_{0.c} - l_{п}) + C_{ш} l_{0.c} - M \omega^2 (l_{0.c} - l_{м})},$$

где ω — круговая частота возбуждающей силы. Исследовав зависимость φ от ω , можно найти частоты, для которых $\varphi \rightarrow \infty$, т.е. определить резонансные частоты. Приближенное решение при $C_{ш} \gg C_{п}$ дает два значения резонансных частот:

$$\omega_3 \approx \sqrt{\frac{C_{п} l_{п}}{M l_{м}}} \quad \text{и} \quad \omega_4 \approx \sqrt{\frac{C_{ш} (l_{м} l_{0.c} + R^2 + l_{м}^2)}{M (l_{м} l_{0.c} + R^2)}}.$$

Можно видеть, что ω_3 определяет собственную частоту колебаний маятника вокруг оси, проходящей через центр шарнира, а ω_4 — частоту собственных колебаний маятника вокруг оси, проходящей через центр масс.

Из изложенного видно, что при воздействии на маятник сейсмометра СМ-3 силой, вызванной протеканием тока через катушку, возбуждаются одновременно колебания нескольких типов. Возникают колебания вокруг оси вращения маятника, имитирующие его реакцию на движение почвы при косвенном способе калибровки. Возникают паразитные угловые колебания вокруг центра масс маятника и паразитные колебания центра масс, вызванные конечной жесткостью кронштейна, крепящего катушку. Таким образом, результаты измерения амплитудно-частотной характеристики сейсмометра СМ-3, не охваченного обратными связями, полученные косвенным генераторным методом, будут отличаться от результатов, полученных путем прямых измерений, ввиду различия сил, действующих непосредственно на маятник, и точек приложения этих сил. Т.е. в каждой конкретной конструкции сейсмометра необходимо проведение исследований, определяющих границы диапазона частот прибора, в которых косвенные методы измерений обеспечивают получение достоверных результатов.

Полученные результаты позволяют предложить пути изменения конструкции маятника сейсмометра, при которых отмечавшиеся трудности преодолеваются частично или полностью. Простейшее решение очевидно — необходимо повысить жесткость кронштейна и шарнира, что повысит частоты паразитных резонансов и отдалит их от рабочей области частот, с целью уменьшения добротности резонансов ввести в их конструкцию элементы, обеспечивающие демпфирование колебаний.

Другой путь — совместить точки приложения действующих сил, т.е. совместить центр масс маятника с точкой приложения силы, вызванной протеканием тока в катушке калибровки или обратной связи маятника. При этом устраняется момент, вращающий вокруг центра масс маятник, исчезает сила реакции со стороны шарнира, образующего ось вращения маятника, т.е. перестают возбуждаться паразитные колебания другой степени свободы. Желаемый результат может быть достигнут, в частности, за счет использования в качестве основной части массы маятника магнитной системы электродинамического преобразователя. Такое решение, кроме того, позволяет уменьшить габариты и

вес маятника, а также исключает необходимость в гибких токоподводах, связывающих катушки электродинамического преобразователя с электронными блоками сейсмометра.

Маятник сейсмометра, как правило, устанавливают на основание, которое, в свою очередь, через опоры связано с колеблющимся объектом. При этом на основание со стороны маятника, охваченного глубокой обратной связью, воздействует по крайней мере одна сила, приложенная в точке установки электродинамического преобразователя. В случае, когда эта сила оказывается приложенной между опорами, появляются изгибные колебания основания. Так как преобразователь перемещения измеряет относительные колебания маятника и основания сейсмометра, это приводит к появлению на его выходе сигнала, вызванного суммой двух колебаний — колебания объекта и колебания основания сейсмометра. Последнее вызывает зависимость силы, действующей на основание, от колебаний основания, т.е. петля обратной связи замыкается через основание. Если собственная частота основания с установленным на нем маятником окажется близкой к верхней границе полосы частот, в которой действует обратная связь, в системе могут возникнуть автоколебания на резонансной частоте основания. Данный случай аналогичен рассмотренному примеру образования двухмассовой колебательной системы при конечной жесткости кронштейна. Здесь дополнительное колебательное звено образуется за счет конечной жесткости основания сейсмометра и массы этого основания с установленными на нем деталями. Одним из путей достижения устойчивости является повышение частоты собственных колебаний основания за счет повышения его жесткости. Другой путь — установка опоры в точке приложения силы, действующей на основание со стороны маятника. Этим исключается его влияние на устойчивость сейсмометра с обратной связью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Киринос, В.М. Фреда, М.: Наука, 1974. 244 с.
2. Чистяков В.А., Рыбкин И.С. О построении наклономеров с электрическими обратными связями // Инструментальное изучение сейсмических колебаний. М.: Наука, 1983. С. 110–114. (Сейсмические приборы; Вып. 16).
3. Шнирман Г.Л. Астазирование маятников, М.: Наука, 1982. 166 с.

III. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТУРЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

УДК 550.34

В.М. Грайзер, А.А. Рожной, М.С. Соловьева

О ВОССТАНОВЛЕНИИ СМЕЩЕНИЙ ПО ЗАПИСЯМ ПРИБОРОВ С МАГНИТНОЙ И ЦИФРОВОЙ РЕГИСТРАЦИЕЙ И ВЫБОРЕ УРАВНЕНИЯ СИСТЕМЫ

В практике сейсмологических наблюдений наряду с получившими широкое распространение сейсмическими приборами с прямой и гальванометрической регистрацией стали появляться сейсмографы с магнитной и цифровой записью [1–3]. Теория прямой и гальванометрической регистрации хорошо изучена и рассмотрена, например, в руководстве [4]. С цифровой и магнитной регистрацией дело обстоит иначе.

Цифровые и магнитные сейсмографы, как и любые другие, имеют ограниченную полосу пропускания, за пределами которой наблюдаются искажения входного сигнала. Одно из достоинств подобных схем записи заключается в том, что соотношение сигнал–помеха (динамический диапазон) в них выше, чем для прямой и гальванометрической систем. Поэтому, так же как и при других способах регистрации, возникает задача восстановления сигнала на входе по отклику прибора.

Целью настоящей работы является обсуждение уравнений, удовлетворительно описывающих связь между смещением на входе и откликом магнитного или цифрового сейсмографа, а также метода восстановления смещений и возможностей экспериментального подбора уравнения сейсмографа.

Уравнение колебаний. Как известно, угол отклонения маятника от положения равновесия $\theta(t)$ и смещение $x(t)$ на входе регистрирующей системы связаны следующим уравнением:

$$\dot{\theta} + 2\omega_S D_S \dot{\theta} + \omega_S^2 \theta = -V\ddot{x}, \quad (1)$$

где ω_S — круговая частота собственных колебаний; D_S — затухание; V — увеличение маятника. Ток на выходе сейсмографа пропорционален скорости изменения угла отклонения маятника. Далее сигнал, как правило, усиливается. Причем обычно используются усилители, имеющие столбообразный участок кривой увеличения в диапазоне частот от нуля до нескольких килогерц. Иначе говоря, можно считать, что усилитель увеличивает амплитуду регистрируемого сигнала, не меняя его формы и не внося фазовых искажений. Усиленный сигнал записывается на магнитофон. В такой измерительной системе запись на магнитной ленте пропорциональна производной угла отклонения маятника сейсмометра $y = k\dot{\theta}$.

Таким образом, приходим к системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} + 2\omega_S D_S \dot{\theta} + \omega_S^2 \theta &= -V\ddot{x}, \\ y &= k\dot{\theta} \end{aligned} \quad (2)$$

или к одному уравнению

$$\ddot{y} + 2\omega_S D_S \dot{y} + \omega_S^2 y = -V_0 \ddot{x}, \quad (3)$$

где $V_0 = kV$.

Дифференциальное уравнение (3) внешне близко к уравнению прямой регистрации (1). Отличие заключается в том, что в правой части стоит третья производная от смещения почвы. Уравнение (3) описывает колебания системы, включающей сейсмометр магнитоэлектрического типа, идеальный усилитель и магнитофон, и является, по-видимому, простейшим уравнением сейсмографа с магнитной или цифровой записью.

Хорошо известно, что сейсмограф с прямой регистрацией может работать в трех режимах — акселерографа, велосиграфа или сейсмографа [4]. По аналогии с прямой регистрацией нетрудно показать, что система, описываемая дифференциальным уравнением (3), может работать также в трех режимах:

1) $y = (V_0/\omega_S^2)\ddot{x}$, $D_S < 1$, т.е. в диапазоне частот $0 \leq f < f_S$ записывается производная от ускорения;

2) $y = (V_0/(2\omega_S D_S))\dot{x}$, $D_S > 1$, в диапазоне частот $f_S/D_S < f < f_S D_S$ выходной сигнал пропорционален ускорению;

3) $y = V_0 \dot{x}$, $D_S < 1$, на частотах $f > f_S$ регистрируется скорость колебаний.

Как известно, в целом ряде сейсмологических задач необходимо знать смещения почвы. Поскольку цифровые и магнитные сейсмографы, описываемые дифференциальным уравнением (3) или системой (2), не позволяют без дополнительных устройств регистрировать смещения, возникает проблема их расчета по записи.

Восстановление смещений почвы по записям. Смещение почвы может быть определено интегрированием дифференциального уравнения (3):

$$x(t) = -(1/V_0) \left(\int_0^t y(\tau) d\tau + 2\omega_S D_S \int_0^t \int_0^t y(\tau) d\tau^2 + \omega_S^2 \int_0^t \int_0^t \int_0^t y(\tau) d\tau^3 \right) \quad (4)$$

при нулевых начальных условиях

$$\begin{cases} y(0) = \dot{y}(0) = 0, \\ x(0) = \dot{x}(0) = \ddot{x}(0) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Фактически нулевые начальные условия легко выполнимы — достаточно начать интегрирование записи незадолго до вступления продольной волны.

Как показано ранее в работах по восстановлению смещений по записям приборов с прямой и гальванометрической регистрацией [5, 6], основная трудность в определении функции $x(t)$ состоит в том, что отклик сейсмографа $y(t)$ зашумлен. Сигнал на выходе сейсмографа может быть представлен в виде

$$y(t) = \bar{y}(t) + \epsilon(t) + \eta(t), \quad (6)$$

где $\bar{y}(t)$ — идеальный, не искаженный шумом отклик сейсмографа; $\epsilon(t)$ — систематическая ошибка, например, дрейфа нулевой линии; $\eta(t)$ — случайная ошибка. Систематическую ошибку обычно представляют полиномом до третьей степени

$$\epsilon(t) = \sum_i a_i t^i, \quad i = 0, \dots, 3. \quad (7)$$

Пренебрегая случайной ошибкой $\eta(t)$, получим, подставляя (7) в уравнение (4),

$$\begin{aligned} x(t) = & \bar{x}(t) + (1/V_0) \left[\sum_i a_i t^{i+1}/(i+1) + 2\omega_S D_S \sum_i a_i t^{i+2}/((i+1)(i+2)) + \right. \\ & \left. + \omega_S^2 \sum_i a_i t^{i+3}/((i+1)(i+2)(i+3)) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

где $\bar{x}(t)$ — точное значение; $x(t)$ — реально рассчитанное значение функции. Очевид-

но, что с увеличением отрезка интегрирования вклад систематической ошибки возрастает.

В работах [5, 6] показано, что случайная ошибка при многократном интегрировании также приводит к уходу результата от нулевого уровня. Данный вывод был сделан по результатам численного моделирования, где случайная ошибка задавалась датчиком случайных чисел с нулевым средним и заданной дисперсией. Аналогичный вывод получен теоретически в работе [7].

Следовательно, сигнал, полученный интегрированием отклика реального прибора по формуле (4), вследствие шумов будет "отягощен" помехами в низкочастотной области. Исключить низкочастотную составляющую шума можно на основе априорных физических предпосылок относительно характера поведения искомой функции $\bar{x}(t)$.

В случае наблюдений вдали от источника в области, где остаточные смещения отсутствуют (много меньше амплитуд колебаний в сейсмических волнах), коррекция рассчитанного по формуле (4) смещения может осуществляться из условия минимума функционала

$$\Phi_1(t) = \int_0^{T_1} (x(\tau))^2 d\tau + \int_{T_2}^T (x(\tau))^2 d\tau, \quad (9)$$

где $(0, T_1)$ и (T_2, T) — "спокойные" участки в начале и в конце анализируемого отрезка записи длительностью T .

В случае наблюдений вблизи источника возможны остаточные смещения $x(t) = \text{const}$, что соответствует скорости колебаний $\dot{x}(t) = 0$ при $t > T_2$ на конце записи. Тогда

$$\Phi_2(t) = \int_0^{T_1} (x(\tau))^2 d\tau + \int_{T_2}^T (\dot{x}(\tau))^2 d\tau. \quad (10)$$

Минимум функционала (9) или (10) достигается при равенстве нулю производных по коэффициентам поправочного полинома.

Рассмотренный алгоритм определения смещений принципиально не отличается от предложенного ранее для систем с прямой и гальванометрической регистрацией [5, 6] и включает следующие этапы: 1) расчет смещений вместе с шумом; 2) определение коэффициентов полинома, описывающего низкочастотную помеху; 3) коррекция полученного решения и определение истинного смещения. В функционале (10) аналогично предложенному в работе [7] на функцию $x(t)$ наложено условие нулевого среднего смещения в начале и нулевой средней скорости в конце сейсмического колебания вблизи источника.

Основное отличие алгоритма для систем с магнитной или цифровой регистрацией состоит, по-видимому, в трактовке смысла коррекции. Ранее указывалось [5, 6], что данная операция осуществляется для исключения перекосов нулевой линии, возникающих при оцифровке аналоговых записей. При обработке записей сейсмографов с цифровой и магнитной регистрацией коррекцию, вероятно, правильнее трактовать как исключение низкочастотной помехи, вызванной случайными и систематическими шумами в каналах.

Определение коэффициентов дифференциального уравнения сейсмографа. Дифференциальное уравнение (3) с постоянными коэффициентами является приближенным. В нем, например, не учитывается влияние усилителя. Кроме того, может возникнуть ситуация, когда параметры канала неизвестны, а рассчитывать их общепринятыми методами трудно. Возможен иной экспериментальный подход к проблеме определения коэффициентов дифференциального уравнения и к выбору порядка уравнения вообще.

Предлагаемый метод состоит в следующем: независимо записываются подаваемый на вход сейсмографа сигнал $x(t)$ и отклик $y(t)$, которые затем вводятся в вычислительное устройство, а после этого методом наименьших квадратов определяются

коэффициенты дифференциального уравнения сейсмографа. Проверка метода состоит в восстановлении сигнала на входе прибора по отклику с использованием ранее вычисленных коэффициентов и в сравнении восстановленного сигнала с заданным.

Предположим, что дифференциальное уравнение сейсмографа может быть записано в виде

$$A_1 y^{(n)} + A_2 y^{(n-1)} + \dots + A_{n+1} y = x^{(k)}. \quad (11)$$

Для прямой регистрации $n = 2$, $k = 2$, для гальванометрической $n = 4$, $k = 3$. В рассматриваемой нами задаче известны функции $x(t)$ и $y(t)$ и неизвестны коэффициенты A_i . Обозначим значения функции в момент времени t_j $y(t_j) = y_j$ и $x(t_j) = x_j$. Получим переопределенную систему из N линейных уравнений с $n + 1$ неизвестным

$$A_1 y_j^{(n)} + A_2 y_j^{(n-1)} + \dots + A_{n+1} y_j = x_j^{(k)}, \quad (12)$$

где N — число отсчетов в реализациях функций $x(t)$ и $y(t)$. Будем полагать, что производные указанных функций существуют и могут быть рассчитаны численно. Определение коэффициентов уравнения может осуществляться методом наименьших квадратов из условия минимума функционала

$$\psi(A_1, \dots, A_{n+1}) = (A_1 \sum_j y_j^{(n)} + \dots + A_{n+1} \sum_j y_j - \sum_j x_j^{(k)})^2, \quad (13)$$

который достигается при равенстве нулю производных по коэффициентам $\partial \psi / \partial A_i = 0$. Приходим к нормальной системе линейных уравнений

$$A_1 (\sum_j y_j^{(n)})^2 + A_2 \sum_j y_j^{(n-1)} \sum_j y_j^{(n)} + \dots + A_{n+1} \sum_j y_j \sum_j y_j^{(n)} = \sum_j x_j^{(k)} \sum_j y_j^{(n)}; \quad (14)$$

$$\dots$$

$$A_1 \sum_j y_j^{(n)} \sum_j y_j + A_2 \sum_j y_j^{(n-1)} \sum_j y_j + \dots + A_{n+1} (\sum_j y_j)^2 = \sum_j x_j^{(k)} \sum_j y_j,$$

в которой число неизвестных коэффициентов A_i равно числу уравнений.

Предлагаемый способ определения коэффициентов дифференциального уравнения, описывающего связь между смещением на входе и откликом сейсмографа, имеет принципиальное ограничение, связанное с тем, что дифференцирование функций, включающих случайную погрешность, есть операция некорректная. Действительно, у производных резко возрастают высокочастотные помехи. Простейший способ подавления высокочастотных шумов — сглаживание по трем или пяти точкам. Вряд ли целесообразно применять данный метод в таком виде для определения коэффициентов дифференциальных уравнений свыше четвертого порядка.

Для борьбы с высокочастотными помехами можно видоизменить предложенный способ, заменив уравнение (11) интегрально-дифференциальным уравнением

$$A_1 y^{(n-k)} + A_2 y^{(n-1-k)} + \dots + A_{n+1} \underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{k} y d\tau^k = x \quad (15)$$

при $n > k$ или

$$A_1 y + A_2 \int_0^t y d\tau + \dots + A_{n+1} \underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_{n} y d\tau^n = x^{(k-n)} \quad (16)$$

при $n \leq k$. Схема вычисления коэффициентов остается прежней.

Основной недостаток данного подхода — усиление относительного вклада низкочастотных шумов при интегрировании. Для их подавления сейсмограмма может быть предварительно скорректирована за нулевую линию. Как показано в работе [6], для

Сравнение заданных и рассчитанных коэффициентов дифференциального уравнения

Режим работы прибора	Коэффициент				
	y	y	y'	y''	y'''
Акселерограф	1,0	0,00955	0,000063*		
То же	1,01	0,00908	0,002992		
"	1,011	0,009772	0,002992	0,000022	
"	0,997	0,009772	0,001394	0,0000216	-0,0000134
Сейсмограф	0,392	0,7494	0,9940*		
То же	0,396	0,7124	0,9951		
"	0,391	0,7685	0,9945	0,001746	-0,0000053

*Заданные значения коэффициентов дифференциального уравнения акселерографа или сейсмографа.

приборов с нулевым увеличением по смещениям на нулевой частоте запись должна быть уравновешена относительно нулевой линии на достаточно длинном отрезке.

Работоспособность алгоритмов определения коэффициентов дифференциального уравнения проверялась следующим образом. По записям сигналов на входе и выходе сейсмографа вычислялись коэффициенты уравнения. Затем проводилось сравнение с коэффициентами, рассчитанными классическим способом, принятым в сейсмометрии [4]. Примеры подобных расчетов для акселерографа и сейсмографа с прямой регистрацией, описываемых дифференциальным уравнением второго порядка, приведены в таблице.

Коэффициенты дифференциального уравнения рассчитывались в предположении уравнений второго—четвертого порядка. Из таблицы следует, что основные значимые коэффициенты уравнения рассчитаны с ошибкой, не превосходящей нескольких процентов от точного значения. При повышении степени искомого дифференциального уравнения выше исходно заданного вычисленные коэффициенты при высших степенях (отсутствующих в исходном уравнении) более чем на два порядка ниже основных. Относительная малость коэффициентов уравнения является, по-видимому, основой для снижения степени искомого уравнения.

Для контроля подбора степени и коэффициентов дифференциального уравнения осуществлялось восстановление входного сигнала по отклику с использованием экспериментально рассчитанных коэффициентов. В рассмотренных примерах отмечено удовлетворительное соответствие исходного и восстановленного сигналов.

Очевидно, что, рассчитав одним из предложенных методов коэффициенты дифференциального уравнения, можно построить частотную характеристику системы. Эти методы могут найти применение не только в сейсмометрических задачах, но и в других случаях, когда необходимо подобрать дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами, связывающее вход и выход регистрирующей системы.

Рассмотрено дифференциальное уравнение, связывающее смещение на входе с откликом сейсмографа с магнитной или цифровой регистрацией (без учета влияния усилителей и т.д.).

Предложен метод восстановления смещения почвы по отклику сейсмографа такого типа, включающий подавление низкочастотных помех, возникающих при интегрировании записей.

Показана возможность определения коэффициентов и подбора дифференциального уравнения, связывающего вход и выход регистрирующей системы. Рассмотрены два алгоритма расчета коэффициентов на основе использования дифференциального и интегрального (интегрально-дифференциального) уравнений.

Приложение. Кратные интегралы в формулах (4), (15) и (16) могут быть заменены соотношением

$$\underbrace{\int_0^t \dots \int_0^t}_n y(\tau) d\tau^n = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^t y(\tau) (t-\tau)^{n-1} d\tau. \quad (17)$$

Соотношение (17) может несколько ускорить алгоритм расчетов, особенно для длинных записей, имеющих большое число отсчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.Л., Аранович З.И., Зеликман Э.И. и др. Широкополосный велосигграф с магнитной аналоговой регистрацией на базе промышленных узлов // Сейсмические приборы; Вып. 10. М.: Наука, 1977, С. 32–35.
2. Кевлишвили П.В., Ан В.А., Башлов И.П. и др. Система автоматической регистрации и обработки результатов геофизических наблюдений // Там же, С. 35–44.
3. Фрейд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: Наука, 1978, 174 с.
4. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Кирноса, В.М. Фрейда. М.: Наука, 1974, 243 с.
5. Грайзер В.М. Определение истинного смещения почвы по записям сильных движений // Изв. АН СССР, Физика Земли. 1979, № 12. С. 36–50.
6. Гразер В.М. Истинное движение почвы в эпицентральной зоне. М.: ИФЗ АН СССР, 1984, 198 с.
7. Востриков Ю.Н. Обратная задача сейсмометрии. Построение регуляризирующих операторов и анализ ошибки восстановления // Геология и геофизика, 1984, № 5. С. 81–88.

УДК 550.34

О.В. Карнаухова, И.С. Каминский, М.В. Чудакова

СИСТЕМА ВВОДА ЦИФРОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ЦУГОВ ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ ПРИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ РЕГИСТРАЦИИ

Характеристика и особенности регистрационного комплекса автоматизированной системы сейсмометрических наблюдений (АССН) на плотине Чарвакской ГЭС изложены в [1].

Измерительный комплекс на Чарвакской плотине состоит из 21 точки наблюдения. Число регистрационных каналов 105 (трехкомпонентная регистрация). Регистрация сейсмических колебаний осуществляется в диапазоне 120 дБ, в ждущем режиме, цифровой записью, с частотой 100 опросов в секунду по каждому регистрационному каналу. Частотный диапазон 0,5–20 Гц [2].

Система математического обеспечения (МО) АССН Чарвакской плотины обеспечивает полный цикл обработки цифровой сейсмологической информации – от ввода в ЭВМ и коррекции записей до создания инженерно-сейсмологической базы данных (ИС БД) и геофизической интерпретации материала.

Запись в АССН осуществляется в формате СЦР. Для использования ЭВМ типа ЕС необходимо переформатирование информации, которое осуществляется устройством сопряжения УС-1, разработанным ОКБ ИФЗ АН СССР. УС-1 принимает информационные слова с устройства воспроизведения типа УВ-1, делит их на два байта и последовательно пересылает их в ЕС ЭВМ (ЕС-1052). Недостатком такой системы является

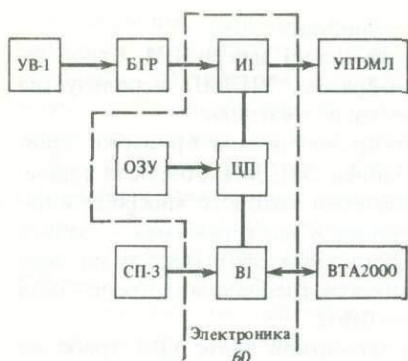


Рис. 1. Блок-схема АКВП

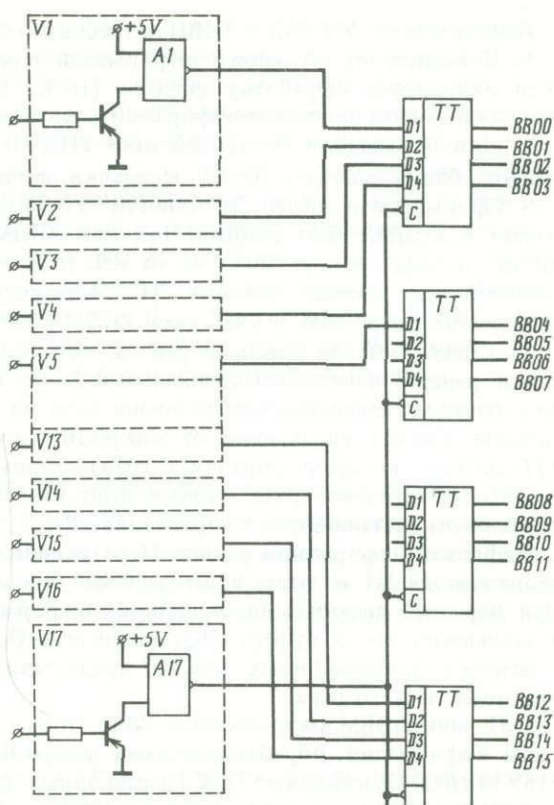


Рис. 2. Блок гальванометрической развязки

отсутствие согласования скорости ввода и обработки. Мультиплексный канал ЕС ЭВМ работает в "стартстопном" режиме, а УВ-1 формирует непрерывный поток информации. В условиях вычислительного центра коллективного пользования в зависимости от загрузки ЭВМ период обращения к устройствам мультиплексного канала изменяется в широких пределах, что является предпосылкой для потери информационных байтов. Происходит искажение информации, которое при методе деления информационного слова на два байта является недопустимым. Для решения поставленной задачи был создан автономный комплекс ввода и переписи (АКВП) на базе микроЭВМ "Электроника-60". Выбор типа микроЭВМ обусловлен разрядностью, которая соответствует длине выходного слова. В этом случае разбиение слова на байты происходит в памяти микроЭВМ программным путем, что исключает искажение информации. Блок-схема АКВП представлена на рис. 1.

Для согласования уровней информационных сигналов УВ-1 с TTL-уровнями платы дискретного ввода-вывода И1 и гальванической развязки между устройствами разработан и изготовлен блок гальванической развязки (БГР) (рис. 2). БГР состоит из 17 идентичных ключей на транзисторах VT1-VT18, преобразующих отрицательную логику УВ-1 в положительные сигналы TTL-уровня. Далее эти сигналы поступают на оптроны А1-А17. Запись информации в регистр стробируется синхроимпульсом, сопровождающим информационное слово.

В качестве пульта оператора к микроЭВМ подключен алфавитно-цифровой видеотерминал ВТА-2000. Ввод управляющих программ осуществляется с помощью фотосчитывающего устройства с перфоленты СП-3. Распакованная информация записывается на магнитную ленту с помощью устройства подготовки данных на магнитной ленте (УПДМЛ) ЕС 9002.

Использование УПДМЛ в АКВП потребовало его модернизации.

1. Добавлена схема записи информации в регистр обмена из микроЭВМ. Строб записи инициирует выработку сигнала ТИСК. Таким образом, УПДМЛ используется как для переписи цифровой информации, так и по прямому назначению.

2. Для повышения быстродействия УПДМЛ заблокирован режим проверки записанного блока данных. После переделки скорость записи УПДМЛ возросла вдвое.

3. Сформирован сигнал "готовности" УПДМЛ, при наличии которого микроЭВМ посылает в УПДМЛ байт данных. Так как УПДМЛ работает в двух режимах – запись данных в буфер и перезапись их на МЛ, то и сигнал готовности сформирован из двух сигналов при помощи элемента "И". Этот сигнал является требованием прерывания программы микроЭВМ для выдачи в УПДМЛ очередного байта.

Для переключения режимов работы накопителя на магнитной ленте УВ-1 (рабочий ход и реверс) изготовлен специальный блок, конструктивно выполненный совместно с блоком гальванической развязки (см. рис. 2) и состоящий из двух идентичных каналов. Сигнал управления от микроЭВМ поступает на оптронный формирователь TTL-сигнала, который управляет транзисторным ключом. Нагрузкой ключа является электромагнитное реле, своими контактами коммутирующее +24V для управления блоком дистанционного управления УВ-1.

Цифровая информация в виде 16-разрядного слова поступает в плату дискретного ввода-вывода И1 и затем в центральный процессор (ЦП). Программа, обслуживающая перепись информации, принимает информационное слово из входного регистра и записывает его в буфер, оформленный в ОЗУ микроЭВМ. В промежутках между приемом информационных слов ЦП предоставляет возможность УПДМЛ переписывать информацию из буфера.

ОЗУ микроЭВМ имеет емкость 28 К 16-разрядных слов в связи с большими объемами информации, обрабатываемыми микроЭВМ, и состоит из двух плат памяти ПЗ (15У30-16-004), каждая из 16 К 16-разрядных слов.

ЭВМ обменивается информацией с УВ-1 и УПДМЛ через устройство параллельного обмена И1 (15КС-180-004), которое состоит из трех регистров (входного, выходного, состояния), адресуемых отдельно.

МикроЭВМ работает в реальном масштабе времени, поэтому к программному обеспечению переписи предъявляется ряд требований:

логические ветви программы должны укладываться в интервал времени между поступлением 2 информационных слов, равный 400 мкс;

логические ветви программы должны учитывать как превышение скорости считывания над скоростью записи информации в буфер микроЭВМ, так и наоборот;

программа должна учитывать, что микроЭВМ снабжена динамической памятью, на регенерацию которой центральный процессор каждые 2 мс тратит 64 тактовых цикла обращения к ОЗУ. Невыполнение любого из перечисленных выше требований приведет к потере или искажению переписываемой информации.

Программное обеспечение комплекса написано на Ассемблере. Процесс ввода информации инициируется сменой информации на входном регистре, вывод – по сигналу готовности УПДМЛ. Ввод и вывод информации асинхронные. Для согласования скорости ввода и вывода используется динамический буфер в памяти микроЭВМ.

Результатом функционирования АКВП являются цифровые записи сейсмических событий, записанные на магнитной ленте ЕС ЭВМ, далее эти записи подвергаются корректировке и распаковываются.

Одной из основных задач МО АССН является создание ИС БД, где хранится вся полезная информация о каждом сейсмическом событии: моменты вступления, конец цуга S -волны и параметры цуга, значения максимальной амплитуды A_{max} и соответствующего ей периода T_{max} .

Наиболее важной является задача определения момента вступления S -волн с учетом многоканальности системы [3].

Вычисления, выполненные по записям АССН, позволили выбрать эффективную методику для обработки цифровых магнитных многоканальных записей. В основе методики, по которой составлен алгоритм определения момента вступления поперечных волн, лежит метод функционалов [4], используемый для определения вступлений продольных волн на фоне помех при непрерывном режиме регистрации.

Распознающей системой для выделения полезных сигналов по цифровым записям штормовых микросейсм и землетрясений северо-западной части Тихого океана послужили 9 признаков (функционалов), поведение которых определяет принадлежность отрезка реализации к одному из классов: А1 — помеха, А2 — вступление P -волны. Для обработки многоканальных записей АССН метод MFU модифицирован и настроен на выделение поперечных волн. Для выделения вступлений поперечных волн на цифровых записях АССН использованы четыре функционала.

1. F_1 , характеризующий колебательную скорость исследуемого процесса:

$$F_1 = \sum_{t_{j+1} - t_j < C} \left| y_{j+1}^{(p)} - y_j^{(p)} \right| / (t_{j+1} - t_j),$$

где $y_j^{(p)}$, $j = \overline{1, L}$ — экстремальные значения дискретных амплитуд цифровой записи одной из горизонтальных компонент (X или Y), которая принимается в качестве "базовой" ($P = 1, 2$); t_j , $j = \overline{1, L}$ — дискретные отсчеты времени, соответствующие экстремальным значениям $y_j^{(p)}$; C — константа, определенная экспериментальным путем (в нашей задаче она характеризует полупериод высокочастотных наложений).

2. F_2 , характеризующий энергию процесса:

$$F_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^3 (y_j^{(r)})^2,$$

где $y_i^{(r)}$ — дискретные отсчеты амплитуд r -й компоненты записи, центрированные относительно их средних значений; n — количество отсчетов на рассматриваемом временном окне ΔT .

3. F_3 , определяющий площадь, ограниченную кривой $y(t)$ и временной осью:

$$F_3 = (y_1^{(p)} + y_n^{(p)}) \Delta \tau / 2 + \sum_{i=2}^{n-1} y_i^{(p)} \Delta \tau,$$

где $\Delta \tau$ — шаг квантования цифровой записи в единицах длины.

4. F_4 , характеризующий изрезанность кривой $y(t)$:

$$F_4 = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{r=1}^3 (y_{i+1}^{(r)} - y_i^{(r)})^2 \right]^{1/2}.$$

Для сокращения затрат машинного времени и увеличения разрешающей способности метода MFU (с учетом особенностей регистрационного комплекса АССН) в качестве распознающей системы определения момента вступления S -волн была использована совокупность трех функционалов — $F_1^*(t)$, $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$, адаптированных следующим образом:

$$F_1^*(t) = F_1(t) / \max_t F_1(t), \quad (1)$$

$$F_2^*(t) = (a_2 F_2(t) b_2 F_3(t) c_2 F_4(t)) / \max_t (a_2 F_2(t) b_2 F_3(t) c_2 F_4(t)), \quad (2)$$

$$F_3^*(t) = (a_3 F_3(t) b_3 F_4(t)) / \max_t (a_3 F_3(t) b_3 F_4(t)), \quad (3)$$

где a_2, b_2, c_2, a_3, b_3 — некоторые весовые коэффициенты; в практической реализации алгоритма $a_2 = b_2 = c_2 = a_3 = b_3 = 1$. Процедура нормировки позволяет получить одинаковый диапазон изменения $F_1^*(t)$, $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$.

Формализация выделения момента t_S -вступления поперечных волн связана с определением момента устойчивого роста функционалов $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$. Эта задача, по существу, эквивалентна определению момента разладки [5–7] случайных процессов $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$, характер поведения которых до и после разладки можно охарактеризовать достаточно точно. Определение момента разладки процессов $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$ значительно проще, чем поиск разладки, соответствующий моменту вступления S -волны в исходной записи сейсмического события. Отметим, что функционал $F_1^*(t)$ характеризует не только амплитуду записи сейсмического события, но и ее видимые частоты. Этот признак следует выбирать так, чтобы он достигал максимального значения внутри цуга поперечных волн, тогда как амплитудные признаки $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$ могут достигать максимума на участках записи, соответствующих поверхностным волнам или собственным колебаниям сооружения (высокое значение амплитуд и низкая частота колебания). Поэтому признак $F_1^*(t)$ при анализе записей АССН используется для определения отсчета $n_{\max}^1 = \arg \max_{\uparrow} F_1^*(t)$ внутри цуга поперечных волн. Это позволяет построение признаков $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$ осуществлять для отрезка реализации анализируемого сейсмического события, ограниченного первым и n_{\max}^1 -м отсчетами записи, что значительно сокращает объем вычислений.

Таким образом, моменту вступления S -волн соответствует момент начала резко возрастающих признаков $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$, а участку записи, предшествующему S -вступлению, — поведение функционалов $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$, близкое к стационарному с дисперсией $\sigma = 0,05 \div 0,15$ и средним $M = 0,02 \div 0,05$.

Алгоритм для выделения цугов поперечных волн, составленный в соответствии с вышеизложенной методикой, включает следующие этапы.

1. Вычисление по всей записи функционала $F_1^*(t)$ с временным окном ΔT (n -отсчетов).

2. Определение номера отсчета (момента времени), который соответствует максимуму функционала $F_1^*(t) - n_{\max}^1$.

3. Построение функционалов $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$ вдоль записи сейсмического события влево от n_{\max}^1 с временным окном ΔT .

4. Определение момента времени, начиная с которого поведение $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$ близко к стационарному — с малыми значениями дисперсии и математического ожидания. Просмотр реализаций $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$ начинается с отсчета n_{\max}^1 . Если такого момента не найдено, в качестве искомого выбирается начало записи — первый отсчет (при ждущем режиме работы системы включение может происходить при вступлении S -волны). Момент времени, определенный на последнем этапе, соответствует моменту вступления S -волны. Он определяется одновременно для всех компонент записи.

5. Определение параметров цуга S -волны (A_{\max} , T_{\max}) и времени его конца. Основано на эвристических методах, обобщающих приемы работы интерпретаторов при определении этих величин по аналоговым записям. Конец цуга поперечных волн определяется как время t_k , начиная с которого все амплитуды рассматриваемой компоненты записи сейсмического события не превышают значения $1/3 A_{\max}$. Здесь A_{\max} — максимальная амплитуда записи в пределах m -фаз, считая с момента вступления S -волны; T_{\max} — видимый период, соответствующий максимальной амплитуде A_{\max} (рис. 3).

Комплекс программ *VAT*, входящих в состав математического обеспечения АССН, позволяет по трехкомпонентной записи сейсмического события (количество компонент может быть меньше трех) определить момент вступления S -волны, выделить цуг максимальных (поперечных) волн, рассчитать динамические параметры цуга A_{\max} , T_{\max} и определить конец цуга.

Основная исходная информация для работы комплекса *VAT*: цифровая запись сейсмического события; количество отсчетов в записи (длительность каждой из компонент не должна превышать 1 мин, что соответствует требованиям ТЗ системы [1]); дата и время сейсмического события; параметры, определяющие технику и характер

Рис. 3. Схема работы функционалов $F_1^*(t)$, $F_2^*(t)$, $F_3^*(t)$
 Землетрясение 16.02.84 г., $\Delta = 110$ км,
 $M = 4,4$

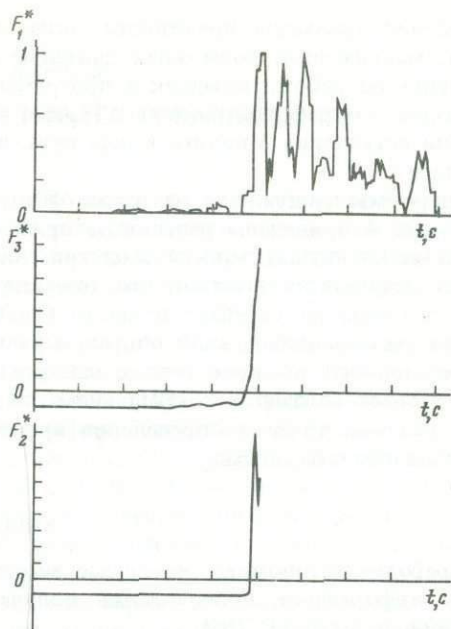
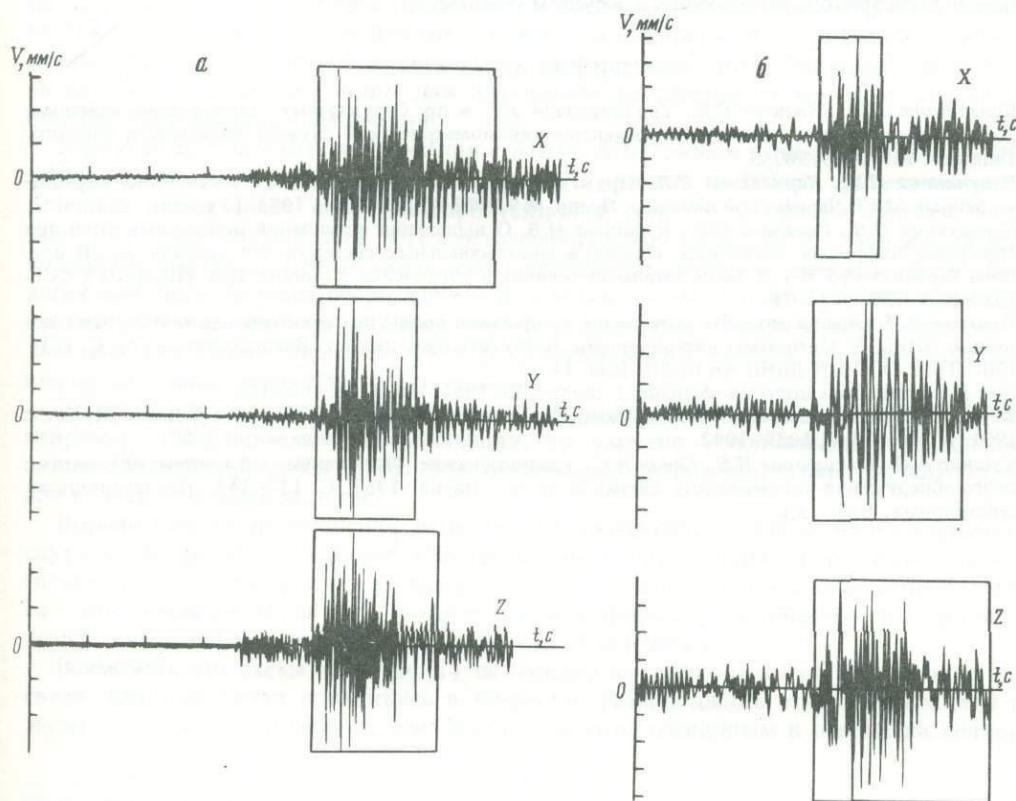


Рис. 4. Результаты работы комплекса программ при обработке записей землетрясений

a - 16.02.84 г., $\Delta = 110$, $M = 4,4$; *б* -
 23.10.78 г., $\Delta = 520$, $M = 3,6$



вычислений (размеры временного окна, величина периода высокочастотных наложений, максимально возможная длительность интервала, содержащего A_{\max} и т.д.).

Результаты работы комплекса программ *IAT*: выделенный цуг поперечных волн с выводом на графопостроитель *ATLAS-4* в записи сейсмического события; значения времени вступления S -волны, конца цуга, величин A_{\max} , T_{\max} для каждой компоненты записи.

Программы составлены на языке Фортран-IV для операционной системы ОС ЕС.

На рис. 4 приведены результаты применения описанного алгоритма к обработке цифровых магнитных записей землетрясений в диапазоне магнитуд $3,4 \leq M \leq 5,3$. Анализ результатов показал, что точность машинного определения времени вступления S -волны не уступает точности визуальной обработки сейсмограмм. Многоканальная система наблюдений подразумевает обработку сейсмического события, зарегистрированного во всех точках наблюдений. Поэтому дальнейшее усовершенствование метода связано с сокращением операции формирования ИС БД путем выделения базовых точек и определения времени задержки вступления в каждой точке по отношению к базовым.

ВЫВОДЫ

Разработан автономный комплекс ввода и переписки (АКВП) цифровой сейсмической информации, позволяющий получать многоканальные записи сейсмических событий в формате ЕС ЭВМ.

Разработан алгоритм автоматического выделения вступлений поперечных волн, оценки параметров и конца цуга S -волн для многоканальной системы с цифровой формой регистрации, работающей в ждущем режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плотникова Л.М., Квашии Е.В., Тиллявалдиев У.Т. и др. Структурная схема автоматизированного регистрационного комплекса инженерно-сейсмометрической службы Чарвакской плотины. Ташкент: Фан, 1979. 207 с.
2. Плотникова Л.М., Карнаухова О.В. Структура системного и прикладного обеспечения обработки данных АССН Чарвакской плотины: Препр. № 9, ИФЗ АН СССР. М., 1983. 13 с.
3. Карнаухова О.В., Сигалова О.Б., Чудакова М.В. О выделении вступлений поперечных волн при обработке цифровых магнитных записей в многоканальных системах (на примере АССН плотины Чарвакской ГЭС) // Вычислительная техника и управление. Ташкент: Изд. РИСО АН УзССР, 1987. Вып. 135. С. 24–26.
4. Тихонов И.Н. Оценка момента вступления продольной волны по трехкомпонентной записи с помощью ЭЦВМ // Алгоритмы интерпретации геофизических данных. Владивосток, 1976. С. 123–130. (Тр. САХКНИИ ДВНЦ АН СССР; Вып. 44.)
5. Page E.S. Continuous Inspection Schemes // *Biometrika*. 1954. Vol. 41. P. 100–114.
6. Ширяев Д.Н. Задача скорейшего обнаружения нарушения стационарного режима // Докл. АН СССР. 1961. Т. 138, № 5. С. 1039–1042.
7. Кушнир А.Ф., Никифоров И.Б., Савин И.С. Статистические адаптивные алгоритмы автоматического обнаружения сейсмических сигналов // М.: Наука, 1983. С. 137–142. (Вычислительная сейсмология; Вып. 15.).

ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Внедрению в отечественную геофизику полигонных методов наблюдений с автономными измерительными пунктами сопутствует развитие систем передачи геофизической информации по линиям связи [1]. Тенденция этого развития требует также значительного количественного роста устройств для передачи данных наблюдений, разработанных с использованием опыта известных решений [2].

Линии связи геофизического полигона. На автономных измерительных пунктах (АИП) полигона размещены различные геофизические приборы. Обработку данных и принятие решений осуществляет центр полигона (ЦП), который связан с центром региона (ЦР), являющимся высшей ступенью информационной сети (рис. 1).

Ориентируясь на передачу данных в сейсмоактивных районах, можно принять в качестве преобладающей на полигоне площадью 100×100 км радиосвязь в пределах прямой видимости в УКВ- и СВЧ-диапазонах по каналам тональной частоты (полоса 300–3400 Гц) или более широкополосным (радиорелейным) с симплексной передачей данных на ЦП без обработки в режиме реального времени (АИП1). Однако не всегда возможна прямая передача. Допустимы следующие варианты обмена данными.

Между АИП2 и ЦП устанавливается ретрансляционный пункт (РП1), работающий в том же диапазоне частот радиопередачи.

Выделяется кустовой измерительный пункт (КИП1), связанный с АИП3–АИП5. На КИП1 следует производить сортировку и предварительную обработку передаваемой на ЦП информации, причем для обеспечения документальной сохранности первичных данных на КИП1 потребуется регистратор информации (РИ). Обратный канал связи между ЦП и КИП1 необходим для повышения достоверности передачи, управления обработкой и записью информации.

Поступающая на КИП2 информация с АИП6, АИП7, как и данные отдельного АИП8, передается без обработки в режиме реального времени на ЦП по дуплексной радиорелейной линии связи с большой пропускной способностью, причем передача может быть непосредственной или через ретрансляционный пункт РП2. Наличие широкополосного обратного канала связи дает возможность наряду с регистрацией изменять характеристики системы сбора данных под управлением центральной ЭВМ в пределах времени, отведенного на интервал между выборками. Схемы организации обмена данными для такого варианта связи разрабатываются в рамках создания локальных информационных сетей общего назначения.

Если в пределах полигона расположен стационарный измерительный пункт (СИП), например обслуживаемая сейсмостанция, то уместно использование арендованной линии абонентской связи с ЦП для организации дуплексного телеграфного канала или канала тональной частоты.

Выделенный на полигон или регион канал телефонной связи через искусственный спутник Земли (ИСЗ)¹ может обеспечить связь ЦП с КИП3 и другими пунктами только в режиме разделения времени, поэтому передача данных должна сопровождаться запоминанием первичной геофизической информации и обработкой ее в объеме требований к информативности передаваемых на ЦП данных.

Возможно, что схема (см. рис. 1) не охватывает всех вариантов построения линий связи, которые могут возникнуть в будущем. Разнородность этих линий хотя и нежелательна, но, по-видимому, неизбежна. При этом очевидным и основным является

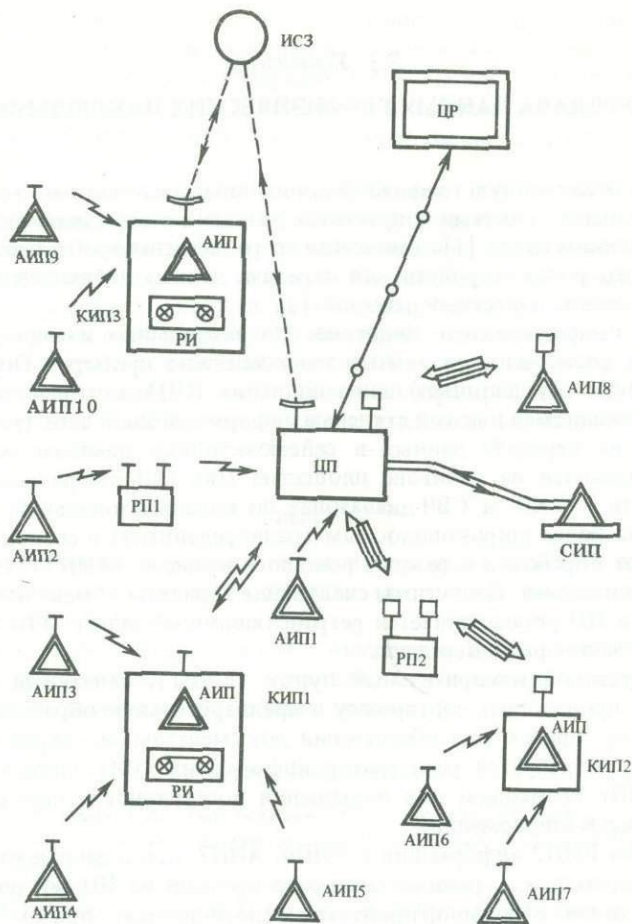


Рис. 1. Схема передачи геофизических данных

требование обеспечить единый формат поступающих на ЦП данных, что достигается применением соответствующих интерфейсных устройств.

Скорость и точность передачи геофизических данных. В отечественной и международной практике по скорости передачи различают низкоскоростные (до 300 бит/с), среднескоростные (от 600 до 9600 бит/с) и высокоскоростные (48 кбит/с и выше) каналы [3, 4]. Скорость характеризует срок доставки информации. Верность передачи информации оценивают вероятностью выдачи на выход цифровой системы передачи данных кодовой комбинации, отличающейся хотя бы одним элементом от соответствующей входной комбинации. Применяя понятие "эквивалентность" сообщений, для геофизических аналоговых систем передачи в качестве "элемента" можно принять минимально разрешаемый уровень регистрации [5, 6].

В качестве нормы в общегосударственной системе передачи данных установлена вероятность ошибки 10^{-6} , в телеграфии принята величина $3 \cdot 10^{-5}$ на знак. В то же время для существующих первичных сетей связи характерны ошибки с вероятностью в пределах от 10^{-2} до 10^{-5} на элемент. Радиорелейным линиям связи и линиям связи через ИСЗ присущи ошибки с вероятностью $10^{-3} - 10^{-4}$.

Несоответствие между принятыми нормами и параметрами реальных линий связи по ошибкам передачи устраняют, используя различные методы повышения верности

передачи [7, 8]. Чем выше скорость передачи и меньше допустимая вероятность ошибки, тем сложнее аппаратура². Необходимо оценить и разделить по этим параметрам каналы передачи данных геофизических наблюдений, где имеют дело с сигналами, частотный диапазон которых простирается от долей до двух-трех десятков герц, а непрерывный динамический диапазон составляет 40–120 дБ.

Реальным и распространенным в цифровой технике является 16-битовый формат одной выборки, что в пределе соответствует непрерывному динамическому диапазону более 90 дБ для знакопеременного сигнала ($\pm 32\,768$ уровней регистрации). Возможен вариант с представлением выборок в виде 16-разрядного кода с "плавающей" запятой, что расширяет диапазон, но увеличивает погрешность измерения (в допустимых пределах).

При цифровой обработке аналоговых записей геофизических событий число выборок не превышает 5–10 на один период наивысшей регистрируемой частоты. Следовательно, мы можем принять для оценки максимальную частоту выборок — 150 измерений в секунду. С учетом этого максимальная скорость поступления информации на вход системы передачи данных для трехкомпонентных измерений составит $16 \times 3 \times 150 = 7200$ бит/с. Запас до предельной скорости 9600 бит/с у такой среднескоростной системы необходим для дополнительной передачи на ЦП другой геофизической информации, а также служебных признаков. Кроме того, повышение верности симплексной передачи данных требует, как правило, введения избыточности информации ориентировочно на 20–30%. В результате приходим к требованию обеспечить скорость передачи данных геофизических наблюдений 9600 бит/с для измерительного пункта с одним комплектом широкополосных сейсмометров и набором других датчиков, для которых характерна выдача данных на передачу в значительно более медленном темпе. Эта величина скорости передачи является предельной для существующих радиотелефонных каналов связи.

Далеко не все АИП полигона потребуют такой скорости передачи данных. Известно, например, что уже на расстояниях 10–15 км от сейсмического источника основные спектральные составляющие записи лежат в пределах 10–12 Гц. Как следствие, требуется скорость передачи вдвое меньше предельной. Известен также путь для снижения требуемой скорости передачи данных, заключающийся в предварительном сжатии информации на АИП и восстановлении первоначальной формы сигналов на КИП или ЦП. Отметим, что приемлемые результаты получают при использовании устройств, алгоритмы работы которых и соответственно сложность сравнимы с аналогичными показателями распространенных устройств обработки геофизической информации, имеющих обычно на пункте сбора данных.

Подход к определению требуемой верности передачи данных полигонных измерений должен учитывать возможности ЭВМ, работающей на ЦП в режиме реального времени на приеме информации. В обработке одновременно участвует до 1–2 тыс. выборок, т.е. применительно к задачам сейсмологии имеется в пределе 4 кбайта информации. Алгоритмы ввода предусматривают, как правило, интерполяционное или иное устранение сбоев на приеме данных, как минимум единичных. Следовательно, к системе передачи первичных данных не следует предъявлять требования к верности передачи выше, чем вероятность ошибки $3 \cdot 10^{-5}$. В связи с этим необходимо отметить, что в настоящее время при интерпретации сейсмологических данных на окончательные выводы влияет не более 5–10% поступающей первичной информации. Следовательно, требования к верности передачи могут быть снижены по сравнению со случаем, когда информация используется полностью. Таким образом, вероятность ошибки 10^{-4} или близкая к ней величина согласуется с техническими возможностями реальных устройств симплексной передачи данных по каналам тональной частоты.

Иная ситуация возникает при передаче данных после предварительной обработки.

² Напомним, что вероятность ошибки 10^{-6} соответствует наличию одной опечатки в книге объемом около 400 страниц.

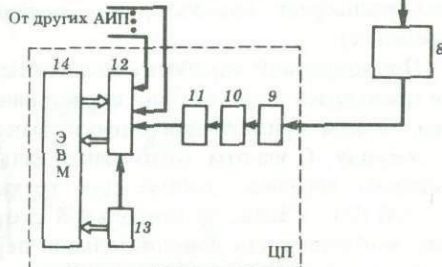
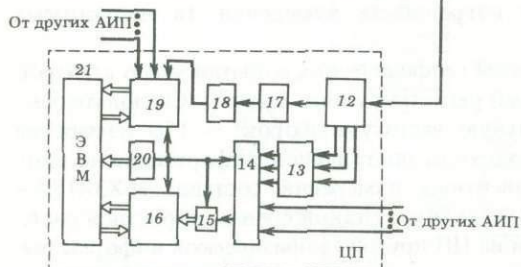
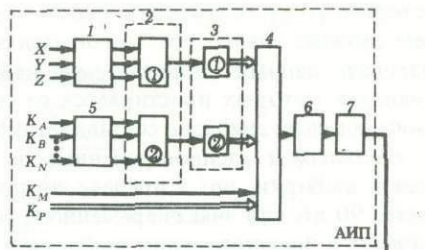
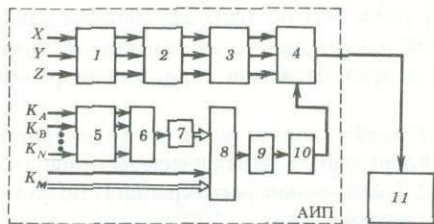


Рис. 2. Блок-схема аналоговой системы сбора данных геофизических наблюдений

Рис. 3. Блок-схема цифровой системы сбора данных геофизических наблюдений

Требования к верности существенно выше, однако и объем информации намного меньше, а требуемый срок доставки увеличен. При малой скорости передачи на дуплексных линиях связи по каналам тональной частоты успешно работают системы с управляющей или информационной обратной связью, обеспечивающие вероятность ошибки не выше 10^{-6} на знак как для единичных, так и для пакетированных ошибок.

Изложенное позволяет, в частности, заключить, что организация на полигоне дуплексного канала связи, как более сложного, дорогого и менее надежного, целесообразна лишь для передачи обработанных данных, а также в целях оперативного управления измерительным процессом, если это существенно необходимо для расширения функциональных возможностей АИП или КИП.

На геофизических полигонах предусматривается, как правило, функционирование большого числа АИП и СИП. При этом поступление на ЦП ошибочной информации от одного или нескольких корреспондентов все же не исключает возможности правильной интерпретации геофизических данных. Учитывая это, в отдельных случаях на полигонах можно считать приемлемой симплексную передачу данных и после предварительной обработки их, когда ожидается, что в большинство сообщений будет заложена избыточность, достаточная для безошибочной в конечном итоге интерпретации данных наблюдений.

Аналоговые и цифровые системы передачи данных наблюдений. Развитие систем передачи данных наблюдений в геофизике происходило по пути разработки и внедрения аналоговых устройств, из которых можно считать устоявшимися в практике системы с частотным уплотнением в полосе 300–3400 Гц. Между тем в технику передачи данных внедряются цифровые линии связи с импульсно-кодовой модуляцией, перспективность применения которых обусловлена повышением степени интеграции элементной базы. Представляет интерес применительно к задачам геофизики сравнить возможности и техническую сложность аналоговых и цифровых систем. С этой целью рассмотрим представленные на рис. 2 и 3 блок-схемы симплексных систем, где показаны основные блоки [9–13].

В аналоговой системе с частотным разделением каналов (см. рис. 2) трехкомпонентный сейсмический сигнал поступает на блок масштабных усилителей 1 и фильтров

низкой частоты, работающих на частоте сигнала. Далее следуют блок модуляторов аналоговых сигналов 2 и блок канальных фильтров 3, работающих на тональных частотах. Все канальные поднесущие частоты суммируются устройством 4. Преобразование низкоскоростных данных других геофизических датчиков с аналоговым выходом осуществляется по каналам K_A, K_B, \dots, K_N через блок масштабирования 5, коммутатор каналов 6 и аналого-цифровой преобразователь 7 с параллельным кодом на выходе. Кроме того, отдельные каналы могут сразу выдавать информацию последовательным (канал K_M) или параллельным (канал K_P) кодом. Поступающие от всех геофизических каналов коды данных преобразователем 8 превращаются в последовательный двоичный код установленного формата. Далее с помощью кодера 9 вводят избыточность для защиты передаваемой информации, которая через тональный модулятор 10 поступает также на суммирующее устройство 4, откуда по линии связи 11 информация передается на ЦП.

Через блок полосовых фильтров 12, который разделяет поднесущие частоты, сигналы тональных частот поступают на блок демодуляции аналоговых сейсмических сигналов (13). Эти сигналы через коммутатор 14, аналого-цифровой преобразователь 15 и устройство ввода сейсмической информации 16 поступают для обработки в ЭВМ. С выхода демодулятора 17 двоичные сигналы передаются к декодеру 18, исправляющему ошибки передачи. Далее информация поступает к устройству ввода геофизической информации 19, осуществляющему асинхронный прием данных и транслирование в ЭВМ. Привязку данных к единому времени производит блок 20.

Характерны показатели первой очереди автоматизированной системы прогноза землетрясений [1]. На ЦП с 20 измерительных пунктов поступают данные 60 сейсмических каналов, а общее число каналов низкоскоростной геофизической информации составляет 320. Для сейсмических каналов определены динамический диапазон 60 дБ, 12-разрядное аналого-цифровое преобразование и частотный диапазон до 20 Гц. Оцифровка данных производится в темпе 100 выборок в секунду на канал. Скорость поступления данных с одного АИП составляет, таким образом, 3600 бит/с. Для всех геофизических каналов, опрашиваемых на АИП с временным разделением, принята скорость передачи данных 10 бит/с.

В системе передачи данных по рис. 2 наибольшей технической сложностью обладают блоки 2, 3, 12, 13, обеспечивающие динамический диапазон более 60 дБ, а также скоростные многоканальный коммутатор 14 и аналого-цифровой преобразователь 15. Блоки, участвующие в передаче данных геофизических каналов, работают на малой скорости; разработке и изготовлению их принципиальные соображения не препятствуют.

Цифровую систему сбора данных с похожими параметрами можно построить по блок-схеме (см. рис. 3). При этом устройства 1, 5 выполняют те же функции, что и в схеме рис. 2. Коммутатор каналов 2 и аналого-цифровой преобразователь 3 выполнены в виде отдельных секций, причем скорость работы первых секций в 20 раз меньше, чем у аналогичных блоков ЦП на рис. 2, и составляет 300 выборок в секунду. Соответственно изменяются требования к этим узлам. АЦП 3(1) снабжен устройством выборки-хранения. Функция преобразователя кодов 4 остается прежней. Кодер 6 и модулятор 7 двоичных сигналов существенно отличаются от аналогичных узлов рис. 2. Здесь относительно сложным блоком является модулятор 7, который при темпе поступления данных 3600 бит/с должен обеспечивать скорость передачи не менее 4800 бит/с. Это значение определено с учетом степени избыточности информации, вносимой кодером 6. Указанную скорость передачи данных в полосе 300–3400 Гц обеспечивают модуляторы с относительной восьмифазной (трехкратной) модуляцией на несущей частоте 1800 Гц и скоростью 1600 Бод³.

³Рекомендация И. 27 Международного консультативного комитета по телеграфии и телефонии (МКК ТТ) для стандартизованных каналов тональной частоты. Наличие предскажений на передаче в радиотелефонном канале связи может повлиять на выбор оптимального значения частоты несущей.

По линии связи 8 цифровая информация передается на ЦП. Не останавливаясь подробно на особенностях приемных блоков ЦП, перечислим их в порядке, указанном на рис. 3. Адаптивный фазовый корректор 9 (автоматический эквалайзер) необходим для выравнивания группового времени задержки и затухания канала связи. Через демодулятор 10 двоичных сигналов, декодер 11 и интерфейсное устройство 12 цифровая информация передается в ЭВМ. Привязку данных к единому времени производит блок 13.

Сравнивая между собой конструктивные особенности двух вариантов аппаратуры ЦП, отметим следующее. Сложность гармонического корректора 9 и интерфейсного устройства 12 цифровой системы соизмерима с подобным показателем блока 12 полосовых фильтров и устройств 16, 19 аналоговой системы. В сторону большей сложности отличаются демодулятор 10 и декодер 11 цифровой системы от блоков 13, 17, 18 системы по рис. 2. Это связано с необходимостью обеспечить достаточно высокую верность передачи цифровой информации по каналу тональной частоты с удельной скоростью 3 бит/(Гц·с), а также с применением восьмиуровневой фазовой модуляции. Таким образом, в данном варианте с учетом затрат на разработку и освоение производства цифровая система обходится дороже без улучшения параметров передачи сигналов.

Положение изменяется, если требуемая скорость передачи данных не превышает 1200 бит/с. В этом случае применяют цифровой модем с частотной модуляцией для асинхронной передачи, когда символу "1" соответствует частота 1300 Гц, символу "0" — 2100 Гц, а нулевая (средняя) частота равна 1700 Гц⁴. Такой несложный модем заменяет блоки 2, 3, 4, 10, 12, 13, 17 аналоговой системы, а блок 9 цифровой системы исключается. Сложность кодека 6, 11 цифровой системы сопоставима с показателями идентичного комплекта блоков 9, 18 аналоговой системы. В целом цифровая система проще.

Учитывая изложенное и привлекая технико-экономические и эксплуатационные показатели известных устройств, можно сделать вывод о нецелесообразности использования аппаратуры передачи данных геофизических наблюдений в аналоговом исполнении, если скорость передачи ограничена сверху величиной 1200 бит/с. Значительное количество геофизической информации можно передавать, не превышая этой скорости. Для усиления этого тезиса приведем числовой пример.

В схеме рис. 3 наиболее простой вариант исполнения кодера — на регистре с обратными связями, декодера — на основе интегральной микросхемы К555ВЖ1, которая предназначена для исправления и обнаружения ошибок передачи данных в 16-разрядном формате по модифицированному коду Хэмминга 16. Вводимая избыточность по объему информации составляет при этом 37,5%. Имея в виду принятое ограничение скорости передачи, темп поступления данных не должен превышать 750 бит/с. Принимая запас 30 бит/с, на один сейсмический канал при трехканальной регистрации приходится 240 бит/с. Чтобы параметры регистрации были не хуже, чем в аналоговой системе с динамическим диапазоном 60 дБ, следует установить разрядность сейсмических данных 11 бит. Это дает возможность осуществлять дискретизацию в темпе 21,8 выборки в секунду. В результате при скорости передачи информации 1200 бит/с высшую частоту передаваемых сейсмических сигналов можно установить в пределах 4–5 Гц для каждой из трех компонент. При передаче сигналов одного вертикального сейсмометра благодаря утроенному темпу выборки можно во столько же раз расширить частотный диапазон. То же достигается путем усложнения кодека и уменьшения избыточности.

Необходимо отметить, что, сохраняя скорость поступления на передачу данных, в цифровой системе с уменьшением темпа выборок можно увеличить разрядность данных, т.е. увеличить динамический диапазон измерений. Такая возможность практически отсутствует в аналоговой системе передачи без компрессии сигналов, если

⁴Рекомендация V. 23 МКК ТТ.

достигнут диапазон около 60 дБ. Следовательно, при частоте сигналов ниже 4–5 Гц в условиях трехкомпонентных измерений цифровой система проще и обеспечивает более высокое качество передачи данных геофизических наблюдений. Применяя каскадное кодирование данных, достигают эффективного исправления не только одиночных, как с наиболее простым кодеком, но и пакетированных ошибок передачи [8].

Из литературы известны попытки совершенствования аналоговых систем передачи с целью придания им свойств, присущих цифровым системам. Например, с целью увеличения динамического диапазона передачи данных до 120 дБ (при разрешающей способности 60 дБ) для трехкомпонентной сейсмической записи авторы работы [14] пошли по пути построения аппаратуры АИП в цифровом исполнении с буферной памятью и автоматической обработкой сигналов для выделения сейсмических событий на уровне фона, что привело к увеличению срока доставки информации. Передача данных по линии связи осуществлена в виде частотно-модулированного колебания, которое формируется синтезатором с разрешающей способностью 0,1%, заменяющим частотный модулятор с непрерывной девиацией. В дальнейшем система передачи данных сохранила структуру, характерную для аналоговых систем.

В работе [15] описана аналоговая система передачи данных, в которой аппаратура ЦП с целью уменьшения погрешностей модифицирована таким образом, чтобы избежать промежуточного этапа аналогового преобразования сигналов [16]. При этом производят цифровое измерение длительностей текущих периодов одновременно трех поднесущих частот по числу компонент сейсмических сигналов АИП. Разнесенные в полосе радиотелефона центральные (нулевые) частоты предварительно нормируют путем кратного деления до номинала 300 Гц при девиации $\pm 20\%$. Ограничением регистрационных возможностей такой системы является динамическая ошибка аналого-цифрового преобразования, длительность которого равна одному периоду и достигает 4 мс на один отсчет. Эффект апертуры ограничивает сверху диапазон частот передаваемых сейсмических сигналов на уровне 1–2 Гц при допускаемой динамической погрешности порядка 1–2%, причем величины эти связаны пропорциональной зависимостью. Такая система передачи данных из-за своего малого быстродействия применима лишь в условиях телесеismicческой обсерватории⁵. Для региональных наблюдений в [17] было предложено ввести каналные следящие множители частот вместо делителей при нормировании поднесущих частот тракта передачи, что позволяет сократить время цифрового измерения периодов из-за уменьшения длительности их. В результате становится возможной передача трех сейсмических сигналов в диапазоне 60 дБ с высшей частотой регистрации 20–30 Гц и приемлемой динамической погрешностью, а система передачи полностью отвечает своему назначению.

Рассматривая цифровые системы сбора геофизических данных, следует указать на то, что организация обмена информацией на полигоне по принципу запрос–ответ с временем передачи сообщений (в том числе квитируемых) в пределах нескольких секунд не столь сильно усложняет аппаратуру радиотелефонной связи по сравнению с режимом одночастотного симплекса, что приводит к необходимости полной обработки сейсмологических данных на АИП. В таком случае система передачи данных утрачивает обсужденную специфику и возникает целесообразность использования типового оборудования для обмена данными в составе территориально распределенного многомашинного информационно-вычислительного комплекса.

⁵ Указанный в [15] диапазон частот сигналов сейсмометров 0–20 Гц не отвечает назначению системы регистрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кевлишвили П.В., Дедов Ю.А. Хрущев С.Н. Обработка информации в региональной системе прогноза землетрясений // Автоматизация сбора и обработка сейсмологической информации. М.: Радио и связь, 1983. С. 48-52.
2. Бунин С.Г., Войтер А.П. Принципы построения вычислительной сети на основе наземной широко-вещательной пакетной радиосвязи // Преобразование, передача и обработка информации в высокопроизводительных микропроцессорных системах. Киев: ИК АН УССР, 1983. С. 59-68.
3. Шарцман В.О., Емельянов Г.А. Теория передачи дискретной информации. М.: Связь, 1979. 424 с.
4. Финкельштейн Е.З. Высокоскоростная передача дискретных сигналов по каналам с ограниченной полосой. Л.: ЛЭИС, 1976. Ч. 1. 107 с.
5. Казанцев В.И. Расчет количества информации аналоговых и аналого-цифровых информационно-измерительных систем с дискретизацией непрерывных измеряемых процессов // Автоматизация измерений и обработки информации. М.: Энергоиздат, 1982. С. 16-20.
6. Фомин А.Ф. Помехоустойчивость систем передачи непрерывных сообщений. М.: Сов. радио, 1975. 352 с.
7. Питерсон У., Узлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. М.: Мир, 1976. 594 с.
8. Блох Э.Л., Зяблов В.В. Обобщенные каскадные коды. М.: Связь, 1976. 240 с.
9. Мановцев А.П. Основы теории радиотелеметрии. М.: Энергия, 1973. 592 с.
10. Сакрисон Д. Лекции по аналоговой связи. М.: Мир, 1974. 165 с.
11. Успенский Б.Г. Совершенствование частотных модуляторов // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 59-64. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)
12. Макдональд Р.К., Годдард М., Шевен Ж.-Л., Карбу П. Однокристалльный 1200 бит/с модем, отвечающий европейскому и американскому стандартам // Электроника. 1983. № 1. С. 80-86.
13. Zegers L.E., Dekker C.B. A comparison of digital transmission techniques for standart FM mobil radio sets // IEEE Trans. Commun. 1977. Vol. 25, N 3. P. 364-368.
14. Ву Та-лианг Тенг, Мин Хсу. A seismic telemetry system of large dynamic range // Bull. of Seism. Soc. of Amer. 1986. Vol. 76, N 5. P. 1461-1471.
15. Мишаткин В.Н. Телеметрическая система сбора геофизической информации // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 86-90. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)
16. А. с. 805222 СССР, МКИ G 01 V 1/22. Устройство для сбора геофизической информации / Н.З. Захарченко, В.Н. Мишаткин, Б.Г. Успенский. № 2744621; Заявл. 29.03.79; Оpubл. 15.02.81, Бюл. № 6.
17. А. с. 1350636 СССР, МКИ G 01 V 1/22. Многоканальное устройство сбора геофизической информации / Б.Г. Успенский. № 4054779; Заявл. 03.03.86; Оpubл. 07.11.87, Бюл. № 41.

УДК 550.34

Н.В. Трифонов

УСТРОЙСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛОЖЕНИЯ МАЯТНИКА СЕЙСМОМЕТРА

Сейсмоприемники с электродинамическим преобразователем смещений маятника в электрический сигнал нашли наиболее широкое применение в сейсмометрии. Однако, несмотря на то что на первый взгляд при работе с преобразователем этого типа положение маятника сейсмоприемника не имеет существенного значения для работы прибора, в целом ряде приборов, в первую очередь в длиннопериодных, разработчик вынужден использовать какие-то, хотя бы простейшие, устройства управления положением маятника. Это вызвано необходимостью компенсировать дрейф маятника, вызванный, как правило, разными причинами и зависимостью параметров маятника от положения равновесия.

В связи с расширением частотного диапазона сейсмометров в низкочастотную область все чаще начинают использоваться параметрические преобразователи: емкостные, ин-

дуктивные, оптические. Такое решение ставит вопрос о стабильности положения маятника еще острее. Это вызвано необходимостью одновременно удовлетворить противоречивые требования по уровню шумов преобразователя, с одной стороны, и максимальному измеряемому смещению — с другой. Так, обеспечив большой коэффициент преобразования, легче получить низкий уровень шумов, но, как правило, это сужает ширину рабочей зоны преобразователя и, значит, повышает требования к стабильности его положения равновесия.

Существует несколько вариантов решения этой задачи [1–8]. Можно выделить устройства дискретного и непрерывного действия. Устройства дискретного действия включают лишь на короткое время оператором или автоматически и обеспечивают сравнительно низкую точность поддержания маятника в "нулевом" положении.

Основой устройства стабилизации непрерывного действия, как правило, является следящая система, включающая, помимо маятника и преобразователя его положения в электрический сигнал, корректирующую цепь и исполнительное устройство.

Структурная схема сейсмоприемника, охваченного петлей обратной связи, стабилизирующей его "нулевое" положение, приведена на рис. 1. На рисунке обозначено: Mp^2 — условно выделенный внутри маятника оператор, преобразующий смещение почвы в силу, действующую на маятник; K_m — коэффициент передачи маятника для силового воздействия; $K_{пр}$ — преобразователь с коэффициентом передачи $K_{пр}$; $K_{о.с}$ — корректирующая цепь с коэффициентом передачи $K_{о.с}$; $K_{м.э}$ — исполнительное устройство с коэффициентом передачи $K_{м.э}$; $S_{о.с}$ — источник шума петли обратной связи со спектральной плотностью $S_{о.с}$.

Работает устройство следующим образом. Под влиянием дестабилизирующих воздействий маятник отклоняется от "нулевого" положения. Это отклонение преобразуется в электрический сигнал, который, пройдя через корректирующую цепь, попадает на исполнительное устройство. Исполнительное устройство воздействует на маятник таким образом, чтобы он вернулся к "нулевому" положению. Параметры корректирующей цепи определяются требованиями к виду амплитудно-частотной характеристики сейсмоприемника в его рабочей полосе частот. В качестве исполнительного устройства широкого распространение получил магнитоэлектрический преобразователь.

В общем виде вопрос о шумах, вносимых петлей обратной связи в сейсмометрический канал, рассмотрен в [9]. Оценим возможности устройства стабилизации, показанного на рис. 1, содержащего в петле обратной связи активные элементы, с учетом шумов, присущих этим элементам и магнитоэлектрическим преобразователям в качестве исполнительного устройства.

Как нетрудно видеть на рис. 1, спектральная плотность шума петли обратной связи $S_{о.с}$, приведенная ко входу сейсмометра, может быть определена с помощью выражения.

$$S_{вх} = \frac{S_{о.с} (K_{м.э} K_{о.с})^2}{(p^2 M^2)^2}, \quad (1)$$

где $S_{вх}$ — спектральная плотность мощности шума петли обратной связи, приведенная ко входу; $S_{о.с}$ — спектральная плотность источника шума в петле обратной связи, а прочие обозначения соответствуют рис. 1. Спектральная плотность микросейсмического шума Земли на частоте 0,03 Гц достигает минимума и составляет примерно 10^{-16} м²/Гц [10]. Следовательно, шум цепи обратной связи, приведенный ко входу сейсмометра, должен составлять не более 10^{-18} м²/Гц. Полученное значение и выражение (1) позволяют установить соотношение между спектральной плотностью шума петли обратной связи, коэффициентами передачи звеньев этой цепи и массой маятника сейсмометра M .

В связи с отсутствием данных о шумах активных элементов в инфранизкочастотном участке частотного диапазона и с целью выбора элементной базы с помощью анализатора спектра СК4-72/2 были проведены экспериментальные исследования шумов интегральных операционных усилителей на низких и инфранизких частотах. На рис. 2 пока-

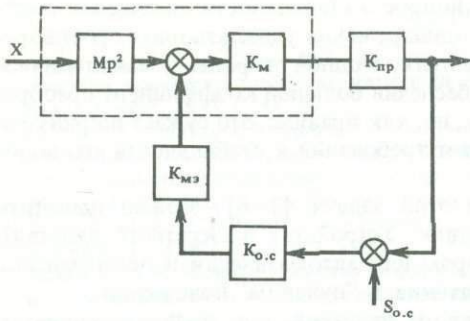


Рис. 1. Структурная схема сейсмоприемника, охваченного петлей обратной связи

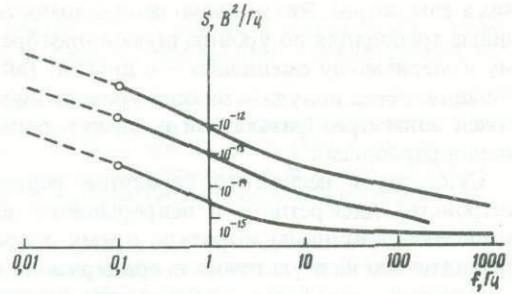


Рис. 2. Спектральные плотности шума микросхем К140УД8, К553УД2 и К544УД1А в инфранизкочастотной области

заны зависимости приведенных ко входу спектральных плотностей мощности шума наилучших экземпляров микросхем серий К544УД1, К553УД2, К140УД8. Надо заметить, что в интересующей нас области крутизна наклона всех кривых близка к 20 дБ/дек, это хорошо согласуется с теоретическими результатами, что дает основание экстраполировать ход кривых в инфранизкочастотной области частот до 0,01 Гц, так как, по данным [11], такой ход зависимости спектральной плотности от частоты сохраняется до частот порядка 10^{-5} Гц.

Как видно из рис. 2, спектральная плотность шума на частоте 0,03 Гц для микросхемы типа 544УД1А составляет около 10^{-11} В²/Гц.

Расчет по выражению (1) для маятника с массой 1,4 кг и магнитоэлектрического преобразователя с коэффициентом передачи 20 Н/А дает максимально возможное значение коэффициента передачи корректирующей цепи, равное $2 \cdot 10^{-5}$ А/В и обеспечивающее желаемое отношение сигнал/шум в сейсмометрическом канале. Учитывая то, что у большинства операционных усилителей максимальное значение выходного напряжения составляет 10 В, легко определить максимальное значение силы, компенсирующей дестабилизирующие воздействия:

$$F = U_M K_{o.c} K_{m.э} = 10 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 20 = 4 \cdot 10^{-3} \text{ [Н]},$$

где F — максимальное значение силы, создаваемой петлей обратной связи; U_M — максимальное значение выходного напряжения операционного усилителя; $K_{o.c}$ и $K_{m.э}$ — коэффициенты передачи корректирующей цепи и магнитоэлектрического преобразователя.

Таким образом, данная система стабилизации способна подавлять дестабилизирующие воздействия, составляющие не более $3 \cdot 10^{-4}$ от силы тяжести, действующей на маятник.

В ряде случаев такого диапазона оказывается недостаточно для надежной работы сейсмоприемника. Указанный недостаток может быть устранен использованием в качестве исполнительного устройства в дополнение к описанному выше исполнительного механизма, содержащего двигатель и червячную пару винт—гайка, с помощью которой в существенно более широких пределах можно управлять положением равновесия маятника [4]. Указанное устройство было реализовано в сейсмической станции ВЧСС, разработанной в ОКБ ИФЗ. Благодаря наличию автоматической системы обслуживающему персоналу не требовалось вмешиваться в работу сейсмоприемника в течение 6 лет. Достигнутый результат представляется очень ценным для создания автономных, необслуживаемых приборов.

Надо заметить, что использование этого технического решения в малогабаритной аппаратуре наталкивается на трудности, связанные с миниатюризацией исполнительного механизма, двигателя, редуктора.

Возможность решения задачи открывает использование в качестве исполнительного устройства ртутного интегратора [12], установленного на маятнике сейсмометра. Такой путь позволяет отказаться от громоздкого исполнительного механизма, отпадает необходимость в применении магнитоэлектрического преобразователя в петле стабилизирующей обратной связи.

Работает устройство следующим образом. Под влиянием дестабилизирующих воздействий маятник отклоняется от "нулевого" положения. Это отклонение преобразуется в электрический сигнал и через управляемый источник тока подводится к ртутному интегратору. Протекание тока через интегратор вызывает перенос ртути с одного его электрода на другой, что приводит к перераспределению массы ртути внутри ампулы интегратора и, значит, к изменению момента сил, действующих на маятник сейсмометра, и, как следствие, к изменению его положения равновесия. Так как переносимая масса ртути пропорциональна интегралу от прошедшего тока, а постоянная интегрирования существенно больше периода собственных колебаний маятника сейсмометра, получается астатическая автоматическая система стабилизации, характеризующаяся нулевой статической ошибкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнирман Г.Л. Астазирование маятников. М.: Наука, 1982. 165 с.
2. Овсянников Г.А. К модернизации систем вывешивания маятников сейсмометров // Сейсмические приборы; Вып. 10. М.: Наука, 1977. С. 87-93.
3. Рыков А.В., Архангельский В.Т., Забелин В.М. и др. Длиннопериодная широкополосная сейсмостанция СДШ // Регистрация и обработка информации в сейсмологии. М.: Наука, 1983. С. 28-33. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
4. Рыбкин И.С. Автоматическая система стабилизации и компенсации нулевого положения маятника сейсмометра // Инструментальное изучение сейсмических колебаний. М.: Наука, 1983. С. 121-124. (Сейсмические приборы; Вып. 16.)
5. Рыков А.В., Забелин В.М., Власов В.И. Сейсмическая станция "Волна" // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 22-29. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)
6. Рыбкин И.С., Трифонов Н.В. Вопросы построения сейсмической станции ССМ // Инструментальное изучение сейсмических колебаний. М.: Наука, 1984. С. 125-128. (Сейсмические приборы; Вып. 16.)
7. Рыбкин И.С. Автоматизированная сеймонаклономерная станция // Регистрация и обработка информации в сейсмологии. М.: Наука, 1983. С. 173-176. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
8. Овсянников Г.А. Двухзонные системы автоматической коррекции положения равновесия маятников сейсмометров // Там же. С. 55-61.
9. Трифонов Н.В. Вопросы построения чувствительной сейсмометрической аппаратуры // Исследования по сейсмологии. М.: Наука, 1988. С. 3-10. (Сейсмические приборы; Вып. 20.)
10. Бат Маркус. Спектральный анализ в геофизике: Пер. с англ. М.: Недра, 1980. 535 с.
11. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах: Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 399 с.
12. А.с. 898525 СССР, МКИ Н 01G9/22. Ртутный интегратор И.Г. Щигорев, А.А. Кузьмин. № 2926274/18-10; Заявл. 16.05.80; Опубл. 15.01.82, Бюл. № 2.

ПОДГОТОВКА АППАРАТУРНОГО КОМПЛЕКСА АСС-6/12-ВСС-6 К ПРОВЕДЕНИЮ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

В Институте сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Таджикской ССР проводятся работы по регистрации землетрясений малых энергий в районе строящейся Рогунской ГЭС. Сейсмометрические наблюдения осуществляются комплексом аппаратуры, включающим автономные сейсморазведочные станции АСС-6/12 и станцию воспроизведения ВСС-6 [1]. В настоящей работе рассматриваются вопросы повышения работоспособности комплекса, оценки динамического диапазона каналов регистрации, экспериментального определения амплитудно-частотных характеристик.

Рассмотрим канал в соответствии с его структурной схемой.

Сейсмометр. Станции записи укомплектованы сейсмометрами СК-1П. Сопоставление результатов неоднократного определения постоянных позволило установить значительную нестабильность параметров, обусловленную конструктивными особенностями этого типа сейсмометров. Поэтому в системе сейсмометрических наблюдений используются сейсмометры СМ-3 [2], имеющие более высокие метрологические характеристики.

Сопrotивление рабочих обмоток R_S этих сейсмометров составляет 50–60 Ом. С целью увеличения отдачи приборов по напряжению и согласования с усилителями записи катушки перематывались проводом ПЭВ-2 диаметром 0,06 мм до значений $R_S = 2300$ Ом.

Интегрирующий усилитель записи перед установкой проходит проверку, которая включает в себя: экспериментальное определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в диапазоне 1–20 Гц, контроль уровня шумов на выходе усилителя (не более 10–15 мВ), отсутствие возбуждения в течение длительного времени работы, способность нормального функционирования при уменьшении напряжения питания от номинального на 15%, контроль времени выхода усилителя на номинальный режим работы после включения питания (не более 60–80 с).

Интегрирующий усилитель воспроизведения нуждается в тщательной регулировке, правильность которой контролируется определением АЧХ перед каждым циклом воспроизведения. Поэтому на монтажной плате, смонтированной в стойке ВСС-6, собран генератор электрических колебаний с фиксированными частотами и формирователь интервалов времени. С помощью формирователя последовательно на 1 с на вход усилителя воспроизведения подается напряжение частотой 100, 200, 400, 800 и 1600 Гц, которое регистрируется светолучевым осциллографом. По форме огибающей записанного сигнала оценивается АЧХ тракта воспроизведения и при необходимости производится ее коррекция.

Аттенюатор. Поскольку тракт запись-воспроизведение калибруется лишь на одном положении аттенюатора, а чувствительность канала на его других позициях определяется с учетом закругления, то это звено может служить источником систематических ошибок. Действительно, установленный заводом-изготовителем делитель напряжения, электрическая схема которого показана на рис. 1, а, имеет ряд недостатков. Так, например, в схеме делителя используются резисторы не с точными значениями сопротивлений, которые необходимы для осуществления деления сигнала в заданное число раз, а с их ближайшими значениями по шкале ГОСТа. Далее, при ослаблении сигнала на 3 дБ, резистор $R_{вх}$ шунтирует резистор R_{19} , внося погрешность около 10%, а при ослаблении на 6 дБ и более резисторы R_3-R_9 и R_{10} шунтируют резистор R_2 , внося погрешность до 15%. И наконец, из-за недостаточной внимательности оператора при занесении установленных закруглений в специальный журнал ошибка может достигать 300–400%.

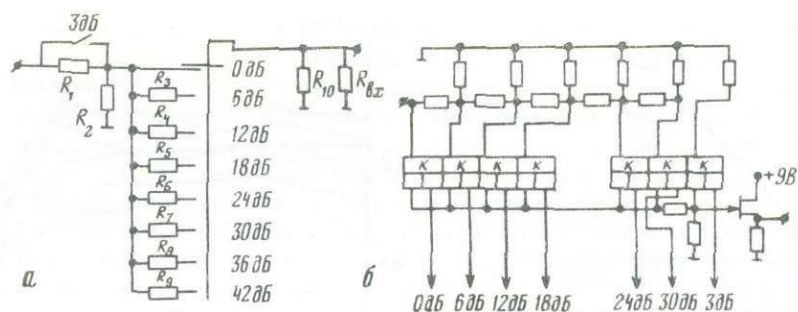


Рис. 1. Принципиальная схема аттенюатора станции воспроизведения ВСС-6 (а) и делителя напряжения на аналоговых ключах (б)

Специально собранное устройство, состоящее из матрицы низкоомных высокочастотных резисторов (рис. 1, б), электронных ключей для их коммутации и блока управления, позволило задавать точное значение ослабления по всем каналам и документировать его в виде последовательного кода на сейсмограмме.

Гальванометр светолучевого осциллографа. Собственная частота и затухание гальванометра должны быть такими, чтобы обеспечить полосу пропускания 50–2000 Гц (с учетом трансформации спектра частот при воспроизведении сигнала). Нами используются гальванометры типа М001.5, частота собственных колебаний которых составляет 3400 Гц.

Для сейсмометров СМ-3 динамический диапазон регистрации колебаний составляет $2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^3$ мкм, или 70 дБ [3, 4]. В свою очередь, амплитуды колебаний почвы, запись которых необходимо обеспечить, находятся в диапазоне $10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$ мкм. Поэтому ниже остановимся на определении динамического диапазона только блоков усиления и регистрации.

Непосредственная аналоговая запись на магнитную ленту обуславливает появление специфических мультипликативных шумов, влияние которых проявляется только при наличии сигнала. Поэтому определение уровня аддитивных шумов на эквивалентном сопротивлении является недостаточным для оценки нижней границы динамического диапазона. Последнее станет еще более очевидным, если учесть, что уровень мультипликативных шумов значительно выше аддитивных. Напряжение входного сигнала, при котором уже можно пренебречь мультипликативными шумами, определялось экспериментально, путем записи и воспроизведения гармонического сигнала разного уровня с частотой 2 Гц. Визуальный анализ позволил установить, что влиянием мультипликативных шумов можно пренебречь, если амплитуда входного сигнала $U_{вх} \geq 8$ мкВ.

Оценим коэффициент передачи (S_T) тракта запись-воспроизведение, учитывая, что амплитуда записи на сейсмограмме составляет 8 мм: $S_T = A_{зап} / U_{вх} = 1000$ м/В. Поскольку коэффициент передачи сейсмометра на этой частоте составляет 1000 В/м, то максимальное увеличение всего канала с учетом уровня шумов будет $V_K = S_T \cdot S_c = 10^6$. Отметим, что в конкретных условиях регистрации высокий уровень сейсмических помех ограничивает возможности использования максимальных увеличений.

Верхняя граница динамического диапазона определялась следующим образом. На вход интегрирующего усилителя записи подавался сигнал с частотой 2 Гц, амплитудой 8 мкВ и производилась запись. При каждом очередном сеансе записи амплитуда сигнала удваивалась, вплоть до значения 256 мкВ. Зависимость амплитуды воспроизведенного сигнала от напряжений на входе представлена на рис. 2. Нетрудно заметить, что линейность в передаче амплитуды сигнала сохраняется до значений 100–128 мкВ, что составляет 21–24 дБ по шкале ослаблений. Использование при воспроизведении сейсмического сигнала всей шкалы ослаблений может привести к существенным искажениям его амплитуды.

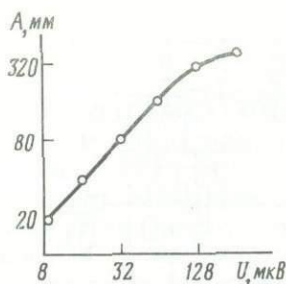


Рис. 2. Зависимость амплитуды воспроизведения сигнала от напряжения на входе усилителя записи

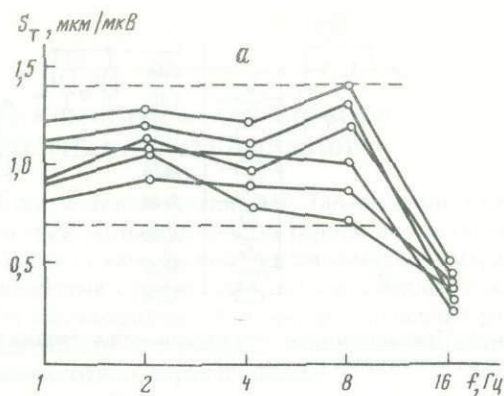
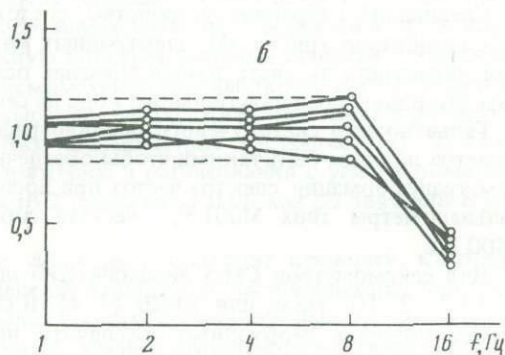


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики тракта запись-воспроизведение без учета (а) и с учетом амплитуды опорного сигнала (б)



В процессе подготовки аппаратуры были опробованы следующие экспериментальные способы определения АЧХ: сквозная калибровка каналов генераторным методом, калибровка с применением виброплатформы, сочетание этих двух методов, когда АЧХ сейсмометра определяется на виброплатформе, а остальная часть тракта запись-воспроизведение с помощью генератора. Сопоставление результатов позволило отдать предпочтение последнему, так как, не уступая в точности, он дает возможность наиболее просто осуществить массовую калибровку каналов регистрации.

Неоднородность рабочего слоя магнитной ленты по длине, случайные изменения неконтакта, динамические перекосы ленты и нестабильность конструктивных элементов приводят к флуктуации коэффициента передачи каналов [5]. Чтобы выявить возможный диапазон изменения этого коэффициента, проводилось многократное определение частотной характеристики. Для этого изготовлен специальный блок калибровки, состоящий из генератора электрических колебаний с фиксированными частотами, формирователя интервала времени и выходного аттенюатора. На вход интегрирующего усилителя записи последовательно подаются сигналы с частотой 1, 2, 4; 8 и 16 Гц в течение одной минуты каждый. Аттенюатор обеспечивает возрастание сигнала пропорционально частоте, а его абсолютные значения соответствуют напряжениям, генерируемым сейсмометром при записи местных слабых землетрясений. После 6–10 сеансов записи, равномерно распределенных по длине магнитной ленты в кассете, производится их воспроизведение. Затем на осциллограмме на интервале 30 с измеряется средний размах колебаний и для каждой частоты рассчитывается отношение

$$S = 2A/2U.$$

Результаты определения АЧХ тракта для скорости записи 0,5 мм/с приводятся на рис. 3, а. Принимая во внимание, что при достаточно ограниченном числе эксперимен-

тов реализовались не все возможные значения коэффициента передачи, зона возможных его флуктуаций в рабочем диапазоне частот 1–10 Гц оконтуривалась прямыми, проведенными параллельно оси частот через точки максимального и минимального значений этого коэффициента, полученного в экспериментах. Предполагая, что флуктуации коэффициента передачи представляют собой стационарный случайный процесс и распределены по закону, близкому к нормальному, определялось его среднее значение (V_{cp}). Флуктуации коэффициента усиления составляют $\pm 40\% V_{cp}$.

Одним из возможных методов повышения точности записи является корректировка коэффициента увеличения в соответствии с амплитудой сигнала опорной частоты, записываемого на магнитную ленту по служебному каналу. Опорный сигнал вырабатывается в формирователе кода времени АСС-6/12 от кварцевого термостатированного генератора и имеет поэтому стабилизированные амплитуду и частоту. Дрейф магнитной ленты относительно головок и изменение параметров ленты по длине рулона вызовут и изменение амплитуды опорного сигнала. Поэтому если при определении частотных характеристик рассчитать удельное усиление, которое приходится на единицу амплитуды опорной частоты ($A_{0,ч}^{(1)}$), как $V_{уд} = V/A_{0,ч}^{(1)}$, то при воспроизведении записей и землетрясений действительное увеличение определится как $V_d = V_{уд} A_{0,ч}^{(2)}$. Здесь $A_{0,ч}^{(2)}$ — амплитуда опорного сигнала при воспроизведении конкретного сейсмического события. На рис. 3, б приводятся скорректированные частотные характеристики. Корректировка позволила более чем в 2 раза уменьшить зону флуктуаций коэффициента увеличения.

Для сопоставления записей на одной из сейсмических станций регистрация землетрясений осуществлялась двумя комплектами аппаратуры — короткопериодным сейсмографом (СКМ-3 + ГБ-IV-C-10), обеспечивающим запись колебаний с увеличением $25 \cdot 10^3$ в диапазоне частот 1–40 Гц, и станцией АСС-6/12. Сейсмометры этих комплектов установлены в специальной подземной выработке на общем бетонном постаменте. Для сопоставления было отобрано 196 записей землетрясений с энергетическим классом (К) $4,5 \leq K \leq 6,5$ и $S-P \leq 5$ с.

Существенно разные коэффициенты увеличений каналов регистрации и скорости протяжки носителей делают практически невозможным сравнение их на основе спектрального анализа колебаний. Более того, даже качественное визуальное сопоставление сопряжено со значительными трудностями. Поэтому вначале для каждой записи по номограмме Т.Г. Раутиан определялся энергетический класс землетрясений $K_{СКМ-3}$ и $K_{АСС-6/12}$. Затем, учитывая высокую точность определения АЧХ каналов регистрации с аналоговой фотозаписью и их стабильность во времени, значение $K_{СКМ-3}$ принималось за опорное и рассчитывалась ошибка $\Delta K = K_{СКМ-3} - K_{АСС-6/12}$. Далее составляется статистический ряд в виде гистограммы. Анализ гистограммы показал, что в диапазон ошибок $-0,25 \leq K \leq +0,25$ попадает около 80% рассмотренных землетрясений. Занижение класса землетрясений до -1 объясняется прежде всего тем, что "завал" частотной характеристики каналов АСС-6/12-ВСС-6 для принятой скорости протяжки магнитной ленты происходит на 10 Гц, тогда как на каналах СКМ-3 + ГБ-IV — на 40–50 Гц. Поэтому если в максимальных амплитудах регистрируемых волн (обычно это землетрясения с $S-P \leq 1,5$ с) преобладают частоты выше 10 Гц, то соответствующие амплитуды записи уменьшаются. Завышение класса до $+1$, как показал детальный анализ сейсмограмм, происходит из-за нечеткого вступления объемных волн и связан с трудностями выделения их первых вступлений.

Следовательно, замена сейсмометров СК-1П на СМ-3, тщательная настройка всех элементов тракта запись-воспроизведение, уточнение его динамического диапазона и корректировка коэффициента усиления по амплитуде сигнала опорной частоты позволяют обеспечить определение энергетических классов местных слабых землетрясений с достаточной для практики точностью.

1. Брулев Ю.В., Крылов Г.Г., Нерсесов И.Л. и др. Аппаратура для региональных сейсмических исследований // Инструментальные средства сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1980. С. 138–153. (Сейсмические приборы; Вып. 13.)
2. Токмаков В.А. Сейсмометр СМ-3 // Сейсмические приборы; Вып. 8, М.: Наука, 1979. С. 13–18.
3. Токмаков В.А., Власов В.И. О развитии сейсмометра СМ-3 и его возможностях // Инструментальное изучение сейсмических колебаний. М.: Наука, 1984. С. 3–7. (Сейсмические приборы; Вып. 16.)
4. Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К. и др. Опыт исследования нелинейных искажений сейсмометров // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 134–138. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)
5. Справочник по технике магнитной записи / Под ред. О.В. Порицкого, Е.Н. Травникова. Киев: Техника, 1981. 319 с.

УДК 550.34

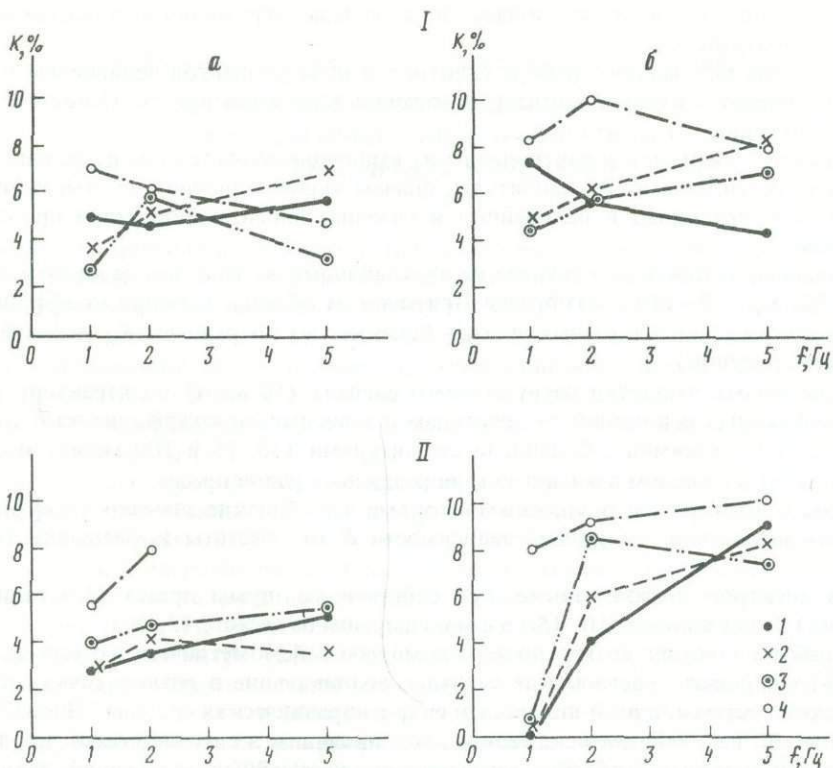
*В.А. Будников, А.А. Володин, Э.И. Зеликман,
Н.К. Капустян, А.М. Поликарпов*

ОПЫТ ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИМ КАНАЛОМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГИДРАВЛИЧЕСКОГО ПРЕССА

При исследовании процессов излучения сейсмической энергии под действием геодинамических процессов важное место занимают эксперименты с образцами горных пород под давлением. Такие опыты ведутся на прессах различных конструкций. Электрогидравлическая система "Инова", работу которой мы изучали, позволяет задавать различные режимы нагружения, в том числе давление, изменяющееся во времени (импульсный, гармонический режимы), и тем самым моделировать эффекты прохождения сейсмического сигнала в реальной горной породе. Цель экспериментов состояла в исследовании механического воздействия, создаваемого прессом "Инова", в проработке способов контроля сигнала с определением коэффициента нелинейных искажений. Мы рассматривали гармонический режим задания нагружения для детального анализа сигнала на каждой частотной составляющей и возникающих искажений.

Электрогидравлический пресс "Инова" снабжен системой контроля нагружающего воздействия, включающей несколько пьезодатчиков, регистрирующих ускорение и расположенных в разных частях пресса. Система контроля ориентирована на реализацию обратной связи при управлении нагружением для поддержания постоянной нагрузки при разрушении образца. При моделировании с помощью пресса эффектов прохождения сейсмического сигнала через образец существующая система контроля характеризуется следующими ограничениями: датчики ориентированы на высокие частоты, неясна их тарировка и сложно осуществлять калибровку в процессе эксперимента; датчики установлены стационарно и трудно получить сигнал в нужной точке пресса, в частности нет датчиков непосредственно на верхней и нижней плитах пресса. Все эти трудности по исследованию механического воздействия пресса позволяют избежать использования сейсмометрического канала, ориентированного на те же частоты, что и гармонический режим нагружения (1–5 Гц).

Сейсмометрический канал состоял из сейсмометра СМ-3, предусилителя и регистрирующей части — автономной ЧМ-станции [1] с записью сигнала в частотно-модулированном виде на бытовой магнитофон, при воспроизведении сигнал демодулировался;



Зависимость коэффициента нелинейных искажений сейсмических сигналов, зарегистрированных на нижней (а) и верхней (б) плитах пресса, от частоты

Амплитуды смещения (мкм): I - 100; 2 - 75; 3 - 50; 4 - 10; высота штока (мм): I - 15; II - 34,5

полоса частот 0,5–20 Гц. ЧМ-станция может быть заменена спектром-анализатором. Используемый канал регистрации хорошо изучен: разработаны методы калибровки с заданной точностью [2], исследован коэффициент нелинейных искажений

$K = \left(\sum_{i=1}^N A_i^2 \right)^{0,5} / A_0$, где A_0 - амплитуда сигнала на основной частоте, A_i - амплитуда обертона.

Показано, что основной вклад в нелинейные искажения вносит сейсмометр; используемый тип сейсмометра (СМ-3 изготовления ОКБ ИФЗ АН СССР) при амплитудах подаваемых сигналов 2 мм дает максимальные нелинейные искажения при частоте 1 Гц, $K = 0,5\%$ [3]. Эта величина определяет точность полученных на прессе результатов.

При исследовании гармонического режима работы пресса подавались механические воздействия по сетке частот 1, 2, 5 Гц с амплитудами смещений 10, 50, 75 и 100 мкм (по данным системы контроля). Анализировались сигналы, зарегистрированные на верхней и нижней плитах пресса с зажатым образцом (начальный пригруз 5 т) и без образца; рассматривались варианты поднятой и опущенной нижней плиты (положения штока 34,5 и 15 мм соответственно). Записи с сейсмометрического канала вводились в спектр-анализатор, в полученных спектрах оценивались величины амплитуд основного тона и обертонов, по которым рассчитывался коэффициент нелинейных искажений. На рисунке приведены результаты расчета коэффициента нелинейных искажений для сейсмических сигналов, зарегистрированных на верхней и нижней плитах пресса, в зави-

симости от частоты и амплитуды подаваемого сигнала нагружения на зажатый образец при разной высоте штока.

Сопоставление полученного набора спектров и коэффициентов нелинейных искажений демонстрирует сложную картину искажений в сигнале пресса. Основные черты картины следующие.

1. Количество обертонов и соотношение их амплитуд меняются при изменении частоты подаваемого сигнала и его амплитуды, причем явной тенденции не отмечается. Это говорит о том, что вклад в нелинейные искажения вносит набор узлов пресса и их взаимосвязь.

2. Нелинейные искажения в сигнале на верхней плите больше, чем на нижней, причем $K_H = 2-12\%$, $K_B = 2-150\%$ без образца. При зажатом образце значения коэффициентов нелинейных искажений на разных плитах близкие, но не равные: $K_H = 3-8\%$, $K_B = 0-10\%$ (см. рисунок).

3. Режим малых амплитуд нагружающего сигнала (10 мкм) по характеру распределения нелинейных искажений по обертонам и зависимости коэффициента K от частоты отличается от режимов с большими амплитудами (50, 75 и 100 мкм), что также свидетельствует о сложном взаимодействии различных узлов пресса.

4. Работа с поднятым и опущенным штоками дает близкие значения коэффициента нелинейных искажений, но разные зависимости K от частоты и смещений (см. рисунок).

Анализ спектров показал также, что собственные шумы пресса (без включения нагружения) лежат в полосе 10–15 Гц с максимумом на частоте 13,2 Гц.

Опыт работы показал возможность с помощью сейсмометрического канала оперативно контролировать сейсмические сигналы, возникающие в разных точках сложной механической системы, какой является электрогидравлическая система "Инова". Получены данные по нелинейным искажениям, возникающим в сигнале пресса при задании гармонического режима работы; коэффициент нелинейных искажений зависит от частоты и амплитуды подаваемого сигнала и колеблется в пределах не более 10% (при зажатом образце). Результаты по прессу представляются интересными для разработчиков "Инова": задав более детально сетку частот и смещений и располагая сейсмометр в разных точках пресса, возможно детально исследовать вклад разных узлов пресса в формирование подаваемого на образец сигнала. Не менее важны полученный результат и опробованная методика контроля сигнала и для экспериментаторов-геофизиков, особенно при постановке тонких лабораторных экспериментов по переработке энергии реальной средой и сейсмическому излучению при деформирующих среду воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К. и др. Опыт изучения спектрального состава микросейсм // Геофизические и геодинамические исследования на северо-востоке Балтийского щита. Апатиты: Изд. Кол. фил. АН СССР, 1982. С. 56–74.
2. Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К. и др. Корреляционный способ калибровки сейсмометрических каналов // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1983. С. 121–123. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
3. Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К. и др. Опыт исследования нелинейных искажений сейсмометров // Разработка и исследование сейсмометрической аппаратуры. М.: Наука, 1985. С. 134–138. (Сейсмические приборы; Вып. 17.)

СВЕРХДЛИННОПЕРИОДНЫЙ ФИЛЬТР И ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В последнее десятилетие в сейсмометрии имеет место тенденция к охвату при наблюдениях в телесеismicком диапазоне эпицентральных расстояний практически всего спектра сейсмических колебаний от 0,0003 до 10 Гц. Повышенный интерес вызывают области частот 0,0005–0,001 Гц, при которых одновременно проявляются инерционные и гравитационные эффекты сфероидальных колебаний Земли. Для наблюдений в указанной пограничной области частот используется инфранизкочастотный фильтр, который был подключен к выходу длиннопериодного помехозащищенного вертикального сейсмометра [1].

На рис. 1 дана схема фильтра, выполняющего функцию двойного интегрирования в полосе частот от 0,00025 Гц и выше. График 1 на рис. 1 соответствует амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) сейсмографа, содержащего в тракте усиления данный фильтр. График 2 представляет АЧХ исходного сейсмографа без фильтра. По оси ординат отложена частота в герцах, по оси абсцисс – увеличение сейсмографа. С уменьшением частоты после 0,001 Гц происходит плавный переход характеристики сейсмометра к характеристике гравиметра [2]. В диапазоне частот 0,1–0,001 Гц участки графиков получены экспериментально генераторным методом, для частот ниже 0,001 Гц графики получены расчетным путем и обладают в этой области частот меньшей степенью доверия. Экспериментальная часть кривых определена с точностью до 20%, в расчетной ошибка может достигать 50%. Расчет подтвержден наблюдениями переходных процессов при импульсных воздействиях на сейсмограф.

Сейсмограф установлен в подвальном помещении здания Института физики Земли АН СССР. Поэтому в дневное время сейсмограф пишет в основном помехи антропогенного характера. В ночное время уровень помех уменьшается в 5–10 раз и составляет в пересчете на ускорение с двойной амплитудой минимально 0,03 мкГал и максимумом 0,1 мкГал для периодов более 60 мин, что согласуется с данными других авторов [3, 4], полученными с помощью другой аппаратуры и в других местах наблюдений. С ростом частоты амплитуда ускорений помехи снижается. Были выполнены непрерывные предварительные наблюдения вертикальных колебаний в течение 3 мес. За время наблюдений произошло несколько заметных сейсмических событий. Любопытна запись Албанского землетрясения 9.01.88 г. с магнитудой $M = 6,0$, происшедшего в ночное время, что благоприятствовало получению записи сигнала на умеренном ночном фоне помех. На рис. 2, б представлен участок сейсмограммы, полученной с помощью сейсмографа, имеющего АЧХ (кривая 2, см. рис. 1). Отчетливо видны сверхдлиннопериодные колебания с амплитудой на записи 3–4 мм и с периодом около 24 мин, которые следуют за землетрясением. Однако момент возникновения колебаний не ясен. Очевидно, что первый максимум проявился примерно через 36 мин после вступления волны P , но не исключено, что начало движения в сверхдлиннопериодном цуге возникло за 3 мин до вступления волны P . Эти оценки времени проведены по сейсмограмме и не относятся ко времени в очаге. На соответствующем участке записи сейсмографа с фильтром (см. рис. 2, в) волны с периодом 24 мин выделены с большей амплитудой, но, к сожалению, их конец совпал с помехой, имеющей большую амплитуду (период помехи более 60 мин).

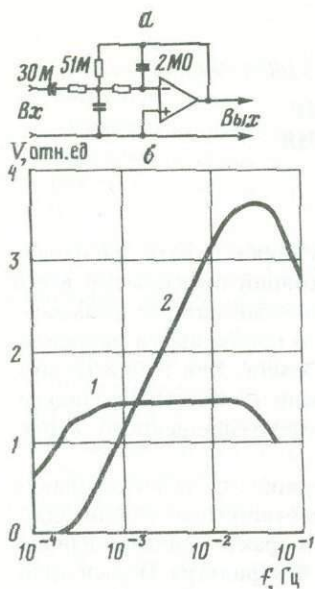


Рис. 1. Схема сверхдлиннопериодного фильтра (а) и АЧХ (б) 1 — с фильтром; 2 — без фильтра

Анализу подвергнута запись длительностью 10 ч в момент и после землетрясения на Аляске 30.11.87 г. с магнитудой $M = 7,6$ (см. рис. 2, а) и запись длительностью 60 ч ночного и дневного фона при отсутствии сильных землетрясений, которая была получена в нерабочие дни. На записи можно видеть вступления максимальных фаз поверхностных волн, после чего в результате нелинейных искажений в тракте усиления сейсмографа произошло смещение нуля фильтра, которое завершилось переходным процессом в фильтре. На трассе записи видны многократные волны P с периодами 4–9 мин. Результаты оцифровки с временным шагом $\Delta t = 6$ мин показаны на рис. 3: а — запись землетрясения со 102 отсчетами и б — запись фона с 597 отсчетами. По оси абсцисс показаны номера отсчетов k , а по оси ординат — значения отсчетов x_k . При этом оказалось, что на выбранных длительностях отслеживания сигнала тренд (дрейф)

практически отсутствует и не превышает точности отсчета, т.е. смещение нуля-пункта фильтра пренебрежимо мало.

Были произведены оценки спектральной плотности мощности $S(f)$ от частоты f записей (см. рис. 3, а, б). Для этого использован метод максимальной энтропии [5, 6], в основе которого лежит представление временного ряда $x_k = x(t_k)$ с помощью модели авторегрессии. Именно полагается, что значения x_k удовлетворяют разностному уравнению

$$x_k = \sum_{j=1}^M a_j x_{k-j} + \epsilon_k, \quad (1)$$

где a_j — коэффициенты авторегрессии; M — порядок модели; ϵ_k — независимые гауссовские случайные числа с дисперсией σ_ϵ^2 (белый шум). Уравнение (1) можно рассматривать как уравнение линейного прогноза x_k по M предыдущим отсчетам ряда. В этом случае ϵ_k выступает в роли остаточных ошибок прогноза. Полагая, что наблюдаемый ряд x_k адекватно описывается моделью авторегрессии, $S(f)$ можно выразить [5] через a_j и дисперсию σ_ϵ^2 :

$$S(f) = \frac{\Delta t \sigma_\epsilon^2}{\left| 1 - \sum_{j=1}^M a_j e^{-i2\pi f j} \right|^2},$$

где Δt — шаг отсчета временного ряда x_k ; $F_N = 1/(2 \Delta t)$ — частота Найквиста, при этом $0 \leq f \leq F_N$. Практически под адекватным описанием подразумевается ситуация, когда по N отсчетам наблюдаемого ряда x_k можно так подобрать M коэффициентов a_j , чтобы M было существенно меньше N , а остаточные ошибки ϵ_k были независимы и имели дисперсию σ_ϵ^2 существенно меньшую, чем σ_x^2 . При этом становятся малыми ошибки оценивания a_j и, следовательно, $S(f)$. Следует отметить, что оценка $S(f)$ методом максимальной энтропии весьма эффективна при наличии в ряде $x_k = x(t_k)$ квазигармонических составляющих при высоких отношениях сигнал/шум, но при низких отношениях сигнал/шум (что имеет место в нашем случае) применение этого метода должно производиться с осторожностью. Варьируя параметр M , т.е. меняя порядок модели, мы

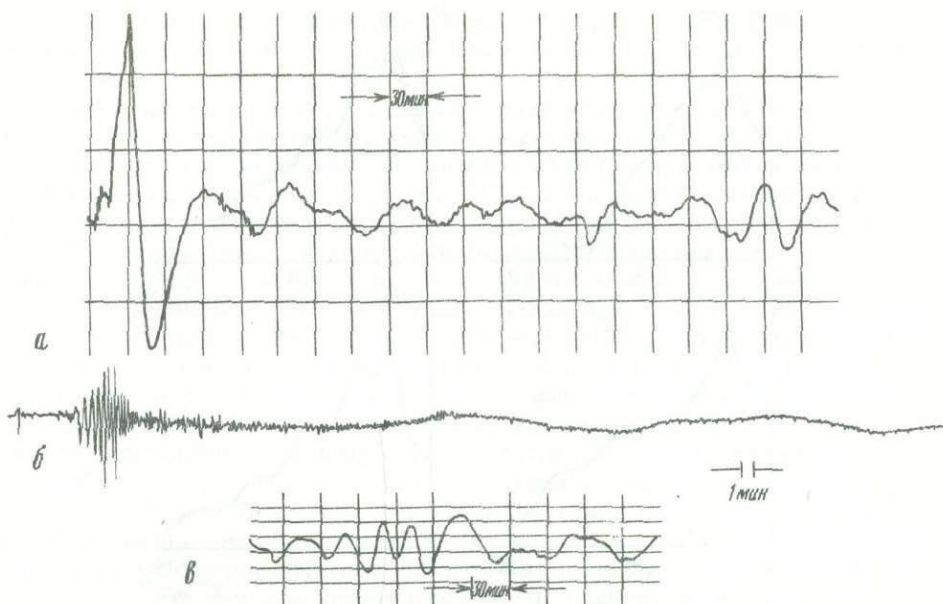


Рис. 2. Записи фрагмента землетрясений

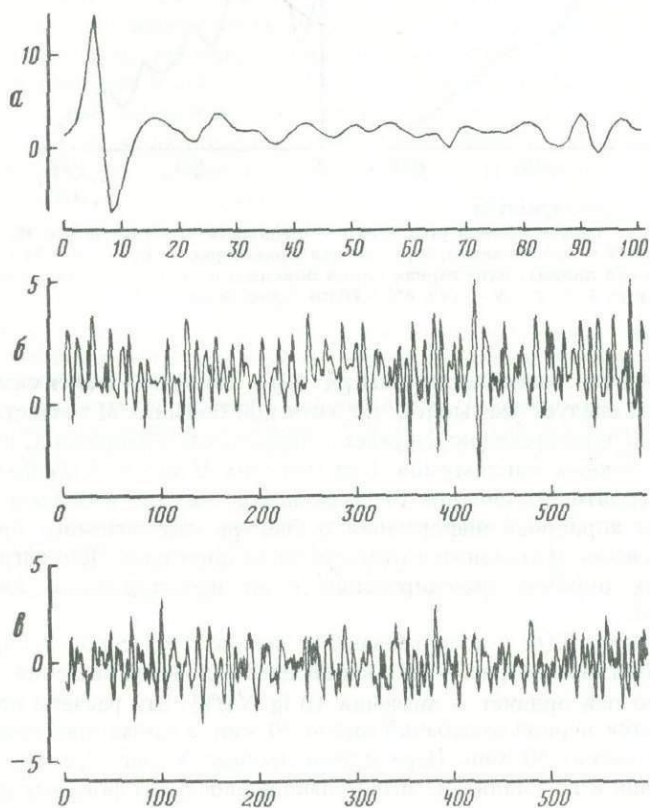


Рис. 3. Кривые, построенные по значениям дискретных показаний сейсмографа
a — запись на рис. 2, *a*; *б* — фон длительностью 60 ч; *в* — искусственно построенная сейсмограмма длиной в 600 отсчетов, соответствующая варианту рис. 4, *г* ($M_I=10$)

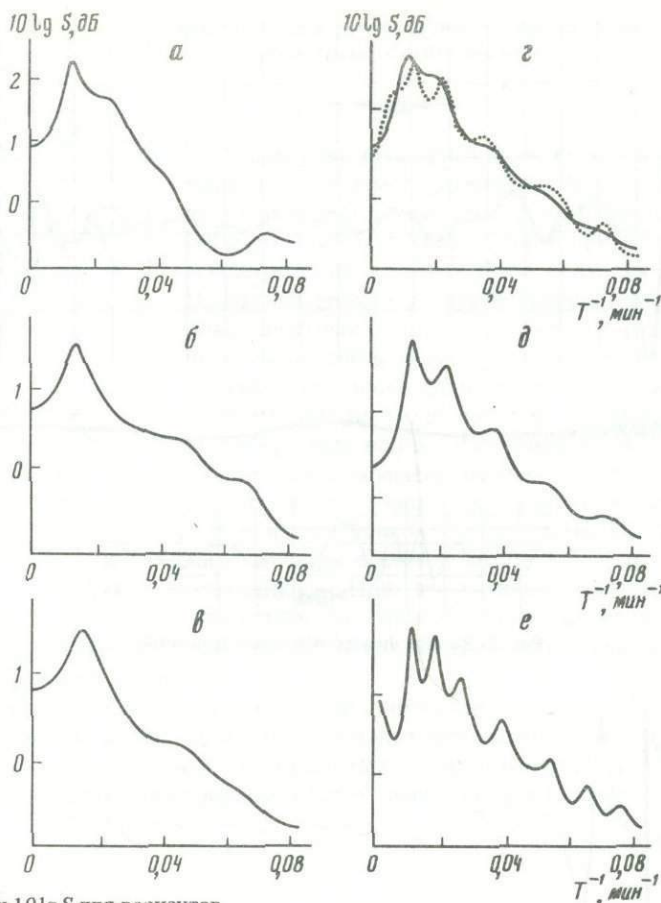


Рис. 4. Графики $10 \lg S$ для вариантов

$a - N = 102, M_1 = 10$ для кривой рис. 3, a ; $б -$ первые $N = 100$ отсчетов, $M_1 = 10$ для кривой рис. 3, $б$; $в -$ первые $N = 300$ отсчетов, $M_1 = 10$ для кривой рис. 3, $б$; $г - N = 597, M_1 = 10$ для кривой рис. 3, $б$ (сплошная линия), пунктирная линия пояснена в тексте; $д -$ последние 297 отсчетов, $M_1 = 10$ для кривой рис. 3, $б$; $е - N = 597, M_2 = 20$ для кривой рис. 3, $б$

меняем разрешающую способность оценки $S(f)$ методом максимальной энтропии. С другой стороны, следует учитывать, что хотя при больших M возрастает разрешение по частоте, однако одновременно снижается надежность оценивания, проявляющаяся в возникновении ложных максимумов. При меньших M оценка $S(f)$ более достоверна, но повышается вероятность слияния близких пиков спектра в единый пик. Поэтому, когда отсутствует априорная информация о спектре наблюдаемого процесса, выбор оптимального значения M становится ответственной операцией. Для наглядной иллюстрации возможных ошибок моделирования нами использовались два значения — $M_1 = 10$ и $M_2 = 20$.

Результаты расчетов $S(f)$ с использованием числовых массивов x_k , представленных на рис. 3, $a, б$, показаны на рис. 4 (по оси абсцисс отложены значения частот в обратных минутах, а по оси ординат — значения $10 \lg S(f)$). Эти расчеты показывают, что уверенно выделяется период колебаний около 70 мин, а также прослеживается гармоника с периодом около 50 мин. Переходный процесс на рис. 2, a имеет характерное время около 70 мин и по амплитуде значительно превосходит фоновые колебания. Следовательно, уверенно выделяемая гармоника с периодом 70 мин есть проявление собственных колебаний тракта сейсмографа с фильтром. Вторая гармоника (с периодом

около 50 мин) имеет иную природу и связана, возможно, либо с гармоникой ${}_0S_2$ собственных сфероидальных колебаний Земли, либо с проявлением колебаний ее отдельного блока.

Чтобы убедиться в достоверности выделения гармоник с периодом около 50 мин, был выполнен следующий вычислительный эксперимент. Полагая спектр мощности для варианта z (см. рис. 4, z) заданным и используя соответствующие значения коэффициентов авторегрессии a_j и дисперсии σ_ε^2 при $M_1 = 10$, был построен некоторый искусственный ряд длиной в $N = 600$ отсчетов, изображенный на рис. 3, в. Для этого искусственного ряда с известным спектром можно рассчитывать варианты, аналогичные представленным на рис. 4. Один из таких расчетов для случая $M_2 = 20$ с использованием указанного искусственного ряда изображен пунктирной линией на рис. 4, з. Сопоставляя результат расчета, показанный пунктирной линией, с вариантом, изображенным сплошной линией на рис. 4, з, и сопоставляя последний с результатом расчета, представленным на рис. 4, е, убеждаемся, что взаимное отклонение оценки спектра с завышенным значением M по сравнению с истинным спектром в первых двух вариантах меньше, чем аналогичное отклонение оценки спектра с $M_2 = 20$ по сравнению с оценкой спектра с $M_1 = 10$, получающееся с использованием экспериментально наблюдаемого ряда (сейсмограммы). Указанное обстоятельство свидетельствует о правомерности выделения гармоник с периодом около 50 мин.

Таким образом, предварительные наблюдения, выполненные сверхдлиннопериодным сейсмографом, показали работоспособность прибора и позволили выделить колебания с периодом около 50 мин. Физическая природа этих колебаний нуждается в дополнительном уточнении. Выполненное исследование дает дополнительные возможности для решения ряда геофизических задач, таких, как анализ собственных колебаний Земли, выявление взаимосвязи метеофакторов и сейсмического фона в низкочастотном диапазоне, идентификация наблюдаемых сигналов в пограничной области частот гравитационных и сейсмических колебаний и т.п. В связи с этим методика обработки данных наблюдений в указанном диапазоне частот, помимо использованного в работе спектрального анализа, должна включать фильтрацию для выделения нестационарных сигналов, вызванных, например, землетрясениями, а также спектрально-корреляционный анализ синхронных записей сейсмической и гравиметрической аппаратуры в сочетании с наблюдениями температуры и давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников Ю.А., Рыков А.В. Длиннопериодные помехозащищенные сейсмометры системы МСС // Сейсмометры, регистраторы и сейсмометрические каналы. М.: Наука, 1986. С. 141–147. (Сейсмические приборы; Вып. 18.)
2. Рыков А.В. К проблеме наблюдений колебаний Земли // Аппаратура, методы и результаты сейсмометрических наблюдений. М.: Наука, 1979. С. 3–7. (Сейсмические приборы; Вып. 12.)
3. Agnew D.C., Berger J. Vertical seismic noise at very low frequencies // Journ. Geophys. Res. 1978. Vol. 83, N 11. P. 5420–5424.
4. Wieland E., Stein J.M. Very-broad-band seismograph // Ann. Geophys. 1986. Vol. 4, N 3. P. 227–232.
5. Кей С., Марпл С. Современные методы спектрального анализа // Тр. Ин-та инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1981. Т. 69, № 11. С. 5–51.
6. Писаренко В.Ф. Спектральная оценка максимальной энтропии и ее использование для определения частот гармоник // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1975. Вып. 8. С. 83–109.

ЗАМКНУТАЯ СИСТЕМА АКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ ОТ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ

В основу работы активных систем защиты положен принцип управления вибрацией [1]. Объектом регулирования являются исполнительный механизм (ИМ) и присоединенные к нему конструкции (опора, платформа). В работе [2] рассмотрен принцип действия системы, построенной по разомкнутой схеме. Показано, что разомкнутые системы не позволяют полностью реализовать возможности таких устройств по крайней мере по двум причинам (нестабильность характеристик элементов схемы и отклонение этих характеристик от идеальных). С целью увеличения коэффициента подавления сейсмических шумов целесообразно использовать замкнутые системы с введением дополнительного управления исполнительным механизмом по сигналу рассогласования. В настоящей работе рассмотрен один из вариантов таких систем, определены основные параметры схемы.

На рисунке 1 показана блок-схема системы активной защиты. Сейсмический шум действует на основание 1, на котором установлены преобразователь сейсмического сигнала в электрический 2 и исполнительный механизм 4 с платформой 6, где расположена измерительная аппаратура. Электрический сигнал с преобразователя через усилитель 3 подается на подвижной элемент 5 исполнительного механизма. Параметры схемы выбраны таким образом, чтобы подвижной элемент отслеживал движение основания, но в противофазе. Тогда платформа будет перемещаться на величину $\Delta X = X_1(t) - X_2(t)$, где $X_1(t)$, $X_2(t)$ — перемещения основания и подвижного элемента во времени t соответственно.

При

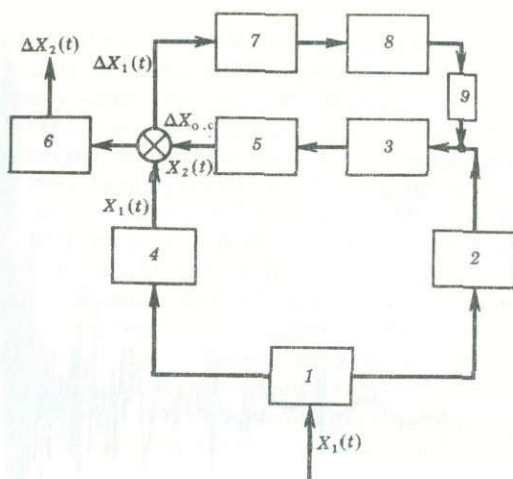
$$|X_1(t)| = |X_2(t)| \quad \Delta X_1 = 0 \quad (1)$$

платформа находится в состоянии покоя. В действительности условие (1) невыполнимо вследствие отклонения характеристик блоков схемы от идеальных или их нестационарности во времени. В работе [2] показано, что наибольший вклад в общую ошибку разомкнутой системы вносит нелинейность характеристики подвижного элемента исполнительного механизма и нестационарность коэффициента передачи усилителя.

Нелинейность характеристики подвижного элемента приводит к амплитудным и фазовым искажениям сигнала $X_2(t)$, что и не позволяет наряду с временной нестационарностью коэффициента передачи усилителя достигнуть полной компенсации помехи, определяемой только динамической ошибкой системы. Решить эту задачу возможно введением контура отрицательной обратной связи с регулированием по сигналу рассогласования, т.е. образованием замкнутой системы активной защиты. Дополнительный контур обратной связи образуется преобразователем 7, измерительным усилителем 8 и согласующим устройством 9 (см. рисунок). Выходной сигнал ΔX_1 подается в цепь контура отрицательной обратной связи. В случае оптимального выбора коэффициента передачи контура обратной связи должно выполняться условие $\Delta X_1 \approx \Delta X_{o.c.}$, где $\Delta X_{o.c.}$ сигнал, поступающий на вход элемента сравнения. При выполнении этого условия достигается практически полная коррекция сигнала X_2 , искажение которого происходит в основном вследствие нелинейности электромеханической характеристики подвижного элемента ИМ. Отметим, что наибольшие трудности возникают в случае так называемой "петлевой характеристики" элемента (типа сухого трения, гистерезиса,

Блок-схема системы

1 — основание; 2 — преобразователь; 3 — усилитель; 4 — исполнительный механизм (ИМ); 5 — подвижной элемент ИМ; 6 — платформа; 7 — преобразователь сигнала несогласования; 8 — измерительный усилитель; 9 — согласующее устройство



зон нечувствительности и т.д.). Здесь наименьшая степень коррекции сигнала и, следовательно, наибольшие несогласования будут наблюдаться на участках, когда $X(t) \approx 0$. И хотя полной компенсации (т.е. случая, когда ошибка системы определяется только динамической погрешностью) добиться не удастся, существенное снижение ΔX_1 возможно. Отметим, что такую компенсацию можно осуществить только в тех случаях, когда быстродействие цепи обратной связи в несколько раз превышает быстродействие цепи основной схемы. Введение глубокой отрицательной обратной связи существенно повышает стабильность системы в целом, а нестабильность коэффициента передачи усилителя 3 вносить ошибку в работу схемы практически не будет. Анализ работы схемы показал, что в случае применения замкнутых систем возможно добиться повышения коэффициента подавления сейсмических шумов по сравнению с разомкнутой системой в 5–10 раз и снизить уровень помехи на 60 дБ в диапазоне периодов от 0,5–1 до 200 с и более при разрешении $(3-6) \cdot 10^{-3}$ мкм.

ЛИТЕРАТУРА

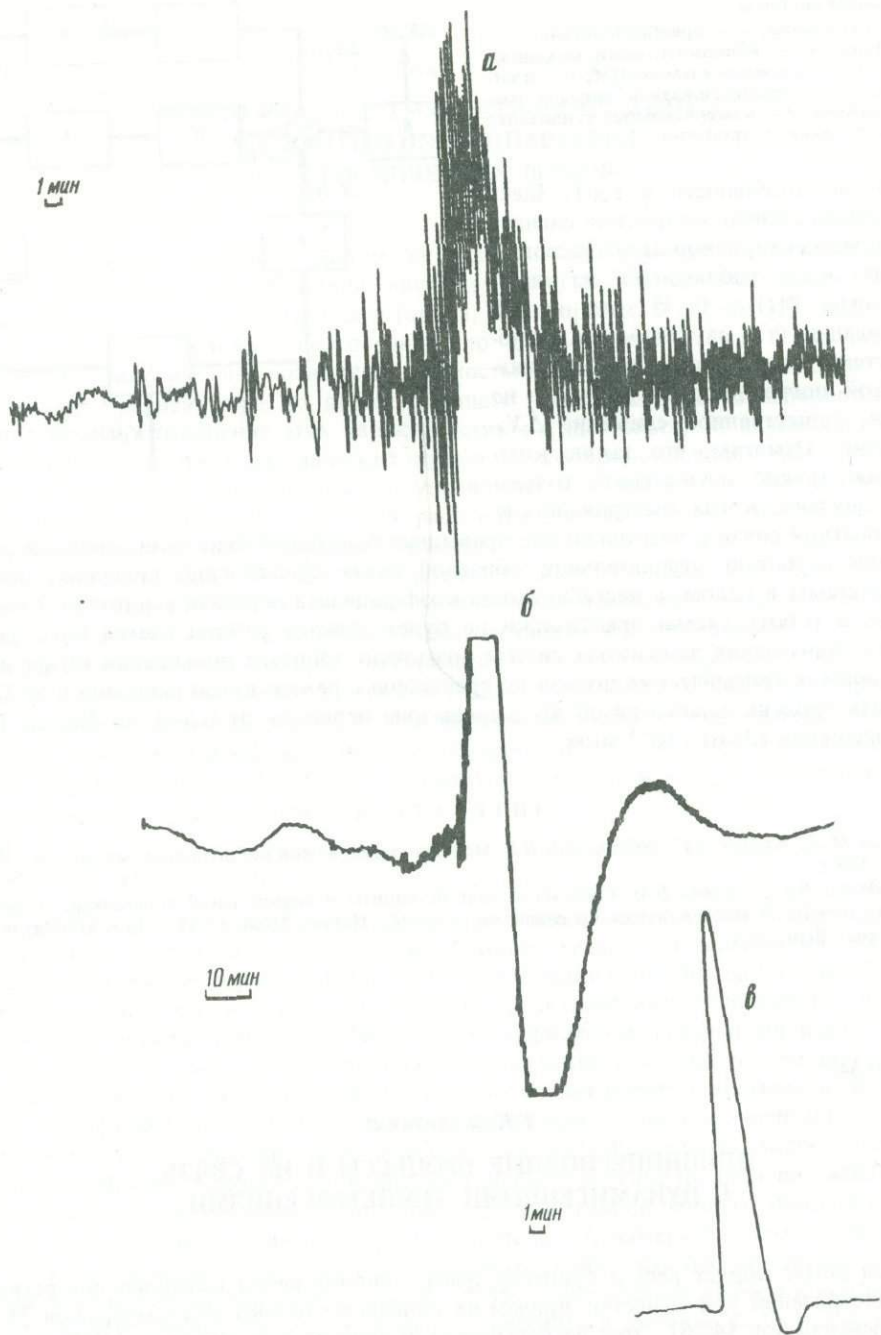
1. Генкин М.Д., Елизов В.Г., Яблонский В.В. Методы управляемой виброзащиты машин. М.: Наука, 1985. 239 с.
2. Коридалин В.Е., Сергеев В.М. Система активной защиты измерительной аппаратуры от сейсмических шумов // Исследования по сейсмометрии. М.: Наука, 1988. С. 111–113. (Сейсмические приборы; Вып. 20.)

УДК 5507.34

Т.К. Железняк

ДЛИННОПЕРИОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ИХ СВЯЗЬ С ЦУНАМИГЕННЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ

В этой статье пойдет речь о процессе, факт возникновения которого при регистрации землетрясений уже известен, причем на записях не только деформографов [1–3], но и сейсмографов [4–6]. Этот регистрируемый процесс (см. рисунок, а, б) представляет собой волну, которая имеет следующие характерные особенности: — крутой передний фронт; — длительность порядка 10–20 мин, иногда и более; — волна недиспергируемая; — скорость ее распространения $3,0 \pm 0,5$ км/с, т.е. ее годограф близок к годографу фазы Эйри поверхностных волн. По форме этот процесс напоминает реакцию сильнодемпфированной колебательной системы на импульсное воздействие (см. рису-



Фрагменты записей двухмаятниковым (а, в) и магнетронным (б) сейсмографами
 а, б — землетрясение от 21.03.82 г., Япония, $M = 7,1$; в — переходный процесс канала

нок, ϵ), поэтому у некоторых авторов она получила название импульсной волны (ИВ). Найдены зависимости амплитуды этой волны от расстояния у деформографов [3]: $A = \Delta^{-3/2}$ — и от расстояния и магнитуды у сейсмографов [4]: $\lg A_{\max} = M_{LH} - 1,7 \lg \Delta + 2,6$, где A — максимальное значение скачка деформации; A_{\max} — максимальное значение амплитуды ИВ; M_{LH} — магнитуда землетрясений; Δ — эпицентральное расстояние. Известно, что на записях близких землетрясений и взрывов также появляются длиннопериодные процессы, которые объясняются струнным эффектом [7]. Этот эффект возникает, когда в высокочастотных колебаниях землетрясений есть колебания, близкие к собственной частоте пружины (или струны), способные вызвать мощные резонансные колебания этой пружины. Поэтому эти длиннопериодные процессы регистрируются, как правило, во вступлении либо в начальной части близких землетрясений, тогда как ИВ регистрируется на фоне поверхностных волн. И второе отличие ИВ от этих процессов в том, что длительность их измеряется только десятками секунд. Отсутствие систематического материала по ИВ объясняется двумя причинами, связанными с проблемами длиннопериодной аппаратуры, необходимой для ее регистрации.

1. Как правило, аппаратура эта экспериментальная и длительность регистрации определяется длительностью эксперимента.

2. Увеличение даже длиннопериодных каналов на периодах $T \geq 1000$ с очень мало, не более $V \leq 1$. Из-за больших помех его стремятся еще уменьшить, поэтому если и записывается ИВ, то только от очень сильных землетрясений, что крайне редко.

На экспериментальной базе "Ледово" ИФЗ АН СССР (Подмосковье) в течение 9 лет регистрировались землетрясения длиннопериодным двухмаятниковым сейсмографом [8]. Данные канала следующие: период собственных колебаний $T_{S1} = 240$ с; увеличение по смещениям в диапазоне периодов 1–200 с либо $V = 800$, либо $V = 400$ (в зависимости от уровня помех); увеличение для периода $T = 1000$ с соответственно $V = 14$, либо $V = 7$. При таком увеличении минимальная магнитуда землетрясения с ИВ, зарегистрированного этим прибором, равна $M = 6,3$ (от 25.02.81 г., Греция), а минимальная магнитуда самого удаленного землетрясения не превышает $M = 7,4$ (от 3.03.85 г., побережье Центр. Чили). Регистрируется ИВ в землетрясениях с эпицентром и на суше и на акватории. При анализе записей было замечено, что ИВ связана с цунамигенными землетрясениями.

Как известно, служба предупреждения цунами на Дальнем Востоке СССР в качестве рабочего способа прогноза использует магнитудно-географический критерий. Суть его заключается в выполнении двух условий для прогноза возможного цунами: эпицентр землетрясения должен находиться на акватории; магнитуда землетрясения должна быть не меньше порогового значения, $M = 7,0$. Но магнитудно-географический критерий есть не более чем необходимые условия. Большое количество ложных тревог при использовании этого критерия заставляет искать дополнительные признаки, которые бы явились достаточными условиями для возникновения цунами.

За период с сентября 1979 г. по июль 1988 г. двухмаятниковым сейсмометром зарегистрировано 76 землетрясений с магнитудой $M \geq 7,0$. Из них с ИВ 26 землетрясений, причем с эпицентром на акватории 12, все они цунамигенны. К этому следует добавить 7 землетрясений с ИВ с эпицентром на акватории, вызвавших цунами, которые были зарегистрированы и опубликованы ранее другими авторами. Одно из этих землетрясений зарегистрировано и деформографом [2], и сейсмографом [5]. Однако нами пропущены 4 цунамигенных землетрясения и одно зарегистрированное цунамигенное землетрясение не имеет ИВ.

По имеющимся землетрясениям с ИВ, зарегистрированным нами, была предпринята попытка найти аналогичные из записей магнетронного сейсмографа [5]. Было найдено 10 землетрясений за период с 1982 по 1988 г., все они имели ИВ. Для сравнения запись одного из цунамигенных землетрясений, зарегистрированных обоими приборами, представлена на рисунке *а* и *б*. По виду они различны, и это различие, по нашему мнению, определено фильтрами. В качестве интегратора в канале магнетрон-

ного сейсмографа в 60–70-х годах использовался пассивный фильтр, а в 80-х годах активный, с большой постоянной времени. Записи ИВ магнетронного сейсмографа с пассивным фильтром отличаются от записей ИВ с активным фильтром и похожи на записи ИВ двухмаятникового сейсмографа. Если активный фильтр имеет небольшое затухание, то приход ИВ должен вызвать переходный процесс как реакцию на ее крутой фронт. В этом случае ИВ накладывается на длительный переходный процесс, определяемый активным фильтром. Для выводов необходим тщательный анализ, сейчас же важен факт совпадения землетрясений, в которых регистрируется длиннопериодный процесс, так называемая ИВ, двумя совершенно различными приборами, установленными друг от друга на расстоянии ~ 800 км, но имеющими достаточно большие увеличения для $T \geq 1000$ с. В статье не ставится задача объяснить явление, которое вызывает ИВ, на данном этапе необходимо определить, сейсмический это сигнал или помеха — сейсмическая (наклона или переходного процесса на импульсное сейсмическое воздействие) либо аппаратная (как результат нелинейности прибора).

Столь длительные наблюдения дают основание говорить, что ИВ не наклон-помеха, а связана с приходом поверхностных волн землетрясений. Имеются записи землетрясений с ИВ, амплитуда которой больше 40 мм, когда в течение суток и более до и после землетрясения отклонение "нулевой" линии на записи не превышало 1 мм. ИВ — это всегда одиночный процесс на фоне поверхностных волн тогда как помехи-наклоны идут сериями и продолжительное время.

Что касается переходных процессов данного сейсмографа, то прежде всего они не редкость, как ИВ, и присутствуют на записях практически ежедневно, но отличаются от ИВ по длительности (они короче в 4–5 раз) (см. рисунок). Эксперименты показали, что переходные процессы системы в целом и отдельных ее элементов при различного типа воздействиях также не имеют ничего общего с ИВ.

Нелинейность прибора может быть связана с частотой и амплитудой входного сигнала. О нелинейности, связанной с частотой, вызывающей длиннопериодные процессы в близких землетрясениях, рассмотренной Беркхемером [7], уже говорилось выше. Поскольку упругие системы сейсмографов практически нелинейны, то нелинейность, связанная с амплитудой, естественно, существует, и для ее оценки проводился эксперимент. В эксперименте силовое смещение маятника сейсмометра производилось подачей электрических колебаний с периодами 20 и 30 с от генератора на калибровочную катушку. Амплитуда сигнала постепенно увеличивалась. Чтобы колебания не выходили за пределы видимой записи, использовались фильтры нижних частот. Как показал эксперимент, постоянная составляющая в результате нелинейности, соизмеримая по величине с амплитудой ИВ, появляется при эквивалентных смещениях порядка 1000 мкм. Такие амплитуды поверхностных волн возможны при катастрофических землетрясениях, мы же регистрируем ИВ при эквивалентных смещениях в 70 мкм и при значениях больше и меньше этого.

Амплитуды поверхностных волн в землетрясениях с ИВ различны по величине, и зависимости между амплитудами поверхностных волн и амплитудой ИВ не наблюдается. Как доказательство всему этому приведем пример землетрясения 3.03.85 г. в Чили. Два толчка этого землетрясения произошли с интервалом времени в 52 мин. Магнитуды толчков по объемным волнам соответственно равны $M_{PV}^1 = 7,0$ и $M_{PV}^2 = 6,5$, а по поверхностным волнам $M_{LH}^1 = 7,6$, значение M_{LH}^2 не определено, но именно во втором толчке, магнитуда которого меньше, зарегистрирована ИВ. Остается добавить, что второй толчок вызвал волну цунами, в 4 раза превышающую волну цунами первого толчка [9].

Возможно, что ИВ обусловлена особенностями очага и связана с поверхностным разрывом. На данный же момент можно сказать, что, по имеющейся статистике, присутствие на записи такого процесса, как ИВ, представляет собой только достаточное и, возможно, не единственное условие для цунамигенного землетрясения.

1. *Benioff H.* Source wave forms of three earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1963. Vol. 53, N 5. P. 893–903.
2. *Press F.* Displacements, strains, and tilts at teleseismic distances // *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70, N 10. P. 2395–2412.
3. *Wideman C.I., Major M.W.* Strain steps associated with earthquakes // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1967. Vol. 57, N 6. P. 1429–1445.
4. *Колесников Ю.А., Малиновская Л.М.* Об импульсной волне // *ДАН СССР.* 1972. Т. 204, № 1. С. 80–83.
5. *Линьков Е.М., Петрова Л.П.* О регистрации длиннопериодных колебаний с помощью магнетронного сейсмографа // *Исследования длиннопериодных сейсмических волн.* Минск: Наука, 1976. С. 52–57.
6. *Зарайский М.П.* Опыт разработки и применения длиннопериодных сейсмических каналов: Дис... канд. техн. наук. М., 1971. 135 с.
7. *Berckhemer H., Schneider G.* Near earthquakes recoded with long-period seismographs // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1964. Vol. 54, N 3. P. 973–987.
8. *Железняк Т.К., Железняк Л.К., Киринос Д.П.* Двухмаятниковый сейсмометр // *Изв. АН СССР. Физика Земли.* 1981. № 6. С. 92–96.
9. *Tsunami Newslett.* 1985. Vol. 18, N 2. P. 18.

УДК 550.34

*В.Г. Катренко, А.И. Спирин, И.В. Уломов,
В.М. Фремд, Е.А. Чилибьева*

**ОПЫТ РЕГИСТРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
НАЗЕМНЫМИ И ДОННЫМ СЕЙСМОГРАФАМИ
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ ШЕЛЬФА**

В настоящее время в мире быстрыми темпами возрастает доля нефтегазодобычи в морских условиях — в районах континентального шельфа. Возведение для этих целей крупных инженерных сооружений типа морских буровых платформ требует правильного и тщательного расчета конструкций на основе надежного прогноза сейсмических сотрясений морского дна при сильных землетрясениях. Большинство таких сооружений имеет незначительные по сравнению с длиной сейсмической волны размеры (пластично разрушающиеся системы) и нуждается в задании воздействий в виде акселерограмм. Однако на сегодняшний день основным источником получения акселерограмм сильных движений являются береговые сейсмометрические службы, чьи данные после соответствующей обработки экстраполируются на условия морского дна [1]. Такое положение объясняется трудностями, связанными с технологическим и материально-техническим обеспечением долгосрочных наблюдений посредством донных сейсмических станций, а также стоимостью самих станций. Это относится как к кабельным, так и к автономным системам регистрации. Наряду с технологическими сложностями удовлетворения основного требования по минимизации энергопотребления развитие более перспективного направления конструирования автономных донных станций (АДС) сдерживается и по другим причинам.

При прочих равных условиях АДС присущи ограничения, налагаемые либо конечным объемом массовой памяти — в АДС, не содержащих телеметрических каналов передачи сейсмической информации, либо энергоемкостью дополнительного аппаратного обеспечения поддержки телеметрического канала — в АДС с каналом связи. И в том и другом случае с целью экономии ресурсов системы АДС нуждаются в средствах, позволяющих эффективно проводить тщательный анализ регистрируемых сейсмических сигналов

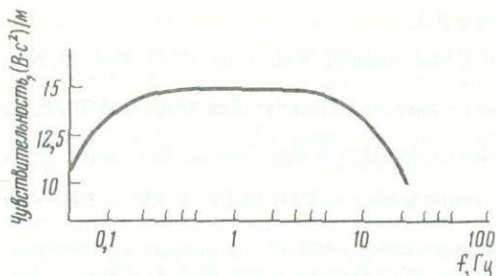


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика АПТ-1М со встроенным усилителем

и делать заключение о ценности материала на предмет его сохранения или передачи. Присутствие таких средств чрезвычайно важно в АДС, использующих цифровую регистрацию, доступные методы которой обладают меньшей удельной информационной емкостью по сравнению с аналоговой. В то же время организовать такие средства легче именно в цифровой системе регистрации на основе вычислительной техники, сведя при этом к минимуму аппаратную часть заменой жесткой логики программным обеспечением и привлекая микропроцессорную технологию.

В отношении алгоритмов анализа можно заметить, что хотя условия регистрации сейсмических сигналов на суше определенным образом отличаются от условий на морском дне, тем не менее "сухопутные" алгоритмы принципиально могут быть перенесены с некоторыми изменениями и дополнениями на условия дна. Очевидно, что модификация алгоритмов в первую очередь должна затрагивать стороны, связанные с неопределенностью ориентации компонент сейсмометров при жестком креплении последних в корпусе ДС и с вариациями микросейсмического фона. Отладку алгоритмов целесообразно проводить, используя активную обратную связь с регистрирующим комплексом, расположенным на суше и принимающим сейсмическую информацию с вынесенных в море сейсмометров.

Для сбора соответствующего материала и изучения параметров сильных движений грунта в прибрежной зоне были проведены экспедиционные изыскания в рамках совместной деятельности ИМГиГ ДВНО, ИФЗ АН СССР и ИС АН УзССР. Экспедиция состоялась в июне—октябре 1988 г. в районе о-ва Шикотан. Задачей также ставилась выработка рекомендаций по конструированию аппаратуры регистрации землетрясений на шельфе.

Во время эксперимента записывающая аппаратура находилась на суше в железобетонном бункере в непосредственной близости от береговой линии. С целью проведения сравнительного анализа записей вынесенные сейсмометры располагались на морском дне и на суше. Все сейсмометры были заключены в герметичные одинаковые контейнеры и установлены в сходные геологические условия. Соединение осуществлялось кабельной линией. В качестве датчиков применялись компактные модифицированные трехкомпонентные пьезоакселерометры АПТ-1М [2]. Встроенные усилители формировали плоскую частотную характеристику в интервале 0,05—20 Гц (рис. 1). Чувствительность акселерометров была выбрана из расчета неискаженной регистрации сейсмических колебаний интенсивностью 6—7 баллов и составила 15 В (с²/м). Питание усилителей осуществлялось от комплекта сухих элементов, находящихся в контейнерах вместе с датчиками.

Сигналы со всех датчиков заводились на 14-канальный магнитограф точной записи URFAL фирмы SONY со следующим распределением информации: шесть каналов занимали береговые сейсмометры (две трехкомпонентные установки), еще по шести каналам регистрировались сигналы с донной установки (на двух уровнях чувствительности). По оставшимся двум каналам записывалась временная информация — пилот-сигнал частотой 32 Гц по одному и код времени от кварцевых часов по другому. Использовалась скорость регистрации 0,19 см/с, при этом обеспечивалось отношение сигнал/шум не хуже 42 дБ. Одной стандартной бобины с полдюймовой магнитной лентой длиной 1440 м хватало на 210 ч непрерывной записи, т.е. почти на 9 сут. Для регистрации

сейсмических колебаний морского дна в цифровой форме применялась автономная сейсмическая станция АПСС [3], разработанная с использованием микропроцессорной техники. Благодаря гибкому программно-математическому обеспечению станция позволяет осуществлять надежное распознавание "полезных" сейсмических сигналов в реальном времени в условиях повышенного воздействия помех (естественных и "культурных" сейсмических, электрических). Наблюдения, проведенные на ряде сейсмостанций Узбекистана, и полученные материалы подтвердили ее высокую работоспособность. Это явилось основанием для привлечения АПСС к настоящим исследованиям. При этом было доработано аппаратное и программное обеспечение.

Для сохранения записей сейсмических событий АПСС была доукомплектована стандартным ленточным накопителем (НМЛ) CM 5300 и специально разработанным одноплатным контроллером, обеспечивающим управление перезаписью данных из буферной памяти станции на магнитную ленту (МЛ). При разработке контроллера учитывалось следующее:

устройство должно быть ориентировано только на вывод данных из АПСС на НМЛ в стандартном формате, совместимом с форматом наиболее распространенных в стране ЭВМ серии ЕС и CM [4];

контроллер должен обеспечивать защиту от сбоев НМЛ типа отката ленты, самопроизвольного включения режима записи при "мигании" и прерывании сетевого питания; кроме того, он должен позволять автоматическое отключение НМЛ от сети в целях исключения холостой работы НМЛ и снижения потребляемой энергии;

доступность элементной базы.

Контроллер (КНМЛ) осуществляет асинхронный обмен с АПСС и формирует стандартную файловую структуру данных на МЛ. В состав КНМЛ входят (рис. 2): RGI, RGO, RGC — буферные регистры ввода, вывода данных, вывода кода циклического контроля; MUX — мультиплексор; блоки: начального сброса — IRU, начальной установки и загрузки НМЛ — LDU, формирования кода циклического контроля и бита поперечного контроля — CCU и PBU, обработки входных команд — PPU, синхронизации — CLG, а также блоки формирования управляющих сигналов записи служебных кодов конца зоны и конца файла CNT, выработки кода ленточного маркера TMF и начальной установки КНМЛ RSU.

КНМЛ использует штатные и некоторые внутренние сигналы НМЛ, выведенные при доработке на незадействованные контакты интерфейсных разъемов, и работает следующим образом. После обнаружения сигнала и идентификации его как подлежащего сохранению АПСС подает питание на КНМЛ. В RSU вырабатывается сигнал начальной установки для схемы КНМЛ и дается команда в LDU на инициализацию и загрузку НМЛ. LDU с определенными фазовыми задержками генерирует команду на включение сетевого питания НМЛ PWR, внутренние сигналы загрузки НМЛ LOAD, аналогичные вырабатываемым при ручной работе и загрузке с НМЛ, и сигнал TVGN, блокирующий движение ленты при установлении режима начальной загрузки. После этого НМЛ подключается к сети, входит в режим дистанционного управления и вырабатывает сигналы готовности RDU, состояния начала ленты TVGNACK и подтверждения режима дистанционного управления SLV. По этим сигналам PPU выдает в АПСС готовность к записи RDUW, после чего становится возможным информационный обмен между АПСС и КНМЛ с НМЛ. При отсутствии бобины с лентой на НМЛ, обрыве или окончании ленты, а также при снятом с бобины кольце защиты записи сигнал RDUW не вырабатывается, а АПСС сообщает о неисправности звуковым сигналом. Получив сигнал RDUW, АПСС вырабатывает команды на начало движения МЛ SFW, при этом начинается движение МЛ с рабочей скоростью и дается разрешение на работу усилителей записи НМЛ. Спустя 100 мс, отводимых на разгон и стабилизацию движения МЛ, начинается информационный обмен.

На магистрали данных АПСС и соответственно на входе RGI выставляется младший байт информационного слова АПСС и сигнал синхронизации записи DOUT. По его переднему фронту в CLG формируются сдвинутые по фазе импульсы стробирования, по

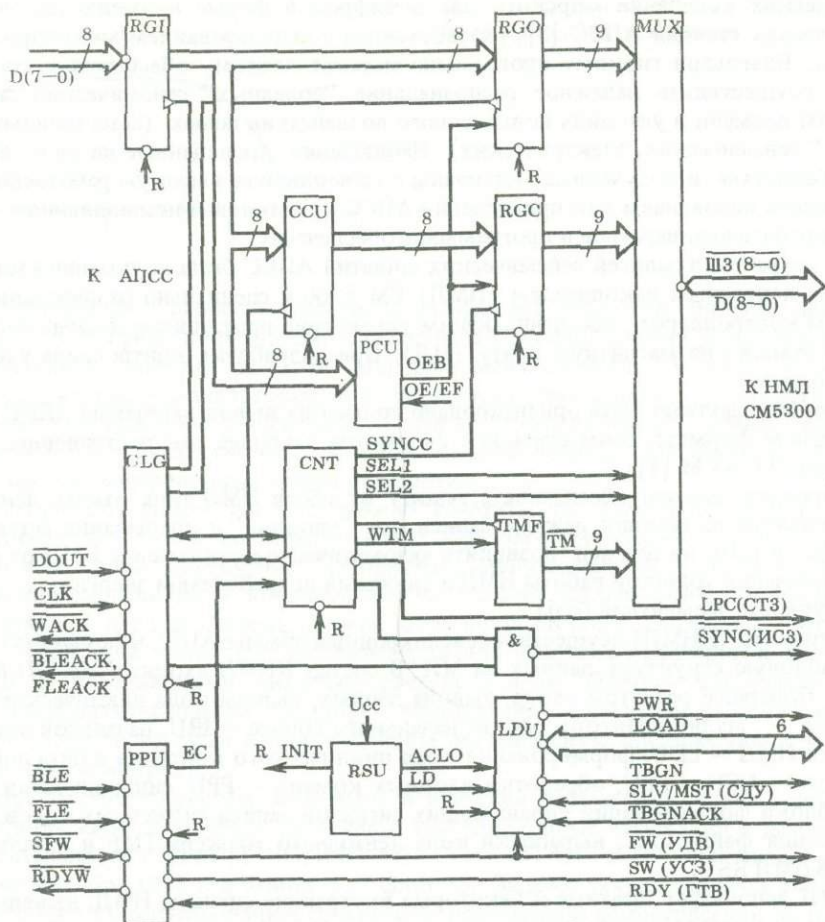


Рис. 2. Функциональная схема контроллера НМЛ

которым байт данных последовательно заносится в RGI, CCU, PCU и RGO. В RGO к байту данных подмешивается бит поперечного контроля. Сигналами выбора магистрали SEL1, SEL2 поддерживается подключение мультиплексора к выходу RGO в течение записи одной зоны данных и 9-разрядные слова данных из RGO поступают на шину записи НМЛ. При установлении очередного слова на шине записи CLG вырабатывает импульс сопровождения записи SYNC, передним фронтом которого производится запись слова данных с D в НМЛ и на ленту; задний фронт формирует с CLG подтверждение записи слова WACK. В ответ АПСС снимает сигнал синхронизации DOUT, после чего КНМЛ снимает WACK. На этом цикл записи одного 9-разрядного слова завершается, и процесс повторяется до тех пор, пока на ленте не окажется записанной одна зона данных длиной 512 байтов (счетчик количества байтов организован в АПСС программно и может оперативно изменять начальное значение).

После записи последнего байта в зоне АПСС выставляет сигнал завершения формирования зоны BLE. По этому сигналу КНМЛ в течение восьми циклов проводит запись двух слов контрольных сумм — циклической и продольной, которые следуют друг за другом после последнего байта зоны данных с промежутками по три цикла. Для записи слова циклического контроля мультиплексор подключается к выходу RGC. Слово продольного контроля записывается сигналом LPC внутренней схемой НМЛ. По окончании фор-

мирования зоны, которое подтверждается сигналом \overline{BLEACK} со стороны КНМЛ, АПСС снимает \overline{BLE} , на что КНМЛ снимает \overline{BLEACK} . Затем выдерживается межзонный физический промежуток на ленте и может записываться очередная зона данных.

Кроме заголовка и других атрибутов файловой организации данных, которые формируются программно, на МЛ должен присутствовать код ленточного маркера "ТМ", представляющий минимальную служебную информацию, по которой в дальнейшем ЭВМ может различить файлы. "ТМ" представляет собой два одинаковых байта (байт с кодом 023_8 и байт продольного контроля) с промежутком в три цикла. Запись маркера происходит аппаратно по команде \overline{FLE} и подтверждается сигналом \overline{FLEACK} . Сигналы \overline{BLEACK} и \overline{FLEACK} разнесены во времени и поэтому используют одну физическую линию. После окончания процесса записи на МЛ движение ленты прекращается, МЛ и КНМЛ обесточиваются.

Стандартная плотность записи на МЛ (32 линии/мм) обеспечивается выставлением данных с периодом 100 мкс. Обмен синхронизируется сигналом \overline{CLK} . Однако его использование не обязательно, так как КНМЛ может работать с автосинхронизацией по сигналу \overline{DOUT} , который реализуется АПСС программно. При этом нестабильность плотности записи не превышает 5%.

Связь КНМЛ с АПСС осуществляется посредством БИС программируемого параллельного интерфейса $KP580BB55$, встроенной в АПСС. При этом данные передаются через порт А, прием и передача сигналов управления — через порт С. Упрощенная система сигналов управления обменом с КНМЛ позволяет использовать его в составе устройств, не содержащих микропроцессор. Для работы МЛ в автономном режиме в КНМЛ предусмотрено переключение режимов в блоке LDU.

Драйвер КНМЛ написан на языке Ассемблер в системе команд микропроцессора I8080. Управляющая программа создания файлов на МЛ формировала структуру файла длиной по 65 стандартных зон. Первая зона идентифицировала очередное событие временной маркой и порядковым номером записи и содержала служебную информацию. В остальных зонах находились данные сейсмического события (32 Кбайта). Управляющая программа создания файлов также контролировала свои по информационному обмену, при которых происходили перезапуск программы, инициализация КНМЛ, после чего данные выводились заново. Кроме этого, учитывая возможное ухудшение качества покрытия МЛ в условиях повышенной влажности (местные выпадения рабочего слоя), файл каждого события выводился на ленту три раза подряд.

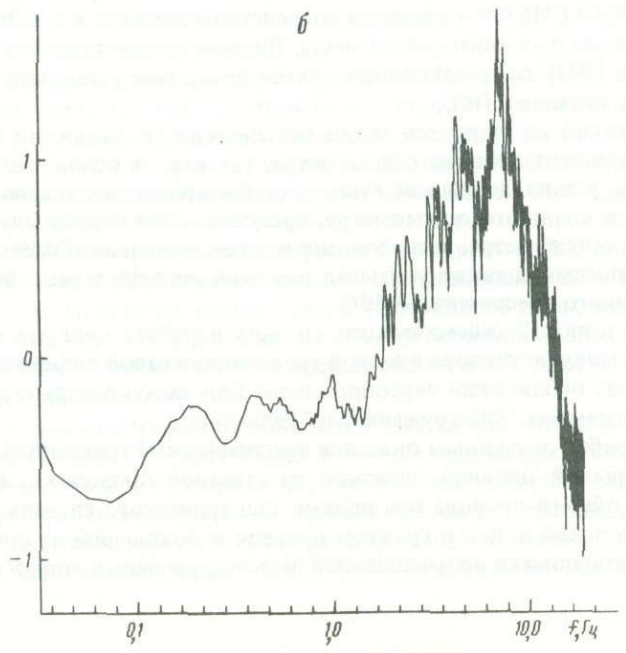
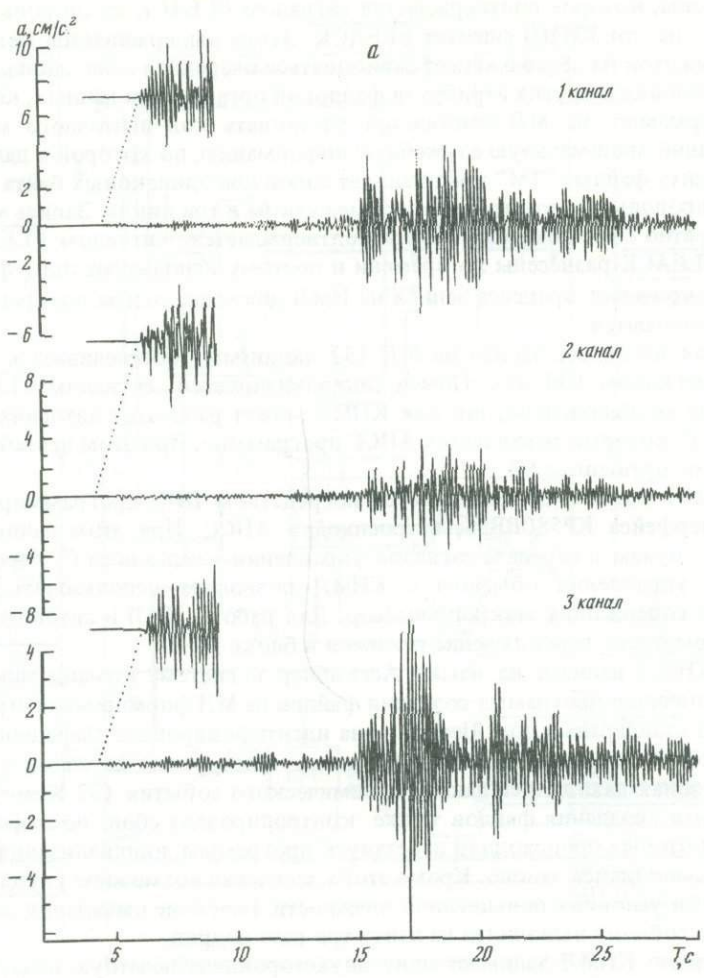
Конструктивно КНМЛ занимает одну двухстороннюю печатную плату размером со стандартную плату МЛ $CM5300$ и крепится посредством защелок к крайней плате МЛ, не занимая практически дополнительного места. Питание осуществляется от источников вторичного питания МЛ, за исключением схемы начальной установки RSU, которая использует источник питания АПСС.

Во время наблюдений не ставилась задача обеспечения необходимой пространственной ориентации компонент донного сейсмометра, так как на основе записей, полученных с сейсмометров, установленных на суше и ориентированных традиционно (по азимуту и вертикали), и с донного сейсмометра, предполагается отрабатывать метод определения ориентации сейсмометра, расположенного произвольным образом [5, 6]. В связи с этими особенностями, а также учитывая высокий уровень помех, была проведена доработка программного обеспечения АПСС:

обнаружение "полезного" сейсмического сигнала и работа программы "Редактор" реализовывались по модулю вектора входной трехкомпонентной информации;

на основе натуральных наблюдений переопределены константы и параметры признаков, используемых в программах "Обнаружение" и "Редактор".

При проведении работ доступным оказался геофизический трехжильный кабель марки КГЗ-60-90, покрытый двойной оплеткой из стальной проволоки. Использование оплетки в качестве общего провода при приеме электрического сигнала и ее гальванический контакт с морской водой и грунтом привели к появлению на приемном конце мощной электрической помехи промышленной частоты, уровень которой в зависимости



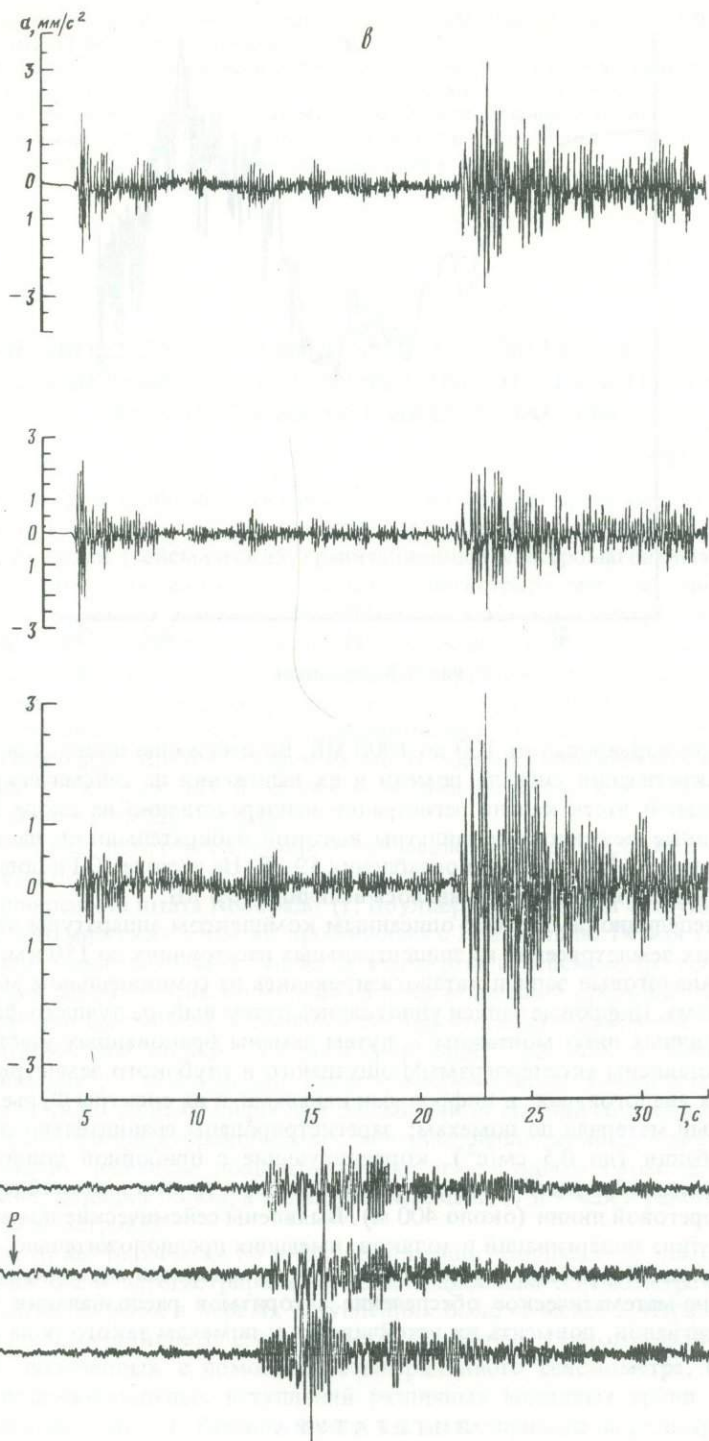


Рис. 3. Фрагменты записи близких землетрясений, зарегистрированных станцией АПСС

Цифровые акселерограммы: *a* — 20.08.88 г., 02 ч 27 мин 50 с, $43^{\circ}09'$ с.ш., $148^{\circ}00'$ в.д., $M_{PH} = 4,2$; *b* — 07.09.88 г., 06 ч 17 мин 6,4 с, $K = 10,6$; на вставке — участки с *P*-волной увеличены на 20 дБ; *g* — амплитудные спектры Фурье ускорений; *δ* — аналоговая акселерограмма землетрясения 20.08.88 г., воспроизведенная на электрическом осциллографе ПЭО-1М [6]

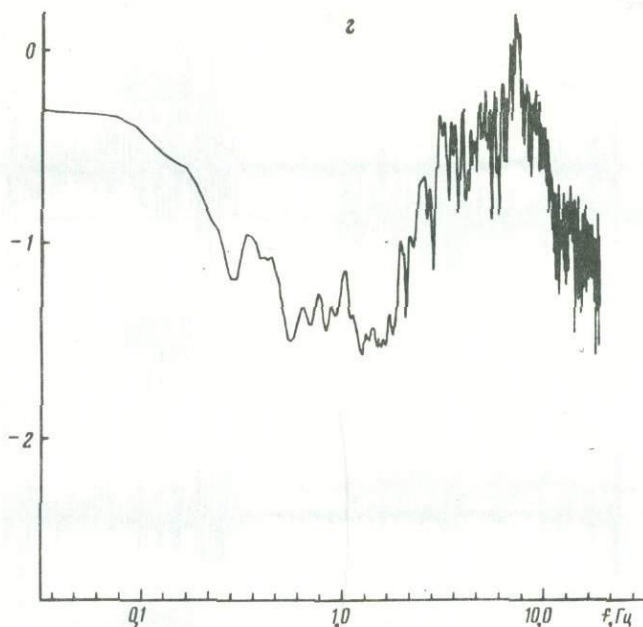


Рис. 3 (окончание)

от времени суток варьировал от 100 до 1000 МВ. Во избежание появления зеркальных частот при дискретизации сигнала помехи и их наложения на сейсмический сигнал в состав усилительной части канала регистрации непосредственно на входе АПСС были введены активные режекторные фильтры высокой избирательности, настроенные на частоту подавления 50 Гц с уровнем ослабления 59 дБ. На частоте 10 Гц дополнительное затухание, вносимое фильтром, оценивалось величиной 0,5 дБ.

За время экспедиционных работ описанным комплексом аппаратуры зарегистрирован ряд близких землетрясений на эпицентральных расстояниях до 150 км, в том числе и ощутимых. Аналоговые записи каталогизировались на семиканальном магнитографе Н067 в два приема. Цифровые записи уплотнялись путем выбора лучшего файла из каждой трех идентичных либо монтажом — путем замены бракованных участков записи. На рис. 3 представлены акселерограммы ощутимого и глубокого землетрясений, зарегистрированных аналоговыми и цифровыми каналами, и их спектры Фурье. Также был собран обширный материал по помехам; зарегистрированы сравнительно сильные сейсмические колебания (до 0,5 см/с²), коррелирующие с прибойной волной во время шторма, что можно объяснить близким расположением донного контейнера с акселерометрами к береговой линии (около 400 м). Выявлены сейсмические помехи импульсного характера типа подергиваний и толчков, имеющих предположительно биологическое происхождение. Подробное изучение полученного материала позволит модифицировать программно-математическое обеспечение алгоритмов распознавания "полезных" сейсмических сигналов, повысить их устойчивость к помехам такого рода при донных наблюдениях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соловьев С.Л. Сейсмологические донные наблюдения в СССР и за рубежом. М.: Наука, 1986. 120 с.
2. Розенберг И.М., Фрейд В.М., Цыганов В.М. Модернизированные трехкомпонентные пьезосейсмометры для экспериментов на шельфе // Исследования по сейсмометрии. М.: Наука, 1988. С. 10–15. (Сейсмические приборы; Вып. 20.)
3. Катренко В.Г., Чилибьева Е.А. Автономная программируемая сейсмическая станция. Наст. сб.

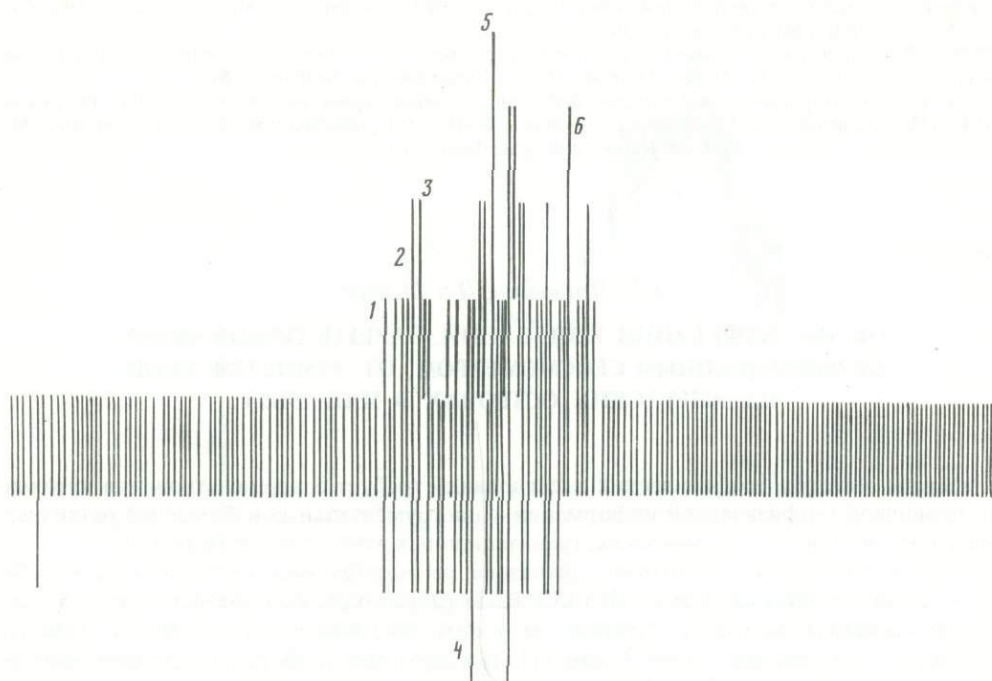


Рис. 1. Цифровая запись безынерционным сейсмометром землетрясения 7 мая 1986 г. (20 ч 43 мин 32 с)

Абсолютное время вступления различных групп волновых колебаний:

1	—	20 ч	47 мин	42 с
2	—	20	49	01
3	—	20	49	52
4	—	20	51	42
5	—	20	53	00
6	—	20	57	32

Сопоставление этих времен с данными оперативного сейсмологического бюллетеня показывает, что первая сейсмическая волна P от землетрясения прошла путь от очага до сейсмической станции "Голден" (США), расположенной примерно в 100 км к северу от пункта измерения, за 8 мин 40 с. На наших записях эта волна соответствует волне l_5 (см. табл. 1).

Идентификация же волн l_1-l_4 , имеющих практически на всех записях, с сейсмическими волнами представляется крайне затруднительной, так как их кажущаяся скорость в 1,5–2 раза выше скорости сейсмических P -волн. Поскольку на записях установленного рядом и обладающего такой же чувствительностью к сейсмическим волнам стандартного сейсмометра сигнал от землетрясений обнаружены не были, можно предположить, что безынерционным сейсмометром зарегистрировано ЭМИ, причиной которого были землетрясения в районе Алеутских островов. Причиной отсутствия записи сейсмических колебаний от удаленных землетрясений стандартным сейсмометром является его недостаточная чувствительность, так как эксперимент проводился с целью регистрации достаточно сильных местных сейсмических событий. Однако в момент землетрясения ЭМИ на записях отсутствует, а появляется только через несколько минут. Следовательно, источником ЭМИ является, по-видимому, не очаг землетрясения. С другой стороны, то, что ЭМИ зафиксировано во всех трех случаях, как видно из табл. 1, указывает на его сейсмогенность и исключает какие-либо другие причины. Можно предположить, что ЭМИ возникает при прохождении сейсмических волн через какие-то геологические тела, преобразующие механическую энергию в энергию ЭМИ. Сходное явление

Таблица 1

Разность между временем прихода различных групп волновых колебаний на станцию и временем начала землетрясений, мин, с

Землетрясение	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
07.05.86 г. 20 ч 43 мин 32 с 51.31 N 174.95 W $M = 6,0$	4.10	5.40	6.20	8.10	9.28	14.00
07.05.86 г. 22 ч 47 мин 04 с 51.38 N 174.84 W $M = 6,5$	—	5.21	—	8.25	9.00	14.25
09.05.86 г. 19 ч 04 мин 28 с 51.89 N 174.41 W $M = 5,4$	3.56	5.28	6.25	8.15	9.07	14.22
Среднее время	4.03	5.29	6.22	8.17	9.12	14.16

Таблица 2

Сравнение времен прихода волн с волной P

Волна	Среднее время прихода волновых колебаний, мин.с	Время пробега волны P , мин.с	Название сейсмостанции
I_1	4.03	3.55	"Петропавловск"
I_2	5.29	5.10	"Ситка"
I_3	6.22		
I_4	8.17		
I_5	9.12	8.40	"Голден"
I_6	14.16		

ние отмечалось Г.А. Соболевым, когда ЭМИ генерировалось рудными телами в процессе прохождения через них искусственно возбужденных сейсмических колебаний [3]. Однако частоты излучаемых при этом электромагнитных волн слишком высоки (десятки килогерц) и не соответствуют частотам колебаний, зарегистрированных нашими приборами.

Анализируя геологическое строение материка Северная Америка, мы предположили, что в данном случае такими генерирующими ЭМИ геологическими телами могут быть зоны активных глубинных разломов или те их части, плоскости которых простираются в направлении, близком к перпендикулярному по отношению к направлению распространения сейсмических волн. Наиболее крупные из этих разломов разделяют разнородные тектонические области, резко различающиеся геологическим строением и развитием (рис. 2) [4,5].

Исходя из предположения генерации ЭМИ зонами активных глубинных разломов при прохождении сейсмических волн, рассмотрим времена прихода волн I_1 и I_2 . В соответствии с каталогом землетрясений сейсмическая волна P зарегистрирована на станции "Петропавловск" (СССР) через 3 мин 55 с после начала землетрясения, что соответству-

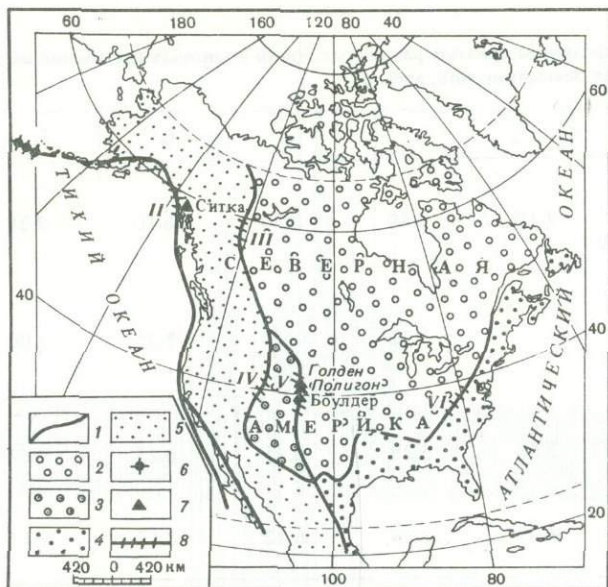


Рис. 2. Обобщенная тектоническая схема Северной Америки

1 — зоны активных глубинных разломов; 2 — область древней протерозойской платформы; 3 — часть древней платформы, активизированная в новейшее время; 4 — область палеозойской складчатости; 5 — область альпийской складчатости; 6 — эпицентры землетрясений; 7 — сейсмостанции; 8 — участки зон разломов, генерировавшие ЭМИ при прохождении сейсмических P -волн от землетрясений на Алеутских островах

ет времени прихода волны l_1 , а сейсмостанцией "Ситка" (США) волна P зарегистрирована через 5 мин 10 с после начала землетрясения, что примерно соответствует времени волны l_2 (с учетом погрешности наблюдений) (табл. 2).

Общим для сейсмостанций "Ситка" и "Голден", а также для сейсмостанции "Петропавловск", расположенной на Камчатке, является то, что они размещены вблизи зон активных тектонических разломов (см. рис. 1). Таким образом, может быть высказано предположение, что сейсмические волны от землетрясений, проходящие через эти зоны, возбуждали ЭМИ, зарегистрированные нами как волны l_1 , l_2 и l_5 . Используя это предположение, оценим, какими зонами могли бы быть генерированы волны l_3 , l_4 и l_6 . За основу примем тектоническую карту Северной Америки (см. рис. 2). Если считать кажущуюся скорость сейсмической волны порядка 10 км/с, то через 6 мин 20 с эта волна будет пересекать зону III активного тектонического разлома, которая в это время и генерирует волну ЭМИ — l_3 , затем через 8 мин. 17 с. сейсмическая волна будет проходить зону IV, что, в свою очередь, может быть причиной излучения волны l_4 , и соответственно волна l_6 может быть генерирована зоной разлома VI.

Таким образом, все шесть типов выделенных на записях волн по временам прихода соответствуют времени прихода сейсмической волны P от землетрясения на определенную зону активного тектонического разлома, которая и генерирует ЭМИ, зарегистрированные безынерционным сейсмометром в районе г. Боулдер, что подтверждает высказанное выше предположение.

Возникает естественный вопрос о природе этого явления. Отсутствие ЭМИ в момент землетрясения, т.е. когда в очаге выделяется максимальная энергия, исключает пьезоэлектрический эффект как его источник. Поэтому мы предположили, что генерация ЭМИ зонами глубинных разломов при прохождении через них сейсмических волн обусловлена самой их структурой. Глубинный разлом — это зона нарушения сплошности горных пород, причем выражена она не плоскостью, а серией разрывов и выполнена разд-

робленными и трещиноватыми породами. Зоны глубинных разломов пересекают земную кору и проникают в мантию, их протяженность достигает сотен и даже тысяч километров, а ширина составляет километры. В случае активного разлома, развивавшегося в течение длительного времени, а в особенности на альпийском и современных этапах, раздробленность горных пород в пределах разлома обуславливает его большую проницаемость для различных флюидов, как газообразных, так и жидких, причем движение этих флюидов направлено в сторону понижения давления, т.е. снизу вверх. В подтверждение этого можно привести хорошо известный факт: именно с зонами активных разломов связаны многочисленные выходы подземных вод, в том числе термических, радионных, минерализованных и др. В природных условиях эти флюиды являются электролитами, при их движении вверх, в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля Земли, в них возникают электрические токи. В момент прохождения через зону разлома волны сжатия должен резко сократиться объем полостей и произойти импульсный выброс. Естественно, в небольших объемах вещества зоны разлома это явление дает незначительный эффект, но в том случае, если одновременно сжатию подвергаются десятки и сотни кубических километров раздробленных горных пород, насыщенных электролитом, суммарный эффект может быть достаточен для возникновения ЭМИ, регистрируемого приборами высокой чувствительности. В связи с этим становится понятным, что достаточно интенсивное ЭМИ может генерироваться лишь в том случае, если фронт волн сжатия параллелен зоне разлома или его части, т.е. направление распространения сейсмических волн перпендикулярно плоскости зоны. Высказанные соображения сходны с предложениями А.А. Воробьева [6] о возможности возникновения электромагнитного излучения при прохождении упругих волн через пористые водонасыщенные горные породы с разрывом стенок капилляров избыточным давлением, создаваемым упругой волной.

Таким образом, допустив возможность генерации ЭМИ активными зонами глубинных разломов при прохождении через них сейсмических волн, можно предположить, что и сами зоны могут постоянно генерировать фоновые ЭМИ за счет движения к поверхности флюидов в магнитном поле Земли. Характеристики ЭМИ должны зависеть как от активности зоны, так и от ее строения. Наблюдения за изменением фоновой электромагнитной активности зоны во времени могут характеризовать накопление упругой энергии в период подготовки землетрясения.

Итак, проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Зарегистрированные безынерционным сейсмометром электромагнитные колебания могут быть генерированы зонами активных глубинных разломов при прохождении через них сейсмических волн.

2. Наблюдения этого эффекта могут стать одним из методов выявления активных зон или их участков и найти свое применение как при решении тектонических задач, так и в исследованиях, направленных на оценку степени сейсмической опасности той или иной зоны.

3. В случае подтверждения существования собственного электромагнитного излучения зонами активных глубинных разломов будет получен новый критерий для оценки активности этих зон и прогноза сильных землетрясений.

В заключение следует отметить, что предполагаемый эффект генерации ЭМИ зонами активных глубинных разломов при прохождении через них сейсмических волн наблюдался впервые и нуждается в дальнейшем изучении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левшенко В.Т. Инструментальные средства вибрзондирования крутильными колебаниями // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1983. С. 156–163. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
2. Левин Дж., Левшенко В.Т., Садовский А.М. О некоторых особенностях регистрации землетрясений безынерционным сейсмометром // ДАН СССР. 1988. Т. 300, № 2. С. 326–329.

3. *Соболев Г.А., Демин В.М., Лось В.Ф.* и др. Механоэлектрическое излучение рудных тел // ДАН СССР. 1980. Т. 252, № 6. С. 1353–1355.
4. Tectonic Map of North America. Scale 1 : 5000000. Washington D.C. : Geological Survey, 1972.
5. *Хаин В.Е.* Региональная геотектоника. Северная и Южная Америка, Антарктида, Африка. М.: Наука, 1971. С. 546.
6. *Воробьев А.А.* Равновесие и преобразование видов энергии в недрах. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1980. С. 210.

УДК 550.34

В.Е. Коридалин, В.М. Сергеев

МЕХАНИЗМ КРЕПЛЕНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО БЛОКА МАГНИТНЫХ ГОЛОВОК РЕГИСТРАТОРА СЕЙСМОВЗРЫВНЫХ ВОЛН

При конструировании многоканальных широкополосных магнитных регистраторов сейсмозрывных волн особое внимание уделяют механизму крепления, подвода и отвода аэродинамического блока магнитных головок. Рациональное конструирование этого механизма обеспечивает стабильность работы регистратора, его высокую надежность и долговечность, а также позволяет получить малые величины рабочего зазора между магнитным носителем записи и блоком головки. При аэродинамическом подвесе блока головок этот зазор может составлять десятые доли микрометра. Такие величины зазора между блоком головки и носителем записи дают возможность получить высокую плотность записи (до 80–100 бит/мм) при соответствующей конструкции самой головки записи-воспроизведения.

Технологичность и простота изготовления позволили использовать широкую плоскую пружину для прижатия несущего элемента с головками к поверхности барабана, подвода и отвода головок в процессе работы регистратора. Было разработано устройство подвода и отвода головок с регулировкой положения головок и установкой его параллельно образующей поверхности барабана без деформации плоской пружины и других деталей механизма в процессе сборки и работы регистратора. Отсутствие деформации деталей, крепящих пружину, и отсутствие деформации установочных поверхностей для пружины создают благоприятные условия для работы последней, устраняют эффект "хлопанья" широких плоских пружин при малых углах изгиба. Это приводит к устойчивости и надежности в работе аэродинамического подвеса блока магнитных головок. Установка и регулировка плоскости несущего элемента параллельно образующей поверхности барабана создают равномерное распределение давления воздуха на несущую поверхность блока головок, в результате чего перекоса несущей поверхности блока головок относительно образующей барабана во время его движения не возникает. Отсутствие перекоса несущей поверхности не деформирует плоскую пружину. Таким образом обеспечивается надежность и устойчивость работы пары барабан – несущая поверхность блока головок. Параллельность между поверхностями блока головок и образующей магнитного носителя практически исключает касание поверхности барабана краями несущей поверхности элемента с головками в процессе работы. Выполнение этих условий создает возможность получения малых зазоров между барабаном и несущим элементом.

Механизм регулировки начального и рабочего положения блока магнитных головок широкополосного регистратора сейсмозрывных волн можно подразделить на две части: 1) механизм регулирования параллельности между плоской поверхностью блока

головок и образующей магнитного барабана; 2) пружина быстрого подвода и отвода блока головок. Регулировка начальной параллельности между поверхностью блока головок и образующей магнитного регистратора производится с помощью винта 12, который рычагом 11 перемещает рычаг 9 относительно шариковой опоры 8 (рис. 1). Рычаг 9 представляет собой основание, на котором укреплен блок магнитных головок. Система рычагов построена таким образом, что позволяет вращать площадку блока магнитных головок 13 относительно ее центра около образующей барабана на такую величину, что край площадки блока головок может перемещаться относительно ее центра около образующей барабана на $\pm 0,5$ мм. Этого вполне достаточно для точной установки блока головок параллельно образующей барабана. Достоинством разработанной конструкции является то, что не деформируется рабочая пружина при установке блока головок параллельно образующей барабана. Это ликвидирует возможность появления эффекта "хлопанья", который возникает при деформации тонких пластин. Быстрый подвод и отвод блока магнитных головок к поверхности барабана осуществляется с помощью магнитной муфты 1 и системы рычагов, передающих движение якоря 2 муфты 1 на промежуточную площадку блока магнитных головок 13. Во время подвода и отвода блока магнитных головок сигнал поступает на электромагнитную муфту. При поступлении сигнала втягивается сердечник 2, который с помощью рычага 3 передает движение на рычаг 5, связанный с воздушным демпфером 6. Демпфер служит для обеспечения плавного подвода блока головок к поверхности магнитного регистратора. Плавное, за счет демпфирования, движение от рычага 5 передается через рычаг 7 на стержень 10. Стержень передает движение на промежуточную площадку блока 13, которая соединена с несущим элементом. Таким образом, происходит движение блока головок к барабану. Винт 4 служит для аварийного ограничения движения блока головок к поверхности регистратора, он не дает блоку головок коснуться поверхности регистратора при резком снижении скорости вращения барабана и резком снижении подъемной силы воздушной подушки, которая обеспечивает рабочий зазор между блоком головок и барабаном. Кроме этого, в аварийном состоянии выключается электромагнитная муфта и происходит быстрое поднятие блока головок от барабана. Зазор между блоком головок и барабаном в процессе регистрации осуществляется с помощью винта 4.

При конструировании аэродинамического подвеса блока магнитной головки приходится рассчитывать упругости пружин подвеса с учетом воздушной подушки. Это сложная задача. Она существенно упрощается, если считать систему двух тел, барабана и несущего элемента колебательной системой с одной степенью свободы.

Рассмотрим уравнение движения системы барабан — несущий элемент m (рис. 2). Пусть движущееся тело массой m опирается на упругую опору (пружину), а вращающееся тело нагружено таким образом, что может перемещаться по вертикали. На рисунке введены следующие обозначения: k_1 и k_2 — коэффициенты жесткости воздушного слоя и упругой опоры соответственно, c_1 и c_2 — коэффициенты демпфирования. Толщина смазочного слоя равна $h(t) = z_2(t) - z_1(t)$, где $z_1(t)$ — смещение барабана по вертикали, а уравнение движения по вертикали несущего элемента запишется следующим образом:

$$m\ddot{z}_2 + 2(c_1 + c_2)\dot{z}_2 + (k_1 + k_2)z_2 = 2c_1\dot{z}_1 + k_1z_1. \quad (1)$$

Поскольку жесткость воздушного слоя между несущим элементом и барабаном значительно больше жесткости пружины подвеса, так как $k_1 \gg k_2$ (жесткости отличаются на два порядка), а коэффициент демпфирования при малых перемещениях и больших скоростях вращения барабана близок к нулю, то при этих условиях перемещение элемента z_2 воспроизводит перемещение барабана z_1 , так как расстояние между несущим элементом и барабаном практически остается постоянным. Уравнение движения (1) принимает вид

$$m\ddot{z}_2 + k_1z_2 = k_1z_1. \quad (2)$$

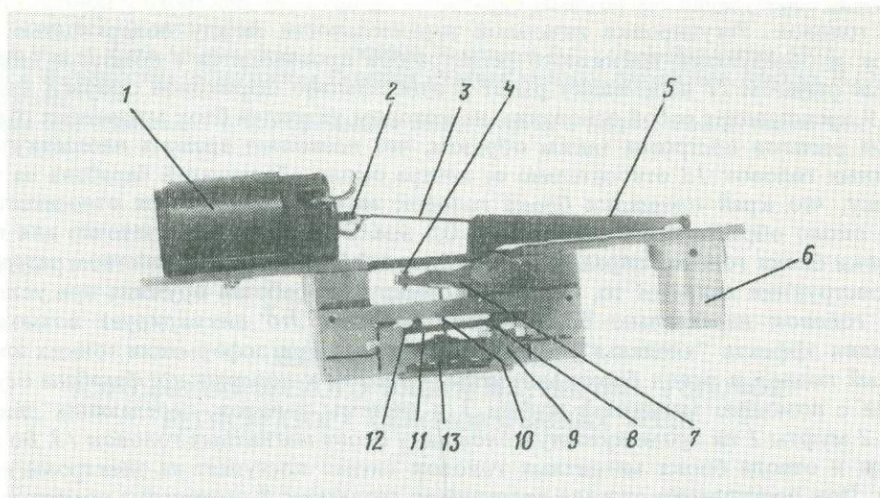


Рис. 1. Механизм крепления, подвода и отвода блока магнитных головок

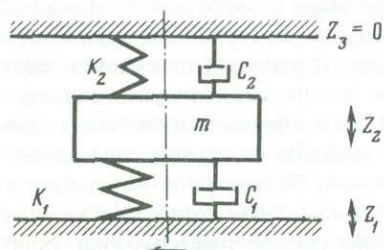


Рис. 2. Схема движения несущего элемента

Если биение барабана совершается по синусоидальному закону $z_1 = Z_1 \sin \omega t$, то решение уравнения (2) имеет вид

$$z_2 = Z_2 \sin(\omega t + \varphi),$$

где

$$z_2 = \frac{z_1}{1 - (\omega^2/\omega_0^2)}; \quad \frac{z_2 - z_1}{z_1} = \frac{\omega^2/\omega_0^2}{1 - (\omega^2/\omega_0^2)}; \quad \varphi = 0.$$

В этих формулах $\omega_0 = \sqrt{k_1/m}$ — критическая круговая частота собственных колебаний. Следовательно, при $\omega = \omega_0$ наступает режим резонанса. Если масса несущего элемента вместе с головками порядка 6 г, то при $k_1 = 3 \cdot 10^3$ кг/м частота механического резонанса блока головок будет равна $f_0 = 240$ Гц, т. е. частота собственных колебаний головки велика по сравнению с колебаниями барабана. Таким образом, при малых ω можно записать $(z_2 - z_1)/z_1 = \omega^2/\omega_0^2$, что при значениях $\omega/\omega_0 \ll 1$ дает возможность считать $z_2 \approx z_1$, т. е. несущий элемент отслеживает синусоидальные отклонения барабана при его вращении.

Следовательно, если частота вращения барабана существенно ниже собственной частоты несущего элемента, то масса несущего элемента должна выбираться так, чтобы его величина была равна массе, вычисленной по формуле $m = 9,8 (0,01 k_1/\omega^2)$, где k_1 — жесткость воздушной прослойки; ω — частота вращения барабана.

Если задано не перемещение барабана, а внешняя импульсная нагрузка, действующая между аэродинамическим подвесом и барабаном, то основное дифференциальное уравнение движения подвеса примет вид

$$m\ddot{z}_2 + k_1 z_2 = F(t).$$

При $\omega_0 = \sqrt{k_1/m}$, $f(t) = F(t)/m$ получим

$$\ddot{z}_2 + \omega_0^2 z_2 = f(t).$$

При решении этого уравнения импульсное воздействие принимает следующие значения в зависимости от временного интервала:

$$f(t) = a, \quad 0 \leq t \leq \tau,$$

$$f(t) = 0, \quad t < 0 \quad t > \tau,$$

где τ — длительность воздействия.

Рассмотрим решение уравнения в указанных интервалах:

$$1) \quad t < 0, \quad z_2 = 0;$$

$$2) \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad z_2 + \omega_0^2 z_2 = a.$$

Общее решение уравнения может быть записано так:

$$z_2 = A \sin \omega_0 t + \beta \cos \omega_0 t + a/\omega_0^2.$$

Используя начальные условия при $t = 0$, $z_2 = 0$ и $\dot{z}_2 = 0$, получаем окончательное решение

$$z_2 = a/\omega_0^2 (1 - \cos \omega_0 t);$$

$$3) \quad t > \tau.$$

Общее решение запишем в виде

$$z_2 = C \sin \omega_0 t + D \cos \omega_0 t.$$

Начальные условия при $t = \tau$ следующие: $z_2 = z$; $\dot{z}_2 = \dot{z}$, и решение может быть записано так:

$$z_2 = a/\omega_0^2 [\cos \omega_0 (t - \tau) - \cos \omega_0 t].$$

Из указанных решений видно, что при конструировании аэродинамического подвеса необходимо выбирать его размеры небольшими, чтобы длительность воздействия барабана от неровностей поверхности и посторонних возмущений на подвес была минимальной. Проведенные расчеты влияния вибраций на работу блока записи-воспроизведения показали, что последние в пределах заданной точности не оказывают влияния на результаты измерений, что подтвердилось и при экспериментах.

Практические параметры механизма крепления, подвода и отвода блока магнитных головок следующие. Блок магнитных головок содержит 10 головок. Неплоскостность рабочей поверхности блока головок меньше 0,5 мкм. Конструкции блока головок записи-воспроизведения и блока стирающих головок идентичны. Отличия между ними состоят в величине рабочих зазоров, в ширине головок и намоточных данных. Размер рабочей поверхности блоков головок составляет прямоугольник со сторонами 30 X 15 мм. Масса блока 5,7 г.

Несущая консольная пружина подобрана по жесткости так, чтобы между блоками головок и поверхностью барабана устанавливался зазор 3—4 мкм при частоте вращения барабана 2000—3000 об./мин. Зазор обуславливается аэродинамическими силами, возникающими при набеге потока воздуха, увлекаемого барабаном, на рабочую поверхность блока головок. Величина зазора выбрана из компромиссных соображений: с одной стороны, чтобы получить достаточно высокую плотность записи, с другой — простота изготовления и надежность работы регистратора в полевых условиях. Полученная плотность записи опытного образца составляет 60 бит/мм.

IV. КАЛИБРОВКА СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

УДК 550.34

А.А. Володин, Р.И. Урдуханов

КАЛИБРОВКА СЕЙСМОСТАНЦИИ АСС 6/12 "ЧЕРЕПАХА"

Одной из наиболее часто применяемых сейсмостанций в настоящее время является сейсмостанция "Черепиха". Качественная магнитная запись с динамическим диапазоном 40 дБ, широкий частотный диапазон (0,5–64 Гц), возможность длительной автономной регистрации сейсмических сигналов, наличие устройств оперативного просмотра материала и ввода данных в ЭВМ для обработки делают эту сейсмостанцию незаменимой при проведении исследований в широком диапазоне задач — от научно-исследовательских до производственных. Длительная автономная регистрация выдвигает в первый ряд проблему калибровки.

При обслуживании неавтономных сейсмостанций различных типов и назначений (от сейсмологических с гальванометрической регистрацией до цифровых сейсморазведочных) опытный оператор по записям или по изображениям на осциллографе всегда вовремя может обнаружить отклонение в отдельных каналах и при необходимости провести оперативную калибровку, устранив повреждения. В случае же автономной станции, которая может не обслуживаться до 20 сут и, естественно, подвержена влиянию внешних воздействий, важно, во-первых, при обработке материала знать характеристики канала во время измерений и их возможные временные флуктуации, во-вторых, иметь возможность перед включением режима автономности и перед снятием с точки наблюдения проанализировать поведение характеристик канала в течение предыдущего цикла наблюдений, т. е. провести оперативную обработку откликов каналов на калибровочные сигналы.

За годы эксплуатации сейсмостанции "Черепиха" был разработан ряд методик и устройств для решения задачи калибровки этой автономной сейсмостанции. Остановимся кратко на некоторых из них.

В первых модификациях "Черепихи" устанавливался встроенный генератор синусоидальных сигналов, настроенный на частоту 2 Гц, подававший в калибровочную катушку в автоматическом режиме минутные посылки сигналов. Очевидно, что такой подход, направленный на определение чувствительности канала в одной точке АЧХ, не позволяет говорить о качественной калибровке канала.

В других модификациях "Черепихи" используется импульсная калибровка. Соответствующее устройство запускается от таймера станции и с интервалом в 8 ч в калибровочную катушку подается прямоугольный импульс длительностью 100 мс. Однако ясно, что такая длительность калибровочного импульса позволяет калибровать каналы с верхней граничной частотой менее 1 Гц, кроме того, анализ отклика канала на одиночный импульс не может обеспечить сколько-нибудь существенную точность калибровки. Вследствие этого такая методика может обеспечить лишь визуальный контроль работоспособности канала, хотя известен опыт использования ее для анализа идентичности сейсмометрических каналов [1].

В [2] описана более корректная методика импульсной калибровки сейсмостанции "Черепаша", заключающаяся в подаче в калибровочную катушку нескольких прямоугольных импульсов длительностью 5 мс, затем откликов на магнитную ленту и вводе данных в ЭВМ для обработки при помощи установки АВСИ-6. Данная методика позволяет получить характеристики канала в начале работы (ленты) и в конце. К недостаткам методики следует отнести невозможность определения параметров канала в ходе автономной записи, проведение калибровки сигналами, в 100 раз превышающими уровень регистрируемых полезных сигналов, а также невозможность проведения оперативной обработки данных калибровки.

Наиболее удачным решением задачи калибровки следует признать устройство, генерирующее синусоидальные сигналы длительностью 10 с последовательно на ряде частот. Управляемое таймером сейсмостанции устройство может производить генераторную калибровку автоматически с любой заданной периодичностью [3]. Дальнейшая обработка может производиться вручную или на ЭВМ после ввода в нее информации с магнитной ленты.

Авторы данной статьи вновь вернулись к импульсной калибровке сейсмометрического канала сейсмостанции "Черепаша" с использованием устройства калибровки, разработанного на базе устройства, описанного в [4]. Указанное устройство позволяет генерировать серии калибровочных сигналов в виде одиночного прямоугольного импульса или двоярных разнополярных прямоугольных импульсов, строго синхронизированных во времени опорной частотой, что позволяет при обработке производить синхронное суммирование десятков откликов [4] для увеличения отношения сигнал/помеха. Это обстоятельство обеспечивает проведение калибровки без загробления канала и подачу сигналов, совпадающих по уровню с регистрируемыми полезными сигналами.

Длительность базового прямоугольного импульса определяется частотой задающего генератора и регулируется в пределах от 40 до 3 мс, что позволяет проводить калибровку каналов с различными полосами частот. При использовании одиночных прямоугольных импульсов импульс после усиления усилителем мощности подается в калибровочную катушку сейсмометра. Если же калибровку проводят двоярными разнополярными прямоугольными импульсами, то базовый прямоугольный импульс инвертируется, задерживается в устройстве задержки на величину его длительности и перед усилением суммируется с первоначальным базовым импульсом.

Отклики канала записываются на магнитную ленту в случае работы станции в автономном режиме либо сразу подаются на оперативное обрабатывающее устройство, в качестве которого авторы используют спектроанализатор СК4 72/2 или микроЭВМ "Электроника ДЗ-28". Установленные в кузове грузового автомобиля, эти устройства обеспечивают оперативную обработку материалов калибровки в условиях полевой базы экспедиции или при необходимости непосредственно в точках установки выносных пунктов сейсмостанции "Черепаша".

Так как канал этой сейсмостанции работает по смещениям, то для получения АЧХ при калибровке серий двоярных разнополярных прямоугольных импульсов или одиночных прямоугольных импульсов после вычисления спектра отклика необходимо произвести домножение на значение круговой частоты или ее квадрата соответственно.

При обработке на микроЭВМ эта операция выполняется посредством соответствующей подпрограммы, а при использовании спектра-анализатора домножение для получения АЧХ производится вручную, хотя для контроля характеристик канала можно пользоваться и кривой АЧХ (ω)/ ω , т. е. без домножения.

На рис. 1 показаны спектры калибровочных сигналов виде одиночного прямоугольного импульса (а) и двоярных разнополярных прямоугольных импульсов (б) для различных длительностей импульсов, полученных на спектро-анализаторе СК4 72/2. Участок спектра в области нижних частот, аппроксимируемый прямой, является рабочим участком, и по нему определяется необходимая длительность импульса для калибровки конкретного канала с заданным частотным диапазоном.

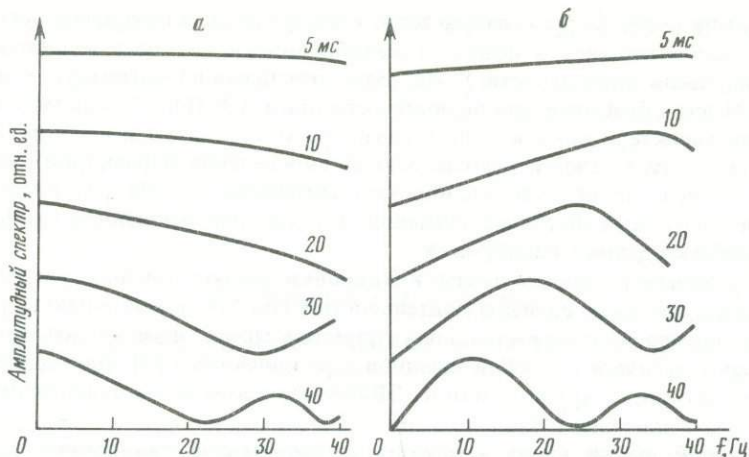


Рис. 1. Спектры калибровочных сигналов в виде одиночных прямоугольных импульсов (а) и двоянных разнополярных прямоугольных импульсов (б)

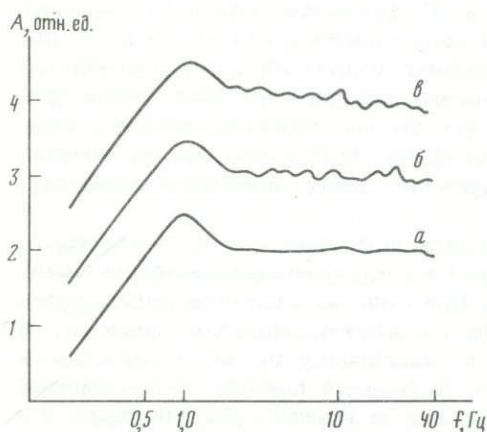


Рис. 2. АЧХ сквозного канала сейсмостанции "Черепаша", полученные на виброплатформе (а), прямоугольными импульсами $t = 3$ мс (б) и двоянными разнополярными импульсами $t = 3$ мс (в)
А — амплитуда

На рис. 2 показана АЧХ канала сейсмостанции "Черепаша", полученная при возбуждении одиночным прямоугольным импульсом длительностью 3 мс (б), двоянными разнополярными прямоугольными импульсами (в) длительностью 5 мс, и здесь же для сравнения приведена АЧХ канала, полученная калибровкой на виброплатформе.

Отличительной особенностью предлагаемого способа калибровки от других, в том числе от описываемого в данном сборнике (статья А.В. Горбатикова и др.), является то, что он позволяет подбором длительности и амплитуды возбуждающего импульса выбрать необходимый участок АЧХ регистрирующего канала в зависимости от конкретно решаемой геофизической задачи непосредственно в ходе полевого эксперимента.

Таким образом, использование устройства калибровки, описываемого в [4], позволяет обеспечить метрологически обоснованный контроль канала как на этапе подготовки аппаратуры, так и в ходе проведения полевых наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Просвиринов С.Н. Об импульсной калибровке сейсмометрических каналов станции АСС-3 // Сейсмометры, регистраторы и сейсмометрические каналы. М.: Наука, 1986. С. 119–123. (Сейсмические приборы; Вып. 18.)
2. Каазик П.Б., Рахматуллин М.Х., Трегуб Ф.С. Импульсная калибровка станций магнитной записи

- АСС 6/12 // Приборы и методы регистрации землетрясений. М.: Наука, 1987. С. 81–88. (Сейсмические приборы; Вып. 19.)
3. Вольф В.И., Газизов М.М., Гришин И.В. и др. Устройство для калибровки сейсмических каналов // Там же. С. 70–75.
4. Володин А.А., Зеликман Э.И., Мавлянбердыев М.М. и др. Калибровка сейсмометрических каналов с использованием микроЭВМ // Там же. С. 75–87.

УДК 550.34

А.В. Горбатиков, В.Б. Преображенский, Р.И. Урдуханов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ КАЛИБРОВКИ СЕЙСМОСТАНЦИИ АСС 6/12

Работы в области практического осуществления импульсной калибровки сейсмических измерительных каналов с датчиками электродинамического типа [1–4], а также теоретические представления и моделирование позволяют в настоящее время осуществлять импульсную калибровку практически любых сейсмических каналов и устройств.

В настоящей работе приводится методика калибровки сквозного измерительного канала сейсмической станции АСС 6/12 "Черепаша" и обсуждается ряд вопросов, связанных с ее практической реализацией.

При поиске конкретной методики получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сквозного канала станции АСС 6/12 авторы старались найти компромисс между следующими противоречивыми требованиями к калибровке: точность, быстрота, технологичность. Повышение точности требует более длительного процесса измерения, а также применения достаточно сложных вычислительных алгоритмов и больших ЭВМ для обработки [2], что требует лабораторных условий. Авторы ставили задачу поиска методики калибровки, применимой как в лабораторных, так и в полевых условиях.

Методика импульсной калибровки включает в себя два этапа – возбуждение сейсмического датчика с записью отклика на магнитную ленту (МЛ) в аналоговом виде и этап цифрового преобразования записи с последующей численной обработкой. При этом производится калибровка сквозного регистрирующего канала станции, состоящего из сейсмического датчика, усилителя-формирователя, усилителя записи, записывающей магнитной головки (МГ), воспроизводящей МГ, усилителя воспроизведения и частотного фильтра, если это необходимо.

В работе [3] были предложены схема и описание специального электронного устройства на ключах, позволяющего вручную или по внешним управляющим сигналам выработать П-образный импульс тока. Импульс подается в рабочую либо в калибровочную катушку сейсмодатчика. При подаче сигнала в рабочую катушку вход усилителя закорачивается эквивалентным сопротивлением для устранения переходных процессов в усилителе. При использовании калибровочной катушки последняя шунтируется небольшим сопротивлением для обеспечения необходимого затухания. Импульсное устройство управляется от часов станции АСС 6/12. Схема выработки управляющих импульсов формирует серию, состоящую из 15 импульсов, следующих с интервалом 4 с. За время между импульсами переходный процесс части канала, состоящего из датчика и формирующего усилителя, затухает до уровня микросейсм. Серия управляющих импульсов формируется один раз за 8 ч регистрации. Это дает возможность определять АЧХ три раза в сутки. Схема выработки управляющих импульсов конструктивно выполнена на плате, которую вставляют в блок записи станции АСС 6/12 на место стандартной платы, формирующей гармонический сигнал в 2 Гц для контроля и опре-

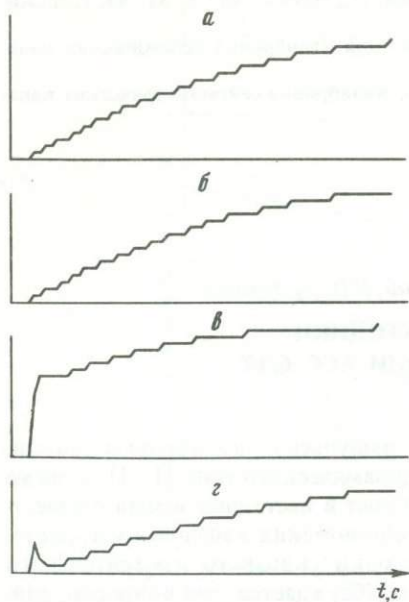
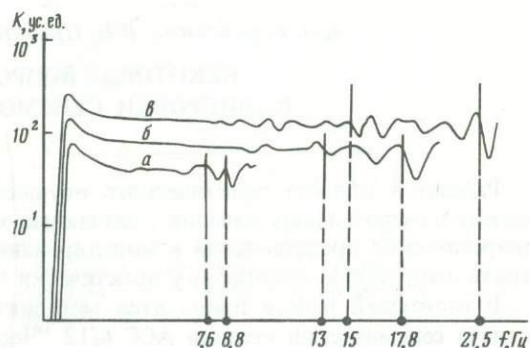


Рис. 1. Вид начальной части отклика сквозного канала станции АСС 6/12

Для схемы возбуждения через калибровочную катушку: *а* — с общим питанием; *б* — с раздельным; через катушку затухания: *в* — с общим питанием; *г* — с раздельным

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики канала сейсмостанции АСС 6/12

а — отдельный отклик; *б* — синхронная сумма 20 откликов; *в* — синхронная сумма 70 откликов



деления чувствительности канала. Описанный способ возбуждения канала при калибровке был реализован и использовался авторами в полевых работах в течение ряда лет.

Специально был изучен вопрос о способе возбуждения сейсмического датчика, поскольку замечено, что при определенной схеме включения форма отклика канала существенно искажается, особенно в области переднего фронта. Как известно, это влечет за собой сильные искажения АЧХ в области высоких частот [4]. Сейсмический датчик можно возбуждать через специальную калибровочную катушку, вынесенную в отдельный магнитный стакан, и через катушку затухания находящуюся на одном каркасе с рабочей катушкой. При этом питание импульсного возбуждающего устройства может быть общим со станцией ААС 6/12 или раздельным. Результаты исследования приведены на рис. 1. Изображены четыре варианта формы начальной части переходного процесса в зависимости от подключаемой катушки и питания. Переходный процесс регистрировался на выходе формирующего усилителя. Видно из рисунка, что в случае возбуждения сейсмодатчика через катушку затухания фронт переходного процесса осложняется либо коротким импульсом при раздельном питании, либо ступенькой при общем питании. Использование такого переходного процесса для расчета АЧХ невозможно. Возбуждать сейсмический датчик в канале станции АСС 6/12 целесообразно только через калибровочную катушку, причем, как видно из рис. 1, питание импульсного возбуждающего устройства и станции может быть общим. Искажение формы переходного процесса объясняется реакцией формирующего усилителя на импульс, возникающий из-за трансформаторного эффекта. Для графического представления (рис. 1) переходные процессы подвергались цифровому преобразованию с частотой 800 Гц. Для этой цели применялся специально разработанный программно-управляемый измерительный комплекс на основе микроЭВМ "Электроника ДЗ-28". Комплекс также использовался для синхронного суммирования откликов и расчета АЧХ.

Для выделения переходного процесса измерительного канала на фоне помех применялся метод синхронного суммирования. Трудности осуществления этого метода связаны со скоростной нестабильностью магнитной ленты. Реализовать синхронное суммирование в применении к сейсмостанции "Черепаха" можно несколькими способами. Один из вариантов предусматривает использование синхросигнала, записанного на

магнитной ленте на дорожке для пилот-сигнала, и соответствующую замену канала пилот-сигнала на канал синхрогенератора в блоке записи. Однако осуществить синхронизацию импульсами частотой 128 Гц, а именно такая минимальная частота синхронизации может быть для канала с регистрирующей полосой 0,5–64 Гц, практически невозможно из-за ограничений, связанных с плотностью записи на магнитной ленте. По этой причине частота синхросигнала не может превышать 64 Гц, и, следовательно, восстановить АЧХ можно лишь до частоты 32 Гц, причем необходимо использовать фильтры нижних частот для устранения искажений, вносимых в АЧХ из-за несоответствия частоты дискретизации и полосы пропускания канала [5].

Другой широко применяемый способ состоит в автоматизированном формировании сигналов квантования путем многократного умножения пилот-сигнала системой фазовой автоподстройки частоты, что позволяет уменьшить погрешность, связанную с неравномерностью скорости протяжки магнитной ленты [6] в процессе воспроизведения.

Известны способы корректировки записей девиации скорости магнитной ленты численными методами, заключающиеся в том, что по результатам одновременного преобразования отклика канала и пилот-сигнала производится переоцифровка записи с применением аппроксимирующих сплайнов при одновременном сглаживании откликов. Эти способы требуют применения больших вычислительных мощностей.

В настоящей работе проведено экспериментальное изучение влияния нестабильности скорости ленты на результирующую АЧХ без употребления аппаратных средств и различных программ для корректировки местоположения точек опроса по отношению к записанному отклику. Для этого эксперимента предварительно было установлено, что величина нестабильности протяжки ленты за единицу времени в процессе записи-воспроизведения составляет $\pm 0,023$ мм на каждые 8 мм ленты, т.е. $\sim 0,016\%$, причем основная ошибка вносится в процессе записи. Было решено временной сдвиг для синхронного суммирования определять программным путем после занесения серии оцифрованных откликов в память микроЭВМ. При оцифровке записанных откликов применялся генератор стабильной частоты. Программа определения сдвига для суммирования состоит из двух частей. В первой части производится грубая оценка путем отыскивания участков максимальной крутизны на записи, которые соответствуют вступлению отклика. Во второй части определяются сдвиги с точностью до одного отсчета путем коррелирования откликов между собой. Опыт показал, что при отношении сигнал/помеха ~ 7 и более уже первая часть программы точно определяет сдвиг. При отработке методики экспериментально оценивались эффекты от суммирования и отдельно исследовался вопрос об ошибках, вносимых процессом записи-считывания. Критерием служила оценка точности АЧХ в зависимости от частоты. В качестве экспериментальной оценки максимального отклонения от истинной АЧХ было решено принять амплитуду колебания экспериментальной кривой АЧХ. Такая оценка правомочна, если принять во внимание, что имеются априорные соображения о гладкости и характере поведения истинной АЧХ. На рис. 2 приведены экспериментальные АЧХ, полученные в результате оцифровки откликов на импульсное возбуждение части канала, состоящей из формирующего усилителя, без записи на магнитный носитель. Синхронизация опроса производилась от стабильного генератора. Частота опроса составляла 100 Гц. Запуск П-импульса длительностью 1 мс в калибровочную катушку производился каждым 600-м импульсом синхрогенератора. При расчете спектра применялся метод быстрого преобразования Фурье (БПФ). Спектр рассчитывался по 512 значениям. АЧХ получалась как спектр переходного процесса, домноженная на квадрат круговой частоты ω^2 . Из рисунка видно проявление эффекта синхронного суммирования. Границы определения АЧХ сдвигаются в область высоких частот с увеличением количества накопленных переходных процессов с точностью до 10% (7,6; 13; 15 Гц) и до 20% (8,8; 17; 21,5 Гц) (см. рис. 2).

Кроме уже указанных искажений, вносимых процессом записи-воспроизведения (назовем их временными), существуют искажения амплитудные. Они связаны не

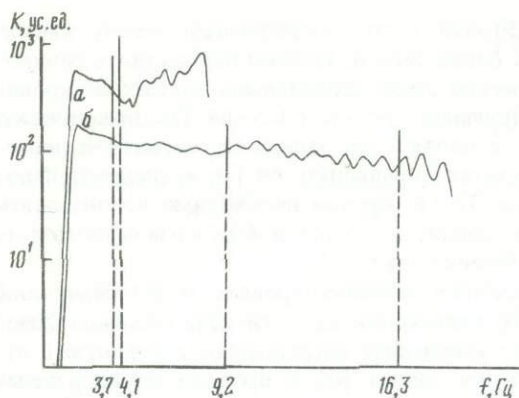


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики сквозного канала сейсмостанции АСС 6/12 с оценкой границ точности по частоте, рассчитанные по откликам после записи и воспроизведения с магнитной ленты

a — отдельный отклик; *b* — синхронная сумма 20 откликов

столько со скоростью движения ленты по магнитной головке, сколько с неравномерностью натяжения ленты и в связи с этим с нестабильностью коэффициента отдачи. Экспериментально установлено, что эти искажения в отличие от временных возникают главным образом при воспроизведении и достигают 10% сигнала. Таким образом, процесс воспроизведения вносит дополнительные помехи в запись переходного процесса.

Для получения АЧХ сквозного регистрирующего канала станции АСС 6/12 "Черепаша" запись, полученная с коэффициентом транспонирования 12,5 при скорости воспроизведения 25 мм/с, подвергалась оцифровке с синхронизацией опроса от независимого генератора. Частота опроса была выбрана 1500 Гц, что для условий записи составляет 120 Гц на канал. Определение сдвигов для синхронного суммирования осуществлялось программным путем.

На рис. 3 представлена экспериментальная АЧХ, полученная по отдельным и по 20 усредненным откликам, воспроизведенным с магнитной ленты с точностью до 10% (3,7; 9,2 Гц) и до 20% (4,1; 16,3 Гц). Сравнивая рис. 2 и 3, можно увидеть, что процесс запись-воспроизведение вносит изменения в АЧХ канала. Это видно по форме АЧХ в низкочастотной области. При сравнении экспериментальных АЧХ, полученных в результате обработки отдельного отклика на выходе формирующего усилителя и после процесса запись-воспроизведение, видно, что вносимые вторым процессом шумы существенно снижают частотные границы, в которых определяется АЧХ. Этим же явлением и нестабильностью скорости протяжки магнитной ленты объясняется несущественное сужение границ при определении АЧХ по 20 усредненным и воспроизведенным с ленты откликам.

В заключение необходимо отметить, что технические средства, программное обеспечение и методика осуществления калибровки, разработанные для сейсмостанции АСС 6/12 "Черепаша", пригодны для их использования и осуществления калибровки любого сейсмометрического канала.

ВЫВОДЫ

1. Разработан и опробован в практической работе полный комплекс технических средств, программ и методика для калибровки сейсмического измерительного канала на примере сейсмостанции АСС 6/12 "Черепаша".

2. Произведено практическое определение АЧХ канала сейсмостанции АСС 6/12 с применением метода синхронного суммирования. Запись откликов на импульсное воздействие производилась в рабочем режиме станции каждые 8 ч без загробления каналов на время проведения калибровки.

3. Исследованы искажения, вносимые в сигнал процессом запись-воспроизведение. На практике показана возможность получения с достаточной степенью точности АЧХ

сквозного измерительного канала станции АСС 6/12 без учета нестабильности протяжки магнитной ленты, с применением легко реализуемой на микроЭВМ "Электроника ДЗ-28" программы определения сдвигов суммирования.

4. Произведена оценка точности получаемых АЧХ и частотных границ, в пределах которых реализуется эта точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин А.А., Зеликман Э.И., Мавлянбердыев М.М. и др. Калибровка сейсмометрических каналов с использованием микроЭВМ // Приборы и методы регистрации землетрясений. М.: Наука, 1987. С. 75–81. (Сейсмические приборы; Вып. 19.)
2. Каазик П.Б., Рахматуллин М.Х., Трегуб Ф.С. Импульсная калибровка станций магнитной записи АСС 6/12 // Там же. С. 81–88.
3. Башилов И.П., Волосов С.Г., Горбатилов А.В. и др. О калибровке аппаратуры типа "Черепаша" // Сейсмическое просвечивание очаговых зон. М.: Наука, 1983. С. 14–21.
4. Импульсная калибровка сейсмометрических каналов // Под ред. З.И. Арановича, А.Я. Меламуда. М.: Наука, 1976. 236 с.
5. Захарченко Н.З., Мишаткин В.Н. Выбор частоты дискретизации сигналов при цифровой записи // Инструментальное изучение сейсмических колебаний. М.: Наука, 1983. С. 148–155. (Сейсмические приборы; Вып. 16.)
6. Борягин А.М., Каплан В.П., Карп Б.Я. и др. Устройство преобразования аналоговых записей автономных донных сейсмических станций в цифровую форму с записью на цифровой магнитофон в формах ЕС ЭВМ // Инструментальные средства сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1980. С. 60–63. (Сейсмические приборы; Вып. 13.)

УДК 550.34

*А.А. Володин, Э.И. Зеликман, Н.К. Капустян,
А.М. Поликарпов, В.М. Фрейд*

СПОСОБ КАЛИБРОВКИ СЕТИ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМИЧЕСКОГО СИГНАЛА, ГЕНЕРИРУЕМОГО ГЭС

Широко развиваемые в настоящее время телеметрические системы сбора и обработки сейсмической информации (например, как система в районе Курекского водохранилища [1]), а также инженерно-сейсмологические сети, используемые для контроля состояния крупных инженерных сооружений (например, плотин ГЭС), характеризуются труднодоступностью и автономностью датчиков сейсмической информации. Организация калибровки в таких условиях требует наличия дополнительных кабельных линий для подачи калибровочных сигналов, что, естественно, ведет к удорожанию системы наблюдений или созданию специальных калибровочных устройств, конструктивно объединенных с сейсмометром, что значительно снижает срок автономности из-за повышенного потребления энергии. Конечно, если методика наблюдений требует высокоточной калибровки, то указанные недостатки не являются препятствиями. Если же необходимая точность определения частотных характеристик не превышает обычных сейсмологических требований (10–30%), то могут быть использованы приемы, основанные на одновременной регистрации каналами удаленного вибросточника.

Сущность способа заключается в следующем. Единый источник механических вибраций возбуждает сейсмические колебания известной частоты и амплитуды, которые регистрируются каналами сети. Так как характер распространения колебаний к каждому из сейсмометров и условия в местах их установки различны, то и амплитуда колебаний, регистрируемых каждым из сейсмометров, будет различна. Для учета этих различий необходимо получить эталонные записи с каждого канала в начале эксплуатации и с ними производить сравнение в дальнейшем для выявления изменений характеристик каналов.

В качестве источника вибрационных сигналов можно использовать специализированные устройства, например вибраторы, однако более заманчиво проводить калибровку с помощью техногенных сейсмических шумов, в том числе устройств, непосредственно связанных с объектом исследования, например турбин ГЭС или мощных синхронных электродвигателей и т.п.

Опыт исследования сейсмического сигнала, генерируемого Нурекской ГЭС [2] на частотах 3,33; 6,67; 10,00 Гц, показал, что уверенная регистрация сигнала возможна в радиусе не менее 70–100 км, что вполне достаточно для проведения калибровки сети сейсмометров на площади 15–30 тыс. км². В связи с тем что данный способ калибровки основан на выделении слабого сигнала методом накопления, точность калибровки, выполняемой, например, по способу [3], ограничивается стабильностью источника вибрации и возможными изменениями состояния среды под действием геодинамических процессов (например, лунно-солнечных приливов), ведущих к изменению условий распространения сейсмических волн.

Оценим соотношения между параметрами источника колебаний, размерами района, который он может обслуживать, и временем регистрации, необходимым для получения калибровки с заданной точностью. Амплитуда сигнала, прошедшего расстояние R от источника в среде без промежуточных границ, равна [4].

$$A(R) = A_0 (R_0/R)^n \exp(-\pi f_0 (R - R_0)/QV), \quad (1)$$

где A_0 – амплитуда сигнала на малом расстоянии R_0 от источника; f_0 – частота сигнала; Q – добротность среды; V – скорость распространения; $n = 0,5$ для поверхностных волн. Для объемных волн, так как тип источника колебаний не исследовался, мы полагали, согласно [5], $n = 1$ (источник типа осциллирующей сферы), для источника типа центра расширения $n = 2$.

Для монохроматического сигнала соотношение сигнал/помеха (по мощности) зависит от времени накопления T и спектральной плотности микросейсм на данной частоте σ^2 (в полосе $1/T$):

$$S/N = TA^2(R)/\sigma^2.$$

Пусть задана точность M (в %), определяемая отношением сигнал/помеха, т.е.

$$M^2 = TA^2(R)/\sigma^2. \quad (2)$$

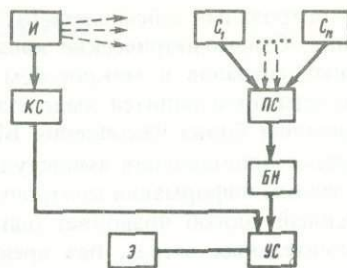
Из формул (1) и (2) получаем, что время накопления равно

$$T = M^2 \sigma^2 / A_0^2 (R/R_0)^{2n} \exp(2\pi f_0 (R - R_0)/QV). \quad (3)$$

Данная формула показывает связь необходимого времени накопления с характерным размером L -области, доступной для калибровки при заданных параметрах: точности M , известных условиях в источнике A_0 , f_0 , характеристиках распространения QV , учитывая, что L – эпицентральное расстояние, а R – расстояние по лучу.

Сравним оценки, получаемые по формуле (3), с нашими данными регистрации сигнала Нурекской ГЭС на частоте $f_0 = 3,33$ Гц на расстояниях 1 [6] и 70 км. Уровни шумов на этих расстояниях в точках регистрации сопоставимы. На расстоянии 1 км от ГЭС $A_0/\sigma \sim 4$, на 70 км после накопления $A/\sigma \sim 10$, т.е. на 70 км достигнута точность выделения сигнала $M \sim 10\%$. По формуле (3) в предположении, что волны от ГЭС объемные, по амплитуде доминируют волны $P_{отр}^M$, глубина границы 40 км [7], т.е.

Блок-схема калибровки сети станций
с помощью сейсмического сигнала ГЭС



$R \sim 100$ км, $Q \sim 100-500$ [8, 9], $V = 6$ км/с, получаем для $n = 1$ соответственно $T \sim 2 \cdot (10^6-10^5)$ с, для $n = 2$ и принятых значениях добротности $T \sim 2 \cdot (10^{10}-10^9)$ с. В нашем эксперименте на расстоянии 70 км для получения соотношения сигнал/помеха $A/\sigma \sim 10$ потребовалось время накопления $T \sim 30$ мин ($\sim 2 \cdot 10^3$ с), т.е. существенно меньше, чем по формуле (3) для объемных волн. Если предположить, что волны поверхностные, т.е. $n = 0,5$, $R \sim L \sim 70$ км, то из формулы (3) для $Q = 100-500$ и $V \sim 3$ км/с получаем $T \sim 6 \cdot (10^4-10^3)$ с, что, учитывая оценочный характер расчетов, хорошо согласуется с нашими данными.

Полученные оценки, во-первых, указывают на то, что сейсмические волны от ГЭС на больших удалениях поверхностные, т.е. в формуле (3) при расчетах для сигналов от ГЭС можно принимать $n = 0,5$. Во-вторых, подтверждена реальность калибровки с помощью сигналов ГЭС сейсмометров на расстоянии до 70-100 км при времени $T \sim 10^3$ с с точностью $\sim 10\%$. Заметим, что относительно большое время, требуемое для калибровки, не затрудняет прием и анализ сейсмической информации, так как сейсмический сигнал ГЭС всегда присутствует в данных наблюдения, и, кроме того, на удалениях начиная с нескольких километров сигнал ГЭС не превышает уровня микросейсмического фона. Следует отметить также, что полученные размеры площади, на которой возможно проведение калибровки по данному способу, соответствуют размерам региональных сейсмических сетей, т.е. тут возможно проведение калибровки по единой методике.

Рассмотрим еще один аспект. Из формулы (1) следует, что для точек регистрации на расстоянии dR друг от друга относительное изменение амплитуды равно

$$(dA/A) = [(n/R) + \pi f_0/QV] (dR).$$

Для достаточно больших R

$$(dA/A) = (\pi f_0/QV) dR = (\pi/Q\lambda) (dR),$$

где λ — длина волны. В случае регистрации поверхностных волн от Нурекской ГЭС при $V = 3$ км/с и $f_0 = 3,33$ Гц $\lambda \sim 1$ км. При $dR = \lambda$ и $Q = 100-500$ получаем $(dA/A) < 3\%$. Эту величину можно рассматривать как оценку точности при взаимной калибровке сейсмометров на площадке регистрации с характерными размерами, равными длине волны сигнала, излучаемого ГЭС. Заметим, что при регистрации более высокочастотных сейсмических сигналов, например при просвечивании с помощью пневмоисточника ($f \sim 8-10$ Гц), сейсмометры разносятся на расстояние 100 м. Таким образом, при организации пункта наблюдения в виде коротких профилей (например, с использованием АСС "Черепаша" с шестью каналами) вся расстановка укладывается в длину волны сейсмического сигнала ГЭС. На таких расстановках можно использовать сигналы ГЭС для калибровки каналов относительно друг друга — аналогично калибровке на виброплатформе, но без демонтажа расстановки. Если для выделения сигнала ГЭС из записи реализуется, например, корреляционный способ калибровки [3], то ожидаемая точность калибровки с помощью сигнала ГЭС должна быть не хуже 10%.

На рис. 1 приведена блок-схема данного способа калибровки. Источник механических вибраций И излучает в среду сейсмические колебания. Около источника рас-

положен контрольный сейсмометр КС для регистрации частоты и амплитуды колебаний в источнике. Сейсмометрические каналы сети C_1-C_n регистрируют суперпозицию калибровочных сигналов и микросейсм и передают информацию на приемную станцию ПС, после чего производится выделение калибровочных сигналов и измерение амплитуд при помощи блока накопления БН. Устройство сравнения УС анализирует информацию путем сопоставления амплитуд сигналов на разных частотах с эталонными данными Э с учетом информации контрольного сейсмометра.

Изложенный способ позволяет одновременно калибровать большое число каналов без дополнительных затрат, без прекращения регистрации и с необходимой периодичностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана / Под ред. М.А. Садовского. Душанбе: Дониш, 1987. 119 с.
2. Александров А.Л., Володин А.А., Дададжанов И.А. и др. Изучение периодического сейсмического сигнала от Нурекской ГЭС // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 260–265.
3. А.С. 1160341 СССР, МКИ G 01 V 1/16. Способ калибровки сейсмических каналов / А.А. Володин, Э.И. Зеликман, Н.К. Капустян и др. 3440828/18-25; Заявл. 21.05.82; Опубл. 07.06.85, Бюл. № 21.
4. Жарков В.Н. Внутреннее строение Земли и планет. М.: Наука, 1978. 191 с.
5. Чичинин И.С., Кузьменко А.П. Теоретические модели сферических источников сейсмических волн // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками. М.: Наука, 1981. С. 94–112.
6. Володин А.А., Дададжанов И.А., Зеликман Э.И. и др. Опыт сейсмического просвечивания с накоплением сигналов пневмоизлучателя // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 4. С. 107–109.
7. Фихиева Л.М., Дуркин А.Т., Кулагин В.К. Экспериментальные модели земной коры основных тектонических зон Таджикской депрессии. Душанбе, 1983. 97 с. Деп. в ВИНТИ, № 691.
8. Экспериментальные исследования недр Земли / Под. ред. А.М. Епинатьевой. М.: Наука, 1978. 158 с.
9. Шериф Р., Гелдарт Л. Сейсморазведка. М.: Мир, 1987. Т. 1. 447 с.

V. МЕТРОЛОГИЯ

УДК 550.34

*Л.А. Гончаров, И.М. Васильев, В.Г. Медведев,
В.А. Токмаков*

НОРМИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЕЙСМОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАНАЛОВ

Расширение и усложнение сейсмических исследований предъявляют все более высокие требования к надежности сейсмоизмерительной аппаратуры. Опыт эксплуатации этой аппаратуры показывает, что эффективность использования некоторых типов изделий недостаточно высока; при этом из-за низкой надежности аппаратуры утрачивается до 50% необходимой информации [1]. Одной из причин такого положения является то, что решение проблемы обоснования требований к надежности сейсмоизмерительной аппаратуры не завершено.

Настоящая работа посвящена рассмотрению влияния надежности на качество функционирования электронных сейсмических каналов (ЭСК) и разработке на этой основе норм надежности. В соответствии с общепринятой методикой наблюдений на сейсмических станциях ЭСК могут либо использоваться круглосуточно, либо работать в старто-стопном режиме. Задача нормирования надежности для такой аппаратуры может быть решена, если типовую структуру сейсмического канала [2] рассматривать как систему массового обслуживания с отказами.

Нормирование надежности непрерывно работающей аппаратуры ЭСК. Рассмотрим некоторые свойства статистики землетрясений, необходимые для построения математической модели процесса эксплуатации ЭСК. Как известно, в большинстве работ прикладного характера используется модель простейшего потока событий [3].

Проиллюстрируем возможность использования модели простейшего потока на примере статистики землетрясений, вошедших в Каталог землетрясений Средней Азии и Казахстана за 1981 г. Проверим соответствие вероятности возникновения k_i подземных толчков на промежутке времени, равном одним суткам, распределению Пуассона. Статистика распределения подземных толчков приведена в табл. 1.

Поскольку расхождения экспериментальных и расчетных данных невелики, то правомерен вывод: данные каталога землетрясений не противоречат гипотезе о том, что число подземных толчков в сутки имеет пуассоновское распределение с интенсивностью $\lambda' = 0,292$.

Анализ каталога землетрясений позволяет считать требование ординарности выполненным: в случае появления групповых землетрясений вместо неординарного потока землетрясений рассматривается ординарный поток моментов возникновения подземных толчков, для него все одинаковые значения времени возникновения землетрясения заменяются одним.

Данные каталога землетрясений проверялись также на отсутствие медленных изменений интенсивности потока: изменений интенсивности потока от времени не обнаружено. Был определен 95%-ный доверительный интервал для интенсивности потока

© Л.А. Гончаров, И.М. Васильев, В.Г. Медведев, В.А. Токмаков, 1990

' λ — величина, обратная числу толчков.

Таблица 1

Статистика распределения числа подземных толчков

k_i	ν_i с одинаковым k_i	Значения вероятностей P_i	Математическое ожидание $M\{\nu_i\}$	k_i	ν_i с одинаковым k_i	Значения вероятностей P_i	Математическое ожидание $M\{\nu_i\}$
≥ 3	32	0,0817	29,82	8	45	0,1304	47,60
4	39	0,0912	33,29	9	32	0,1014	37,01
5	41	0,1277	46,61	10	21	0,0710	25,92
6	53	0,1490	54,39	11 и	38	0,0986	35,99
7	64	0,1490	54,39	более			

Примечание. k_i — количество подземных толчков в сутки; ν_i — число суток.

Месяц года	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Статистика землетрясений	227	233	242	212	189	179	211	190	223	212	207	231
Статистика числа серий	117	111	135	98	84	96	117	94	107	102	102	111
Вероятность $p \{ \chi^2 \}$	0,9	0,8	0,7	0,5	0,1	0,3	0,9	0,3	0,3	0,3	0,5	0,8

землетрясений. С целью обоснования норм надежности аппаратуры ЭСК достаточно рассмотреть верхнюю границу этого интервала $\lambda = 0,6$ и считать этот поток стационарным.

Известно, что условие, которому должен удовлетворять пуассоновский поток, состоит в независимости и экспоненциальном распределении отрезков времени между поступлениями требований, поэтому проверялась гипотеза о взаимной независимости с помощью "критерия числа серий" [4], а затем гипотеза об экспоненциальном распределении промежутков времени между землетрясениями. Результаты проверки приведены ниже.

Таким образом, по итогам анализа данных Каталога землетрясений Средней Азии и Казахстана за 1981 г. можно считать, что использование модели простейшего потока для решения задачи нормирования показателей надежности аппаратуры ЭСК правомерно.

Пусть на вход ЭСК поступает простейший поток сигналов о землетрясении с интенсивностью λ . Длительность регистрации каждого сейсмического сигнала — случайная величина с функцией распределения $F(x)$. Пусть $H(x)$ — функция распределения времени безотказной работы ЭСК от момента появления сигнала о землетрясении до момента отказа аппаратуры. Отказавшая аппаратура немедленно начинает восстанавливаться. Длительность восстановления также случайная величина с функцией распределения $G(y)$.

Исходные данные для расчета: λ — интенсивность потока сигналов о землетрясениях 0,12; 0,6; 6,0; 12; 30; μ — интенсивность потока зарегистрированных сигналов о землетрясениях 5; 7,5; 15; 30; 60; τ — интенсивность потока отказов аппаратуры ЭСК 0,01; 0,004; 0,001; 0,0005; 0,00025; ξ — интенсивность потока восстановлений аппаратуры ЭСК 0,8; 1,0; 1,2; 2,0; 4,0.

Наборы исходных данных составлены с учетом Каталога землетрясений Средней Азии и Казахстана за 1981 г., статистики сильных движений, а также результатов подконтрольной эксплуатации сейсмоизмерительной аппаратуры различного назначения [5, 6]. Расчеты выполнены на ЭВМ.

При поступлении сигнала о землетрясении возможны три случая: сигнал принят и

Таблица 2

Результаты вычислений вероятности приема
и регистрации сейсмического сигнала о землетрясении

Количество ЭСК (n)	Длительность регистрации сигнала, мин					Примечание
	1	2	4	8	12	
1	0,989	0,979	0,960	0,923	0,890	$\tau = 0,01$
2	0,997	0,997	0,996	0,993	0,989	$\xi = 0,8$
1	0,990	0,980	0,962	0,926	0,894	$\tau = 5 \cdot 10^{-4}$
2	0,999	0,999	0,999	0,997	0,993	$\xi = 4,0$

зарегистрирован; сигнал потерян из-за отсутствия канала для его приема и регистрации; сигнал потерян в процессе обработки из-за того, что аппаратура ЭСК отказала и не оказалось резервных комплектов для ее замены. Следовательно, вероятность приема и регистрации сигнала о землетрясении Q_n можно представить в виде

$$Q_n = 1 - P_{\text{отк}}(n) - P_{\text{но}}(n), \quad (1)$$

где $P_{\text{отк}}(n)$ – вероятность того, что сигнал о землетрясении будет потерян,

$$P_{\text{отк}}(n) = \rho P_{00}(n) \sum_{k, l=0}^n \frac{\delta^l}{k!l!}, \quad (2)$$

$P_{00}(n)$ – вероятность того, что все каналы приема и регистрации сигналов о землетрясениях исправны и свободны,

$$P_{00}(n) = \left[\sum_{\substack{k, l=0 \\ k+l=n}}^n \frac{\rho^{k+l} \delta^l}{k!l!} \right]^{-1}$$

где $\rho = \lambda/(\mu + \tau)$ – приведенная плотность потока землетрясений; $\delta = \tau/\xi$ – приведенная плотность потока неисправностей.

В уравнении (1) $P_{\text{но}}(n)$ – вероятность того, что сигнал о землетрясении не будет принят и зарегистрирован полностью,

$$P_{\text{но}}(n) = P_{00}(n) \sum_{i=1}^n \alpha^i \sum_{\substack{k, l=0 \\ k+l=n-i}}^{n-i} \frac{\rho^{k+l} \delta^l}{k!l!}, \quad (3)$$

где $\alpha = \tau/(\mu + \tau)$ – вероятность того, что аппаратура ЭСК откажет в процессе приема и регистрации сейсмического сигнала. Результаты вычислений вероятности приема и регистрации сейсмических сигналов Q_n в зависимости от числа каналов и длительности регистрации представлены в табл. 2.

Таким образом, при интенсивности потока землетрясений не более 0,6 1/ч и длительности регистрации сейсмических сигналов не более 12 мин определяющее влияние на качество функционирования сейсмической станции оказывает ее структура: при изменении наработки на отказ аппаратуры электронного сейсмоизмерительного канала в 20 раз (от 100 до 2000 ч) и времени восстановления в 5 раз (от 75 мин до 15 мин) потери информации уменьшились всего на 3%; в то же время создание дублирующего ЭСК даже из сравнительно ненадежной аппаратуры (наработка на отказ 100 ч, время восстановления 75 мин) уменьшает потери информации примерно в 10 раз.

Нормирование надежности сейсмоизмерительной аппаратуры со сложным режимом работы. Сейсмоизмерительная аппаратура, предназначенная для наблюдений за сильными землетрясениями, имеет сложный режим работы, характеризующийся постоянной

Т а б л и ц а 3

Нормы надежности аппаратуры электронных сейсмических каналов

Группа по ГОСТ 22261-82	Число элементов аппаратуры ЭСК	Наработка на отказ, ч	Среднее время восстановления, мин
Переносная, 5, 6, 7	≥ 500	5000	60
	500-1000	2500	90
	< 1000	1250	90
Возимая, 4	≥ 1000	5000	40
	1000-2000	2500	60
	≤ 2000	1250	60
Стационарная, 1, 2, 3	≥ 2000	10000	40
	2000-4000	5000	40
	< 4000	2500	40
Аппаратура ЭСК со сложным режимом работы:			
ожидание применения		50000	600
работа, сильное землетрясение		0,25	Не восстанавливается
Периодичность профилактики			Ежеквартально

готовностью к работе и случайными короткими промежутками занятости. Эффективность использования такой аппаратуры наиболее полно оценивается вероятностью успешного выполнения задания.

Как известно, магнитуда 5,5 является той глобальной пороговой величиной землетрясения, начиная с которой необходим полный каталог местоположения событий. Учитывая это, использовалась статистика землетрясений Таджикистана за 1955-1980 гг. и статистика землетрясений Средней Азии с энергетическим классом не менее чем 13. Как и в предыдущем случае, данная статистика проверялась на отсутствие медленных изменений интенсивности потока землетрясений; проверялись также соответствие временных интервалов между сильными землетрясениями экспоненциальному распределению и взаимная независимость интервалов. Полученные результаты позволяют считать, что статистика сильных землетрясений достаточно хорошо согласуется с математической моделью простейшего потока.

Это допущение не противоречит гипотезе о том, что исторический ряд данных континентального сейсмоактивного региона Юго-Западной Азии может обладать скрытой периодичностью с длительностью главного сейсмического цикла 110 ± 15 лет [7]. Так как срок службы сейсмоизмерительной аппаратуры существенно меньше этого цикла и, как правило, не превышает 10 лет, то для решения задачи нормирования надежности правомерно использовать математическую модель простейшего потока, в которой интенсивность потока землетрясений является параметром.

Длительность функционирования аппаратуры ЭСК в режиме "Работа" (вибрация, режим сильного землетрясения) определяется исключительно на основе практического опыта. Как следует из статистики сильных движений [8], при увеличении длительности землетрясения частота появления таких событий уменьшается, поэтому распределение сильных движений вполне удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальным распределением вида

$$F(t) = 1 - \exp 0,042 t .$$

Существенной особенностью эксплуатации изделий со сложным режимом работы является проведение технического обслуживания аппаратуры ЭСК после каждого сильного землетрясения. Тогда для выбора норм надежности такой аппаратуры может быть использован принцип практической уверенности. Анализ полученных результатов

и данных по эксплуатационной надежности сейсмоизмерительной аппаратуры различного назначения позволяет определить нормы надежности для аппаратуры электронных сейсмических каналов (табл. 3).

Полученные результаты позволяют утверждать: если уровень надежности ЭСК соответствует приведенным нормам, а число каналов приема и регистрации сейсмической информации не менее двух, то потери информации о землетрясениях не превышают 1%. Предлагаемый подход был использован для нормирования надежности изделий СМ-3, С5-С, ССРЗ-М, РФУ-2М. Таким образом, задача нормирования надежности может быть решена с учетом статистики землетрясений и максимально допустимых потерь информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прогноз землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. Душанбе: Дониш, 1982. 443 с.
2. Мирзоев К.М., Азизова А.А. Статистические закономерности группирования коровых землетрясений Таджикистана и прилегающих территорий. Землетрясения Средней Азии и Казахстана 1981. Душанбе: Дониш, 1983. 68 с.
3. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. М.: Сов. радио, 1971. 520 с.
4. Андронов А.М., Хижняк А.Н. Математические методы планирования и управления производственно-хозяйственной деятельностью предприятий гражданской авиации. М.: Транспорт, 1977. 215 с.
5. Гончаров Л.А. Характеристики надежности некоторых сейсмометров, используемых при инженерно-сейсмических исследованиях // Сейсмические приборы; Вып. 8. М.: Наука, 1975. С. 167–171.
6. Харин Д.А., Гончаров Л.А., Токмаков В.А. Оценка надежности станции инженерно-сейсмической службы // Сейсмические приборы; Вып. 9. М.: Наука, 1976. С. 153–157.
7. Лыков В.И., Соболев Г.А., Гордковская Т.Н. и др. Методика выявления развивающихся землетрясений по комплексу сейсмологических параметров // Прогноз землетрясений. Душанбе; Москва: Дониш, 1984. № 5. С. 127–138.
8. Рустанович Д.Н. Колебания поверхности Земли в эпицентральных зонах сильных землетрясений. М.: Наука, 1974. 96 с.

УДК 550.34

В.А. Чистяков

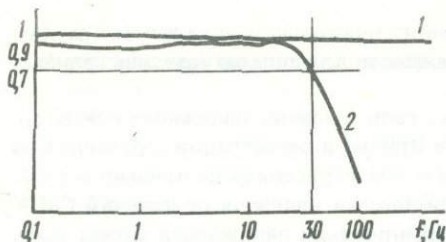
О ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ СЛУЧАЙНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Разработанные и изготовленные в ОКБ ИФЗ АН СССР образцовые установки ПСГУ и ПСВУ предназначались для воспроизведения соответственно горизонтальных и вертикальных колебаний в диапазоне частот 0,01–20 Гц и перемещений до 20 мм. Эти установки в настоящее время широко используются в стране для исследования характеристик сейсмометрической аппаратуры путем создания высокоточных синусоидальных возмущений. Однако при различных физических экспериментах или при исследовании характеристик сейсмометрических каналов возникает необходимость воспроизведения случайных колебаний по крайней мере в диапазоне частот до 20 Гц. Например, при воспроизведении установками белого шума оказывается возможным на экране анализатора спектра наблюдать непосредственно АЧХ сейсмометра.

Передаточная функция установок ПСГУ, ПСВУ в первом приближении характеризуется зависимостью

$$W_y(p) = K_y / (T_y^2 p^2 + 2\xi_y T_y p + 1), \quad (1)$$

где K_y , T_y , ξ_y — соответственно коэффициент передачи, постоянная времени и коэффициент затухания.



Спектральные плотности шума, поданного на вход установки, и случайных колебаний, воспроизводимых установкой

Конструктивные и схемотехнические параметры установок выбраны такими, что частота собственных недемпфированных колебаний $f = 1/2\pi T$ не менее 20 Гц, а коэффициент затухания может быть установлен равным 0,7. Это позволяет воспроизвести в диапазоне частот 0,01–20 Гц белый шум. В качестве генератора белого шума может быть использован любой серийно выпускаемый в стране генератор, например Г2-57, который генерирует белый шум от 0 до 50 кГц.

На рисунке показаны графики спектральных плотностей случайного электрического шума на входе установки ПСВУ (кривая 1) и на выходе (кривая 2). Спектральный анализ осуществлялся с помощью низкочастотного анализатора спектра СК4-72, позволяющего анализировать случайные процессы в диапазоне частот 0,05–20 кГц. Погрешность измерения амплитуды соответствующих спектральных составляющих не превышает 6%. Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что изменения воспроизводимого установками спектра сейсмических колебаний по сравнению с входным спектром не превышают 3 дБ. При этом наибольшие значения эти изменения достигают на частотах, превышающих 10 Гц. Очевидно, что при воспроизведении на установках случайных микросейсмических колебаний в диапазоне частот до 10 Гц эти искажения будут существенно меньше.

Таким образом, использование образцовых установок ПСГУ, ПСВУ и серийного анализатора спектра СК4-72 обеспечивает с погрешностью в пределах $\pm 10\%$ воспроизведение случайных сейсмических шумов в диапазоне частот 0,05–10 Гц. Если использовать для формирования спектров какие-либо фильтры, формирующие из белого шума заданный случайный процесс, либо микроЭВМ, то установки ПСГУ и ПСВУ позволят воспроизвести любой случайный процесс, спектр которого не превышает 20 Гц.

УДК 550.34

В.А. Чистяков, Н.В. Грифонов

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НАКЛОНОВ ПОДВИЖНЫХ СИСТЕМ ОБРАЗЦОВЫХ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ПСГУ и ПСВУ

Разработанные и изготавливаемые в ОКБ ИФЗ АН СССР образцовые установки для определения метрологических характеристик сейсмометрической аппаратуры воспроизводят высокоточные синусоидальные колебания в диапазонах частот 0,01–20 Гц, перемещений 0,1–20 мм. Погрешность измерения перемещений находится в пределах $\pm 1,5\%$, поперечные и угловые колебания не более 1%. Угловые колебания составляют не более 8 с, а нелинейные искажения воспроизводимых колебаний не более 1%. Основным не-

© В.А. Чистяков, Н.В. Грифонов, 1990

достатком указанных установок являются наклоны подвижных систем, которые изменяются синфазно с воспроизводимыми колебаниями. При этом погрешность воспроизведения горизонтальных ускорений на установке ПСГУ

$$\delta \ddot{X} = (g \sin \alpha / A \omega^2) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где \ddot{X} – воспроизводимое ускорение; g – ускорение свободного падения; α – угол наклона подвижной системы установки к плоскости горизонта; A, ω – соответственно амплитуда и круговая частота воспроизводимых перемещений.

Например, при $\alpha = 5^\circ$, $A = 20$ мм, $\omega = 2 \cdot 10^{-2}$ с⁻¹, $g = 9,81 \cdot 10^3$ мм/с² получим из (1) $\delta \ddot{X} = 300\%$. На частоте 0,1 Гц эта погрешность уменьшится до 3%.

Для установки ПСВУ, воспроизводящей вертикальные колебания, эта погрешность будет равна

$$\delta \ddot{Y} = (g \cos \alpha / A \omega^2) \cdot 100\%. \quad (2)$$

При тех же режимах колебаний на частоте 0,01 Гц эта погрешность $\delta \ddot{Y} = 8 \cdot 10^{-3}$. Однако если ось маятника вертикального сейсмометра наклонена к плоскости горизонта, то эта погрешность существенно возрастает. При углах наклона $\beta = 30^\circ$ она составит на частоте 0,01 Гц 150%. Даже из-за технологических перекосов осей в 1° на частоте 0,01 Гц она достигает 6%.

Таким образом, для успешного использования установок ПСГУ и ПСВУ на частотах 0,01–0,1 Гц требуется по крайней мере в 100 раз уменьшить погрешность воспроизведения от наклонов подвижных систем в плоскости горизонта. Добиться этого можно несколькими путями. Во-первых, доработкой конструкции установок с целью уменьшения наклонов подвижных систем; во-вторых, за счет введения поправок в результаты измерений; в-третьих, применением соответствующих методов обработки информации. Очевидно, что для уменьшения рассмотренной погрешности с 300% до долей процента необходимо использовать все указанные пути одновременно.

В настоящей работе проводятся исследования причин возникновения наклонов подвижных систем, на основании которых формируются рекомендации по доработке установок.

Вертикальная установка ПСВУ. Кинематическая схема установки ПСВУ, воспроизводящей колебания в вертикальной плоскости, показана на рис. 1. Установка состоит из основания 1, на котором с помощью параллелограммного механизма 2 устанавливается подвижная система 3. Стойки параллелограммного механизма 2 соединены с подвижной системой 3 и основанием посредством упругих шарниров 4. Для вывешивания подвижной системы в плоскость горизонта используется пружина 5. На подвижной системе установлены также испытуемый сейсмометр 6, датчик перемещений емкостного типа 7 и возбудители колебаний электродинамического типа 8. При этом датчик перемещений 7 смещен от вертикальной оси симметрии подвижной системы ОУ на величину $X_{д.п.}$, возбудитель колебаний 8 – на величину $X_{в.}$, а центр масс – соответственно на $l_{ц.м.}$. Будем считать также, что продольная ось пружины 5 составляет с осью ОУ угол β .

Уравнения сил и моментов, действующих на подвижную систему 3, согласно рис. 1, запишутся в виде

$$\begin{aligned} R_y^B + R_y^H - m_1 g + R_y^{mp} + F_B^y &= 0; \\ R_x^B - R_x^H - R_x^{mp} &= 0; \\ R_x^H l_n / 2 + R_x^B (l_n / 2) - m_y l_{ц.м.} - R_y^B x_B - R_x^{mp} (l_n / 2). \end{aligned} \quad (3)$$

Сила, создаваемая возбудителями колебаний,

$$F_B = (K_{д.п.у} + x_{д.п} K_{д.п} \varphi) K_y K_B, \quad (4)$$

где $K_{д.п.}$, K_y , K_B – соответственно коэффициенты передачи датчика перемещений 6, усилителя отрицательной обратной связи, который на рис. 1 не показан, и возбудителя

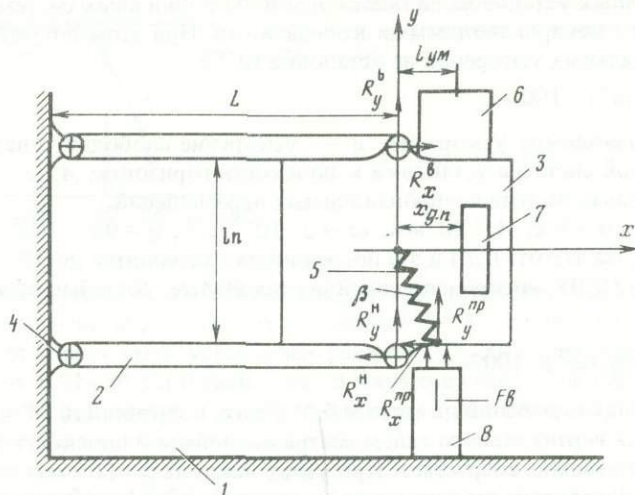


Рис. 1. Электрокинематическая схема установки ПСВУ

колебаний δ ; Y, φ – соответственно перемещение и угол поворота подвижной системы. Со стороны вывешивающей пружины на подвижную систему действуют силы

$$\begin{cases} R_y^{np} = m_{np}g + C_{np}y; \\ R_x^{np} = -m_{np}g\beta - (C_{np}\beta + m_{np}g/L)y - C_{np}(y^2/L). \end{cases} \quad (5)$$

В первом приближении будем считать, что силы реакций в верхнем и нижнем упругих шарнирах равны. Тогда с учетом (3), (4) и (5) получим значение угла поворота подвижной системы установки ПСВУ:

$$\begin{aligned} \varphi = & - \frac{2}{(C_{упр}l_{п}^2 - 2K_{о.с}X_{д.п}X_{в})} \left[m_{п}g \left(l_{ц.м} + \frac{l_{п}}{2} \right) + \left(\frac{C_{пр}\beta l_{п}}{2} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{m_{п}gl_{п}}{2L} - K_{о.с}K_{в} \right) y + \frac{C_{пр}l_{п}}{2L_1} y_2 \right], \end{aligned} \quad (6)$$

где $C_{упр}$ – коэффициент линейной жесткости горизонтальной пластины упругих шарниров δ ; $K_{о.с} = K_{д.п}K_{ус}K_{в}$.

Зависимость (6) показывает, что угол наклона подвижной системы установки ПСВУ зависит от многих параметров. При этом член $m_{п}g(l_{ц.м} + l_{п}/2)$ не зависит от перемещения подвижной системы Y и, следовательно, не создает погрешности. Для уменьшения угла наклона φ , как это следует из (6), необходимо в первую очередь увеличивать жесткость упругих шарниров в горизонтальном направлении. Этого можно добиться увеличением площади сечения горизонтальных пластин, установкой упругих шарниров так, чтобы пластины были отклонены от оси OY на угол 45° , а также изменением конструкции упругого шарнира и его упругих элементов.

Существенного уменьшения углов наклона φ можно добиться, если выполнить условие

$$C_{упр}\beta l_{п}/2 + m_{п}gl_{п}/2L = K_{о.с}X_{в}, \quad (7)$$

которое показывает, что параметры обратной связи могут быть выбраны такими, что угол наклона не будет линейно зависеть от воспроизводимого перемещения. Однако для этого необходимо специальным образом устанавливать испытуемый сейсмометр, так, чтобы момент от смещения центра масс подвижной системы компенсировался мо-

ментом обратной связи. Однако даже при выполнении этого условия, как следует из (6) и из экспериментальных исследований, не удастся полностью устранить наклоны подвижной системы. Остаются наклоны, пропорциональные квадрату воспроизводимых перемещений.

Горизонтальная установка ПСГУ. Кинематическая схема образцовой установки, воспроизводящей горизонтальные синусоидальные колебания ПСГУ, показана на рис. 2. Установка ПСГУ, как и вертикальная установка ПСВУ, построена по принципу синхронно-следящего привода с жесткой отрицательной обратной связью по перемещению, которая не позволяет опрокидываться подвижной системе установки. В состав установки ПСГУ входят фундамент 1, подвижная система 2, две вертикальные стойки 3 и четыре упругих шарнира 4, выполненные на двух плоских пружинах, одна из которых расположена вертикально, а вторая горизонтально.

Значения сил реакций упругих шарниров в вертикальной и горизонтальной пластинах могут быть найдены из условия равновесия стоек 3. В результате для левой стойки получим

$$\begin{aligned} R_x^B &= R_x^H = m_2 g / 4; \\ R_y^B &= (m_1 g l_2 / 2)(l_1 + l_2); \\ R_y^H &= (m_1 g l_2) / 2(l_1 + l_2) + (m_2 / 4)g, \end{aligned} \quad (8)$$

где m_1, m_2 — соответственно массы подвижной системы установки и стойки; g — ускорение свободного падения; l_1, l_2 — соответственно расстояния от центра масс установки до упругих шарниров.

В упругих шарнирах правой стойки значения сил реакции будут равными (8), с тем лишь отличием, что в правой стойке горизонтальные пластины будут растягиваться, а в левой сжиматься. Расчеты показывают, что упругие деформации в вертикальных пластинах малы и несимметричное расположение центра масс приводит к наклонам, составляющим лишь десятые доли угловой секунды. Сжимающие и растягивающие силы в горизонтальных пластинах упругих шарниров приводят к соответствующим упругим деформациям. В результате происходят перемещения центров вращений в шарнирах.

Дифференциальные уравнения линий упругих деформаций для сжимаемой и растягиваемой пластин соответственно запишутся (см. рис. 3) так:

$$\begin{aligned} \ddot{Y} + (P_{сж} / EI_x) Y &= P_c X_{пл} l_{пл} / L_{ст} EI_x; \\ \ddot{Y} - (P_p / EI_x) Y &= - P l_{пл} X_{пл} / L_{ст} EI_x \end{aligned} \quad (9)$$

где E, I_x — соответственно модуль упругости и статический момент инерции сечения горизонтальной пластины относительно оси OX ; $l_{пл}$ — длина пластины; $X_{пл}$ — перемещение подвижной системы установки ПСГУ.

Решением уравнений (8) будут зависимости

$$\begin{aligned} y(Z) &= C_1 \sin \sqrt{P_c / EI_x} Z + C_2 \cos \sqrt{P_c / EI_x} Z + (l_{пл} / L_{ст}) X_{пл}; \\ Y(Z) &= C_1 \operatorname{sh} \sqrt{P_p / EI_x} Z + C_2 \operatorname{ch} \sqrt{P_p / EI_x} Z + (l_{пл} / L_{ст}) X_{пл}; \end{aligned} \quad (10)$$

где P_c, P_p — соответственно значения сжимающих или растягивающих усилий в горизонтальных пластинах упругих шарниров, определяемые по (8). Коэффициенты C_1 и C_2 определяются из граничных условий

$$\begin{aligned} Z = l_{пл}; \quad Y &= (l_{пл} / L_{ст}) X_{пл}, \\ Z = l_{пл}; \quad Y' &= X_{пл} / L_{ст}. \end{aligned} \quad (11)$$

В результате упругие перемещения горизонтальных пластин в центрах вращений $Z = l_{пл} / 2$ для сжимаемой пластины будут равны

$$Y_c(l_{пл} / 2) = \frac{X_{пл}}{L_{ст} \omega} (\cos \omega l_{пл} \sin \omega l_{пл} / 2 - \sin \omega l_{пл} \cos \omega l_{пл} / 2) + X_{пл} l_{пл} / L_{ст}. \quad (12)$$

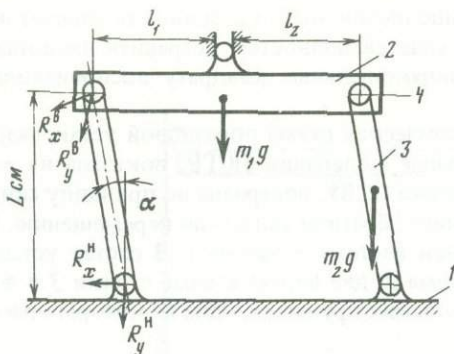


Рис. 2. Кинематическая схема установки ПСГУ

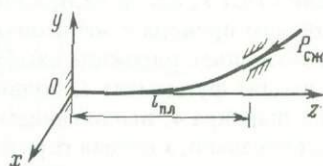


Рис. 3. К определению перемещений в горизонтальных пластинах упругих шарниров

Для растягиваемой

$$Y(l_{п}/2) = \frac{X_{п}}{L_{ст} \omega} (\operatorname{ch} \omega l_{п} \operatorname{sh} \omega l_{п}/2 - \operatorname{sh} \omega l_{п} \operatorname{ch} \omega l_{п}/2) + \frac{X_{п} l_{п}}{L_{ст}},$$

где

$$\omega = \sqrt{P_c(P)/EI_x}. \quad (13)$$

Разность перемещений в правом и левом шарнирах составит

$$\delta Y = (l_{п}/2) = \frac{X_{п}}{L_{ст} \omega} (\operatorname{ch} \omega l_{п} \operatorname{sh} \omega l_{п}/2 - \operatorname{cos} \omega l_{п} \operatorname{sin} \omega l_{п}/2 - \operatorname{ch} \omega l_{пп} \operatorname{ch} \omega l_{п}/2 + \operatorname{sin} \omega l_{п} \operatorname{cos} \omega l_{п}/2). \quad (14)$$

Угол наклона подвижной системы установки

$$\varphi = \frac{2\delta Y(l_{п}/2)}{(l_1 + l_2)}. \quad (15)$$

При $l_1 + l_2 = 50$ см, $E = 2 \cdot 10^{-6}$ кг/см², $I_x = lh^3/12$, $b = 2$ см, $h = 2 \cdot 10^{-2}$ см, $l_{п} = 1$ см, $L_{ст} = 10^2$ см

получим из (15) угол наклона $\varphi \sim 5$ с. Результаты расчета хорошо согласуются с экспериментальными исследованиями.

Таким образом, наклоны подвижной системы горизонтальной установки ПСГУ определяются деформациями в горизонтальных пластинах. Причем значения углов наклона не зависят ни от нагрузки на подвижную систему, ни от места расположения центра масс, что подтверждается результатами экспериментальных исследований. Для уменьшения наклонов необходимо в первую очередь увеличивать жесткость упругих шарниров в горизонтальном направлении. Для этого необходимо либо увеличить толщину пластин, либо выполнить упругий шарнир таким образом, чтобы пластины были развернуты на 45° по отношению к плоскости подвижной системы. Наклоны можно также существенно уменьшить, если стойки подвеса соединить с фундаментом и подвижной системой так, чтобы в горизонтальных пластинах правого и левого шарниров действовали либо сжимающие, либо растягивающие усилия. В этом случае относительные перемещения центров вращений в шарнирах будут близкими к нулю.

Для подтверждения высказанных рекомендаций по уменьшению наклонов подвижных систем как для вертикальной ПСВУ, так и для горизонтальной ПСГУ установок необходимо осуществить доработку конструкций установок и провести дополнитель-

ные экспериментальные исследования. Можно ожидать, что совершенствование конструкции подвеса подвижных систем установок позволит уменьшить наклоны в 5–10 раз, до уровня $[(5-10) \cdot 10^{-1}]''$. Однако в этом случае на частоте 0,01 Гц погрешность воспроизведения от наклонов будет достигать 30%. Для дальнейшего уменьшения погрешностей от наклонов целесообразно в результаты измерений вводить поправку на значения наклонов. Для этого требуется производить измерения наклонов подвижных систем установок либо до начала испытаний сейсмометров, либо непосредственно при испытаниях. В качестве измерителей наклонов должны быть использованы при этом наклонометры, специально разработанные для этой цели и входящие в состав установок.

УДК 550.34

Е.П. Корытко, Н.Г. Капустина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СЕЙСМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ СМ-3 НА ПОВЕРОЧНЫХ УСТАНОВКАХ ПСГУ И ПСВУ

В соответствии с положениями государственной системы обеспечения единства измерений средства измерений должны подвергаться периодической поверке, в том числе и сейсмопреобразователи. При периодической поверке измерительных устройств производится определение (контроль) обоснованного минимума метрологических характеристик измерительного устройства, которые обеспечивают решение вопроса о пригодности средства измерения к применению.

Определение основных метрологических характеристик сейсмопреобразователей может быть проведено методом косвенных измерений (в статике) и методом прямых измерений (в динамике). До недавнего времени метод косвенных измерений [1] был единственным для определения метрологических характеристик сейсмопреобразователей, так как отсутствовали средства воспроизведения колебательного движения в диапазоне инфранизких частот с достоверными метрологическими характеристиками. Этим методом определяются следующие характеристики, регламентируемые техническими условиями (например, СМЗ.00.000ТУ на сейсмопреобразователь СМ-3): период собственных колебаний маятника, коэффициент воздушного затухания сейсмопреобразователя, приведенная длина маятника, момент инерции маятника, коэффициент преобразования рабочей катушки, активное сопротивление рабочей катушки и катушки затухания. С помощью этого набора характеристик осуществляют приближенный расчет условий согласования сейсмопреобразователя с устройством регистрации, подключенным к его выходу, расчет теоретической амплитудно-частотной характеристики сейсмопреобразователя и всего измерительного канала, а также расчет измеряемых параметров колебаний по его выходному сигналу. Хотя степень достоверности результатов таких измерений невелика, отказываться от применения этого метода нецелесообразно, поскольку на местах эксплуатации сейсмопреобразователей, где отсутствуют поверочные установки, нет других способов контроля характеристик. Для определения достоверности получаемых результатов следует осуществить метрологическую аттестацию методов поверки в статике.

В ОКБ ИФЗ АН СССР созданы поверочные установки ПСГУ и ПСВУ [2, 3], разработан измерительно-вычислительный комплекс на базе микроЭВМ "Электроника ДЗ-28" для обработки выходной информации с установок и исследуемых сейсмопреобразователей [4]. Создана система программного обеспечения [5] для обработ-

ки измерительной информации, получаемой при проверке сейсмопреобразователей на установках. С разработкой поверочных установок, которые были метрологически аттестованы органами Госстандарта, появилась возможность исследовать характеристики сейсмопреобразователей методом прямых измерений в динамическом режиме с достаточно высокой точностью. Например, амплитуда колебаний виброплатформы установок воспроизводится с погрешностью 1–2% в диапазоне частот 0,01–20 Гц и амплитуд 0,1–20 мм. Этими установками в первую очередь должны оснащаться предприятия и организации, разрабатывающие и выпускающие сейсмоизмерительную аппаратуру, а также государственные и ведомственные метрологические службы.

Метод прямых измерений и средства для его реализации позволяют определить динамические характеристики сейсмопреобразователя как амплитудную, амплитудно-частотную, фазово-частотную и количественные оценки этих характеристик (нелинейность амплитудной и неравномерность амплитудно-частотной характеристик), а также коэффициент гармоник выходного сигнала сейсмопреобразователя, коэффициент поперечного преобразования, коэффициент затухания, значение резонансной частоты колебаний маятника. Ниже приводятся результаты определения индивидуальных характеристик сейсмопреобразователя СМ-3 на названных поверочных установках. Для измерения выходного сигнала сейсмопреобразователей использовался, как упоминалось ранее, измерительно-вычислительный комплекс, быстродействующий самопишущий прибор Н3021-3. Кроме того, для измерения выходного напряжения преобразователя можно использовать анализатор спектра СК4-72/2 и инфранизкочастотный цифровой вольтметр В7-43, серийно выпускаемые промышленностью. Сдвиг фаз между сигналом образцового виброметра поверочной установки и выходным сигналом сейсмопреобразователя измерялся фазометром Ф5131, а также с помощью цифровых измерительных каналов ИВК. Коэффициент гармоник выходного сигнала сейсмопреобразователя определялся несколькими методами [6].

Исследования сейсмопреобразователей СМ-3 проводились в нормальных условиях (по ГОСТ 8.395–80) на поверочных установках, воспроизводящих колебания в направлении: ПСВУ – в вертикальном, ПСГУ – в горизонтальном. Метрологические характеристики преобразователя определялись при замкнутой катушке затухания, а параллельно к его выходу была подключена нагрузка 100 Ом. Для исследований и поверки сейсмопреобразователей методом прямых измерений (в динамическом режиме) в ОКБ ИФЗ разработаны методические указания, утвержденные НПО "ВНИИМ им. Д.И. Менделеева".

Амплитудная характеристика (АХ) сейсмопреобразователя (индивидуальная функция преобразования), отражающая зависимость коэффициента преобразования (информативный параметр выходного сигнала) от амплитуды входного сигнала (информативный параметр входного сигнала), показана на рис. 1. Она исследовалась на базовой частоте 2,5 Гц в диапазоне амплитуд 0,02–2 мм. Из графика видно, что максимальное значение относительного коэффициента нелинейности АХ не превышает $\pm 3\%$.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) сейсмопреобразователя, отражающая зависимость от частоты коэффициента преобразования в установившемся режиме колебаний, показана на рис. 2. АЧХ исследована в диапазоне частот 0,16–20 Гц (рабочий диапазон СМ-3 0,5–20 Гц) при амплитуде колебаний виброплатформы 0,5 мм. В пределах частотного диапазона 0,5–0,63 Гц располагается резонанс подвижной системы преобразователя. Этот участок характеризуется наибольшей неравномерностью АЧХ. Относительный коэффициент неравномерности АЧХ, который рассчитывается как отношение разности выходных сигналов преобразователя на текущей и базовой частотах к напряжению на базовой частоте, в рабочем диапазоне частот (0,5–20 Гц) достигает значений 15–16%.

Фазово-частотная характеристика (ФЧХ) сейсмопреобразователя, отражающая зависимость от частоты фазовых сдвигов между сигналами на выходе образцового измерительного виброметра поверочной установки и на выходе исследуемого сейсмопреобразователя, исследовалась в том же диапазоне частот и амплитуд, что и АЧХ,

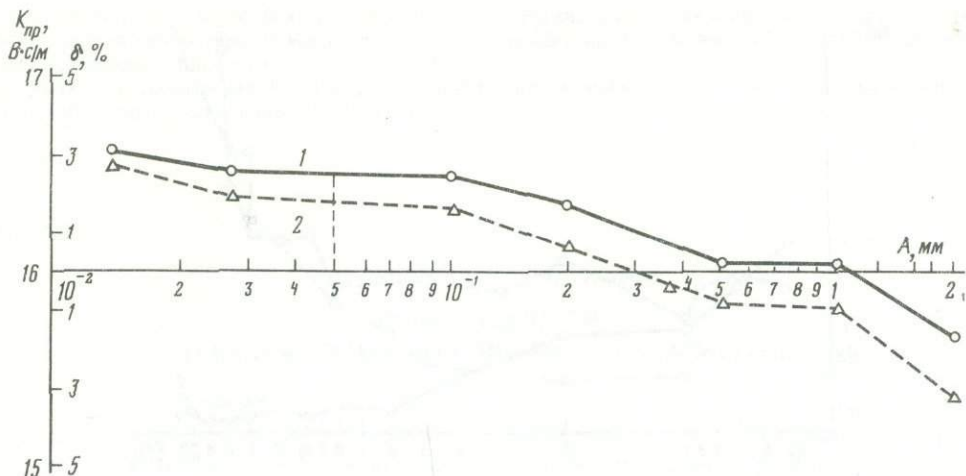


Рис. 1. Зависимость коэффициента преобразования (1) и коэффициента нелинейности (2) от амплитуды

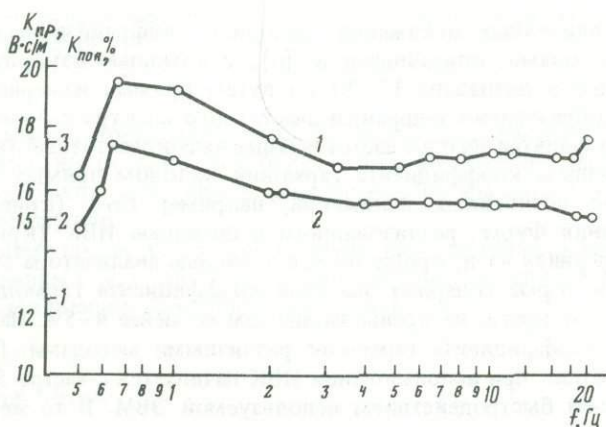


Рис. 2. Зависимость коэффициента преобразования (1) и относительного коэффициента поперечного преобразования (2) от частоты

одновременно с помощью ИВК и фазометра Ф5131. Сходимость результатов этих двух вариантов измерений фазовых сдвигов в пределах 5° . При этом ФЧХ для группы сейсмопреобразователей, исследованных с помощью ИВК, имеет меньший разброс, чем характеристики, полученные с помощью фазометра. Причиной этого, по всей вероятности, является более стабильный автоматический отсчет начальной фазы в ИВК, чем "обнуление" в фазометре.

АЧХ по коэффициенту поперечного преобразования исследована в диапазоне частот 0,31–20 Гц при постоянной амплитуде воспроизводимых колебаний 0,4 мм (на рис. 2 кривая 2). Форма ее совпадает с формой аналогичной характеристики по направлению основной чувствительности сейсмопреобразователя (кривая 1). Кроме того, была определена зависимость коэффициента поперечного преобразования от угла поворота преобразователя относительно направления колебаний виброплатформы установки. Для исследуемых образцов она имеет форму восьмерки с резко выраженными минимумами при повороте преобразователя на виброплатформе установки на 90° и 270° .

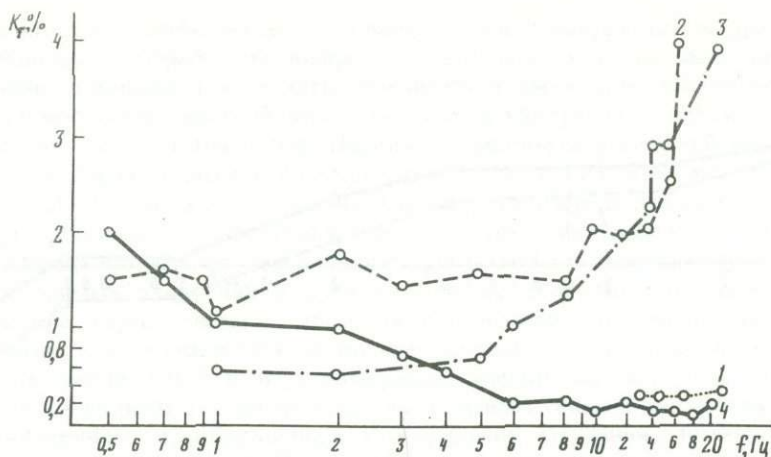


Рис. 3. Зависимости коэффициента гармоник от частоты

Исследования нелинейных искажений выходного инфранизкочастотного сигнала, осуществленные методами, описанными в [6], с помощью измерителя нелинейных искажений типа С6-8 в диапазоне 12–20 Гц путем прямых измерений (рис. 3, кривая 1), путем преобразования инфранизкочастотного спектра с помощью цифрового фазометра Ф5131 и фильтра низких частот в более высокочастотный (выше 2 кГц) с последующим измерением коэффициента гармоник методом прямых измерений с помощью измерителя нелинейных искажений, например С6-8 (кривая 2), а также путем преобразования Фурье, реализованного с помощью ИВК (кривая 3) и "Digis core color 8612" (кривая 4) и, кроме того, с помощью анализатора спектра СК4-72/2, дали результаты, которые содержат значения коэффициента гармоник, существенно отличающиеся друг от друга, не превысившие тем не менее 4–5%. На рис. 3 представлены зависимости коэффициента гармоник различными методами. Подъем значений коэффициента гармоник при использовании ИВК начинается с частот 5–6 Гц, что можно объяснить низким быстродействием используемой ЭВМ. В то же время значения коэффициента гармоник, полученные с помощью анализатора спектра, имеют минимум на нижней рабочей частоте сейсмопреобразователя, не превышающий 2–3%, и плавный спад до значений 0,4–0,5% к верхней граничной частоте (20 Гц). Следует также учитывать, что в эти результаты в качестве составляющей входят нелинейные искажения, воспроизводимые поверочной установкой колебаний.

Исследования метрологических характеристик сейсмопреобразователей типа СМ-3 в динамическом режиме на поверочных установках ПСГУ и ПСВУ позволили получить представление о действительных значениях характеристик исследованных образцов, апробировать методы и средства поверки сейсмоизмерительных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР / Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Кирноса, В.М. Фрема. М.: Наука, 1974. 243 с.
2. Чистяков В.А. О построении инфранизкочастотных колебательных стенов // Сейсмометры, регистраторы и сейсмометрические каналы. М.: Наука, 1986. С. 83–92. (Сейсмические приборы; Вып. 18.)
3. Чистяков В.А. Образцовая инфранизкочастотная вибрационная установка // Измерительная техника. 1985. № 1. С. 39.
4. Чистяков В.А., Лапутина О.Д., Есакова И.Н. Измерительно-вычислительный комплекс для определения характеристик сейсмометров // Приборы и методы регистрации землетрясений. М.: Наука, 1987. С. 92–97. (Сейсмические приборы; Вып. 19.)

5. Есакова И.Н., Чистяков В.А. Программное обеспечение идентификации характеристик сейсмометрической аппаратуры // Исследования по сейсмометрии. М.: Наука, 1987. С. 86–90. (Сейсмические приборы; Вып. 20.)
6. Корытко Е.П., Петрович В.И. Измерение коэффициента гармоник в диапазоне инфранизких частот // Измерительная техника, 1987, № 11, С. 38–39.

УДК 550.34

Р.Е. Саркисян, Р.К. Арзуманян

О ПОГРЕШНОСТИ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ ПЬЕЗОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Допустим, что трехкомпонентным пьезоакселерометром измеряется ускорение $W(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z})$. Обозначим коэффициенты преобразования акселерометра канала x от ускорения \ddot{x} через u_{11} , от ускорения \ddot{y} — u_{12} , от ускорения \ddot{z} — u_{13} . Аналогично обозначим коэффициенты преобразования соответственно u_{22}, u_{21}, u_{23} для канала y и u_{33}, u_{31}, u_{32} для канала z .

Если ускорение направлено по оси x и показание прибора равно u_1 , то ускорение определяется по формуле

$$\ddot{x} = u_1 / u_{11}. \quad (1)$$

Если же ускорение направлено не по оси x , тогда ввиду наличия у акселерометра поперечной чувствительности на канал x будут влиять и ускорения, направленные по осям y и z . Найдем формулы для определения истинного значения ускорения, имеющего произвольное направление.

Под воздействием такого ускорения получим выходные напряжения u_1, u_2, u_3 соответственно по каналам x, y, z . Каждое выходное напряжение является суммой основных и поперечных составляющих выходных напряжений, т.е.

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{11}\ddot{x} + u_{12}\ddot{y} + u_{13}\ddot{z}, \\ u_2 &= u_{21}\ddot{x} + u_{22}\ddot{y} + u_{23}\ddot{z}, \\ u_3 &= u_{31}\ddot{x} + u_{32}\ddot{y} + u_{33}\ddot{z}. \end{aligned} \quad (2)$$

Если компоненты \ddot{y} и \ddot{z} ускорения равны нулю, то u_{21} и u_{31} также равны нулю и из системы (2) получится формула (1).

Это система линейных уравнений относительно $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$, решение которой будет

$$\ddot{x} = \bar{c}_x / c, \quad \ddot{y} = \bar{c}_y / c, \quad \ddot{z} = \bar{c}_z / c.$$

Здесь

$$\begin{aligned} c &= \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} \\ u_{31} & u_{32} & u_{33} \end{vmatrix} = u_{11}u_{22}u_{33} + u_{12}u_{23}u_{31} + u_{21}u_{32}u_{13} - u_{31}u_{22}u_{13} - \\ & \quad - u_{32}u_{23}u_{11} - u_{21}u_{12}u_{33}, \\ c_x &= \begin{vmatrix} u_1 & u_{12} & u_{13} \\ u_1 & u_{22} & u_{23} \\ u_3 & u_{32} & u_{33} \end{vmatrix} = u_1u_{22}u_{33} + u_2u_{32}u_{13} + u_3u_{12}u_{23} - u_3u_{22}u_{13} - \\ & \quad - u_2u_{12}u_{33} \end{aligned} \quad (3) \end{aligned}$$

и т.д.

Заметим, что поперечные чувствительности каналов для каждого прибора составляют определенную часть основной чувствительности. Как правило, она составляет 3–5% основной чувствительности. Поэтому можно написать

$$u_{12} = u_{13} = \alpha u_{11}, u_{21} = u_{23} = \alpha u_{22}, u_{31} = u_{33} = \alpha u_{33}. \quad (4)$$

Здесь α имеет порядок 0,01.

На основании (4) в выражениях (3) членами типа $u_{12}u_{23}u_{31}$, $u_2u_{32}u_{33}$ и $u_{11}u_{32}u_{23}$ можно пренебречь по сравнению с $u_{11}u_{22}u_{33}$. При этом допускается ошибка не более 0,5%.

Тогда

$$c = u_{11}u_{22}u_{33}$$

и

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_1/u_{11} - \alpha(u_2/u_{22} + u_3/u_{33}), \\ \ddot{y} &= u_2/u_{22} - \alpha(u_1/u_{11} + u_3/u_{33}), \\ \ddot{z} &= u_3/u_{33} - \alpha(u_1/u_{11} + u_2/u_{22}). \end{aligned} \quad (5)$$

До сих пор ускорение, измеряемое трехкомпонентным акселерометром, определялось по формуле (1) без учета второго слагаемого в уравнениях (5), т.е. измеряемые ускорения были завышены.

Возникает вопрос: следует ли учесть в расчетах вторые слагаемые в уравнениях (5).

Для простоты рассмотрим частный случай, когда ускорение действует в плоскости xz ($u_{21} = 0, u_{23} = 0, y = 0$). Тогда уравнения (5) примут вид

$$\begin{aligned} u_1 &= u_{11}\ddot{x} + u_{13}\ddot{z}, \\ u_3 &= u_{31}\ddot{x} + u_{33}\ddot{z}. \end{aligned}$$

Решая уравнения относительно \ddot{x} и \ddot{z} , получим

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= u_1/u_{11} - \alpha u_3/u_{33}, \\ \ddot{z} &= u_3/u_{33} - \alpha u_1/u_{11}. \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначая $u_1/u_3 = k$ и предполагая, что коэффициенты преобразования каналов одинаковы ($u_{11} = u_{33}$), получим

$$\begin{aligned} x &= u_1/u_{11} (1 - (\alpha/k)), \\ z &= u_3/u_{33} (1 - (\alpha/k)). \end{aligned} \quad (7)$$

Начиная с К-5 погрешностью не более чем 1% можно принять ($\alpha = 0,05$)

$$1 - \alpha/k = 1 \text{ и } \ddot{x} = u_1/u_{11}.$$

Следовательно, для $u_1 < 5u_3$ нельзя пренебрегать вторыми слагаемыми в уравнениях (5).

Найдем закон изменения относительной ошибки измерения ускорения.

Логарифмируя и дифференцируя уравнение (7), взяв абсолютные значения ошибок, найдем относительную ошибку измерения ускорения

$$\frac{d\ddot{x}}{\ddot{x}} = 2 \frac{du_1}{u_1} + \frac{du_{11}}{u_{11}} + \frac{1}{\left(\frac{u_1}{u_3} - \alpha\right)} \left(\frac{du_1}{u_1} + \frac{du_3}{u_3} \right) + \frac{du_3}{u_3}.$$

Заметим, что при $u_1/u_3 = \alpha$ ошибка измерения бесконечно возрастает. При $u_1/u_3 \gg \alpha$ можно принять

$$\frac{d\dot{x}}{\dot{x}} = 2 \frac{du_1}{u_1} + \frac{du_{11}}{u_{11}} + \left(\frac{du_1}{u_1} + \frac{du_3}{u_3} \right) \cdot \frac{u_3}{u_1} + \frac{du_3}{u_3}$$

Отсюда видно, что при измерении u_1, u_3, u_{11} с погрешностью $\pm 1\%$ ускорение можно будет измерять с погрешностью не менее чем $\pm 4\%$. С увеличением отношения u_3/u_1 ошибка измерения резко возрастает.

Таким образом, при измерении ускорения трехкомпонентным пьезоакселерометром надо пользоваться формулами (5) от 0 до 20–30%-ного диапазона измерения. Ускорения, соизмеримые с поперечной чувствительностью, невозможно измерять ввиду бесконечно большой ошибки прибора в этой области.

Поперечная чувствительность является нежелательной характеристикой. Целесообразно для улучшения метрологических характеристик пьезоакселерометров иметь однокомпонентные пьезоакселерометры с устройством для компенсации поперечной чувствительности.

УДК 550.34

А.Б. Гросул, В.Н. Некрасов, С.В. Сергеев

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКИХ НАКЛОНОВ В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ДЛЯ ГРАДУИРОВКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ АКСЕЛЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА

В практике сейсмических наблюдений используются сейсмоприемники (СП) трех основных типов – сейсмометры, велосиметры и акселерометры, предназначенные соответственно для измерения параметров колебательных перемещений, скоростей и ускорений поверхности Земли. Кроме того, СП определяются как тем, в каком диапазоне частот относительно собственной резонансной частоты подвески используется сейсмоприемник, так и типами последующих механоэлектрического и электронного преобразовательных элементов [1, 2].

Сейсмоприемники акселерометрического типа, рабочий диапазон частот которых лежит в отличие от СП других типов ниже собственной резонансной частоты подвески, ранее использовались в основном для измерения параметров сильных движений в эпицентральных зонах землетрясений [3], поскольку обладали низким коэффициентом преобразования, но высокой надежностью. Однако в последнее время благодаря достижениям электронной техники, обеспечившей применение в сейсмометрии ряда новых высокочувствительных преобразователей механических перемещений в электрический сигнал, и разработке ряда новых высокочувствительных акселерометров появилась тенденция использования сейсмоприемников акселерометрического типа для решения практически всех задач сейсмометрии [4, 5]. Создана также новая международная сеть сейсмостанций, оснащенных низкочастотными акселерометрами [6].

Успешному внедрению акселерометров в практику сейсмических измерений способствует не только улучшение их метрологических характеристик, но и возможность организации на их основе широкополосных с большим динамическим диапазоном из-

мерительных каналов, позволяющих оптимизировать систему сейсмических наблюдений в целом [7].

Важнейшей характеристикой любого сейсмоприемника акселерометрического типа является максимальная величина ускорения a_{\max} , измеряемого с его помощью. Эта величина определяет как область применения и конструкцию акселерометра, так и возможные способы его градуировки. Как правило, характерной величиной, определяющей тип акселерометра, является g — ускорение свободного падения. Акселерометры, допускающие проведение измерений больших величин ускорений ($a_{\max} \gg g$), являются универсальными (с точки зрения ориентации в пространстве их измерительной оси), и в этой группе не разрабатываются отдельно горизонтальные и вертикальные акселерометры. С другой стороны, среди высокочувствительных акселерометров, у которых $a_{\max} < g$, совершенно четко различают приборы, предназначенные для измерения или вертикальных, или горизонтальных ускорений, которые допускают отклонение оси чувствительности от рабочего положения (вертикального или горизонтального) лишь на небольшой угол. Необходимость разработки акселерометров двух классов (универсальных и высокочувствительных) обусловлена тем, что, являясь механоэлектрическими преобразователями, они не могут (за редким исключением) обеспечить проведение измерений в динамическом диапазоне (100–120 дБ). В то же время потребности практических измерений в сейсмометрии охватывают диапазон 200–240 дБ (10^{-10} — 10^2 м/с²) [3, 4, 7]. В этом состоит необходимость создания преобразователей различного типа, а следовательно, и методов их градуировки. Здесь следует заметить, что, чем выше чувствительность преобразователя, т.е. чем меньшие уровни ускорений он может регистрировать, тем сложнее его конструкция, уже диапазон рабочих условий и сложнее методы градуировки. Характерным примером высокочувствительных преобразователей являются вертикальные и горизонтальные сейсмоприемники акселерометрического типа [4, 8].

Акселерометры, характеризуясь предельной величиной измеряемого входного ускорения, также различаются и по виду измеряемого с их помощью ускорения, которое может быть постоянным либо колебательным (переменным во времени). Этим определяется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) преобразователя, а следовательно, и диапазон частот измеряемых ускорений. Например, акселерометры с пьезоэлектрическими механоэлектрическими преобразовательными элементами (МЭПЭ) принципиально пригодны для измерений только колебательных ускорений [8], а акселерометры с емкостными МЭПЭ могут использоваться для измерений как постоянных, так и колебательных ускорений [9]. Наличие акселерометров, различающихся по АЧХ и виду измеряемых ускорений, также приводит в результате к необходимости использования для их градуировки различных методов задания входных величин.

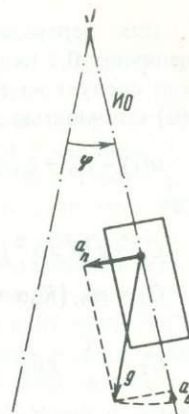
Для воспроизведения низкочастотных ускорений широкое распространение получил метод линейно-перемещающейся платформы [9], в котором используется инерционный принцип задания ускорения. В этом методе амплитуда a_0 гармонического ускорения определяется соотношением

$$a_0 = \omega^2 x_0, \quad (1)$$

где ω и x_0 — круговая частота и амплитуда перемещений платформы. Недостатками метода линейно перемещающейся платформы являются, во-первых, зависимость амплитуды воспроизводимого ускорения от частоты и, во-вторых, ограничение снизу частотного диапазона воспроизводимого ускорения ввиду неприемлемо больших требуемых перемещений платформы. Так, например, на частоте 10^{-3} Гц для воспроизведения ускорения амплитудой 10^{-3} (м/с²) требуемая амплитуда перемещений платформы составляет 25 м.

Это вызывает поиск других методов воспроизведения ускорений для градуировки высокочувствительных акселерометров в области инфранизких частот. Известные методы воспроизведения ускорения с использованием ускорения силы тяжести [9–11]

применимы для акселерометров с нулевой частотной характеристикой, либо для универсальных, либо горизонтальных акселерометров. Метод с использованием ускорения силы тяжести для градуировки вертикальных акселерометров с ненулевой частотной характеристикой до сих пор не применялся, во первых, из-за того, что воспроизводимое в этом методе поперечное ускорение значительно превосходит ускорение, направленное вдоль измерительной оси, и, во-вторых, из-за того что, последнее нелинейно связано с углом наклона. Далее в статье описан динамический метод наклонов, являющийся модификацией общего метода, использующего вектор гравитационного поля, который может быть применен для градуировки на инфранизких частотах вертикальных акселерометров с ненулевой частотной характеристикой.



Использование гравитационных способов задания градуировочных воздействий основано на принципе эквивалентности гравитационной и инерционной масс. При этом отклонение от вертикали измерительной оси (ИО) акселерометра на угол φ (см. рисунок) эквивалентно воздействию вдоль нее ускорения $a_{\text{в}}$, величина которого равна

$$a_{\text{в}} = g(1 - \cos\varphi), \quad (2)$$

а в перпендикулярном к ней направлении — поперечного ускорения $a_{\text{п}}$, равного

$$a_{\text{п}} = g \sin \varphi, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения.

В рассматриваемом далее методе динамических наклонов для измерения динамических характеристик вертикальных высокочувствительных сейсмоприемников акселерометрического типа гармонические с частотой f_0 и амплитудой β_0 угловые колебания измерительной оси (ИО) акселерометра вокруг горизонтальной оси колебаний, проходящей через центр масс его чувствительного элемента, задают после предварительного поворота измерительной оси вокруг оси колебаний на фиксированный угол α . При этом выполняют следующие условия:

$$\alpha + \beta_0 \leq \gamma, \quad (4)$$

$$\alpha - \beta_0 \geq 0, \quad (5)$$

где γ — предельно допустимый угол, при котором градуируемый акселерометр еще сохраняет свою работоспособность.

При задании градуируемому вертикальному акселерометру угловых колебаний он испытывает воздействие колебательного ускорения, составляющая которого, направленная вдоль измерительной оси, описывается выражением (2), а горизонтальная, ориентированная поперек оси, задается выражением (3). Для простоты рассмотрим случай, когда частота f_0 угловых колебаний значительно меньше верхней частоты $f_{\text{в}}$ рабочего диапазона акселерометра $f_0 \ll f_{\text{в}}$. Тогда акселерометр можно рассматривать как линейную безынерционную систему, и поэтому с учетом (2)–(5) выражение для его выходного сигнала $u(t)$ можно записать в виде

$$u(t) = K_a a_{\text{в}}(t) + K_{\text{п}} a_{\text{п}}(t) = gK_a (1 - \cos\varphi(t)) + gK_{\text{п}} \sin\varphi(t), \quad (6)$$

где K_a и $K_{\text{п}}$ — коэффициенты осевой и поперечной чувствительности соответственно, а

$$\varphi(t) = \alpha + \beta_0 \cos 2\pi f_0 t. \quad (7)$$

Для вертикальных высокочувствительных акселерометров γ редко превышает величину 0,1 рад, а амплитуды задаваемых угловых воздействий β_0 не превышают $0,5\gamma$, как следует из (4) и (5). Таким образом, при выполнении условий $\gamma < 0,1$ выражение (6) с точностью до величин второго порядка малости можно представить в виде

$$u(t) = C_0 + C_1 \cos 2\pi f_0 t + C_2 \cos 4\pi f_0 t, \quad (8)$$

где

$$C_0 = g [K_a(\alpha^2/2 + \beta_0^2/4) + K_{\Pi}\alpha], \quad (9)$$

$$C_1 = g\beta_0 [K_a\alpha + K_{\Pi}(1 - \alpha^2/2)], \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{1}{4} g\beta_0^2 [K_a(1 - \alpha^2/2) - K_{\Pi}\alpha]. \quad (11)$$

Итак, в выходном сигнале акселерометра присутствует ряд гармонических составляющих с частотами, кратными частоте угловых колебаний f_0 . Если ограничиться рассмотрением первых двух гармоник выходного напряжения (9), то из (11) и (12) видно, что в них вносит вклад как продольное, так и поперечное ускорение, $a_{\text{в}}(t)$ и $a_{\text{п}}(t)$. Задав соответствующие значения α и β_0 и проводя измерение амплитуд гармоник выходного напряжения C_1 и C_2 на частотах f_0 и $2f_0$, можно определить коэффициенты осевой K_a и поперечной K_{Π} чувствительности градуируемого акселерометра из выражений

$$K_a = (4C_2 + \alpha\beta_0 C_1)/g\beta_0^2, \quad (12)$$

$$K_{\Pi} = (\beta_0 C_1 - 4\alpha C_2)/g\beta_0^2. \quad (13)$$

Изменяя α , β и f_0 , можно провести градуировку акселерометра в практически любых требуемых динамическом и частотном диапазонах входных воздействий.

Достоинством метода динамических наклонов является то, что при определении коэффициента осевой чувствительности учитывается вклад поперечного ускорения, дополнительно имеется возможность измерения коэффициента поперечной чувствительности акселерометра. Кроме того, как можно видеть из выражений (11) и (12), амплитуды гармоник воспроизводимого в этом методе ускорения не зависят от частоты, что делает его идеально приспособленным для градуировки сейсмоприемников именно акселерометрического типа.

Для первой проверки предлагаемого метода градуировки был изготовлен макет устройства, в котором угол статического наклона α мог изменяться от 0 до 0,1 рад, а амплитуда угловых колебаний могла принимать значения в пределах 10^{-4} – 10^{-1} рад.

На макете стенда были исследованы вертикальные высокочувствительные сейсмоприемники акселерометрического типа [8], допускавшие изменение угла наклона измерительной оси к вертикали без нарушения работоспособности не более 0,2 рад и имевшие рабочий диапазон частот 10^{-2} –10 Гц. Измерение амплитуд гармоник выходного напряжения осуществлялось с помощью спектро-анализатора 2033 фирмы "Брюль и Кьер". Взаимное исследование устройства и градуируемых акселерометров показало эффективность использования предлагаемого метода для градуировки именно высокочувствительных вертикальных акселерометров. Так, например, было получено, что при $\alpha = 0,1$ рад и $\beta_0 = 10^{-2}$ рад амплитуды гармоник в выходном напряжении были $C_1 = 0,88$ В и $C_2 = 0,02$ В. Используя полученные значения, из выражений (13), (14) были найдены величины коэффициентов преобразования $K_a = 80$ В · с²/с; $K_{\Pi} = 0,8$ В · с²/м. Путем изменения частоты угловых гармонических колебаний платформы f_0 была снята АЧХ градуируемого преобразователя в диапазоне частот 10^{-1} –2 Гц. При уменьшении амплитуды гармонических угловых наклонов β_0 до минимума ($\beta_0 = 10^{-4}$ рад, $\alpha = 0,1$ рад) было получено в результате измерений $C_1 = 8,8$ мВ и $C_2 = 2$ мкВ, что после подстановки в выражения (13), (14) дало те же значения коэффициентов K_a и K_{Π} .

Причем амплитудные значения градуировочных ускорений, действовавших вдоль измерительной оси, в первом случае составляли 10^{-2} м/с², а во втором 10^{-4} м/с² и при этом оставались неизменными во всем частотном диапазоне градуировки.

Таким образом, предлагаемый метод градуировки вертикальных акселерометров позволяет в широком частотном диапазоне (от нуля до десятков герц) проводить градуировку высокочувствительных вертикальных сейсмоприемников акселерометрического типа, обеспечивая при этом измерение коэффициента осевой чувствительности, а также коэффициентов поперечной чувствительности градуируемого акселерометра в широком диапазоне частот. По сравнению с известными методами предлагаемое решение дает возможность получения более полных метрологических характеристик градуируемых преобразователей, которые могут иметь как нулевую, так и ненулевую АЧХ. Данный метод является логическим связующим звеном между методами и средствами градуировки линейных акселерометров постоянных ускорений и методами и средствами градуировки вибропреобразователей. Возможность воспроизведения малого уровня ускорений в широком частотном диапазоне делает наиболее предпочтительным применение предлагаемого метода динамических наклонов для градуировки высокочувствительных вертикальных сейсмоприемников и акселерометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР // Под ред. З.И. Арановича, Д.П. Кирноса., В.М. Фреда. М.: Наука. 1974. 244 с.
2. Аранович З.И., Борисевич Е.С., Воробьев Б.Т. и др. Перспективы развития сейсмической и инженерно-сейсмической аппаратуры // Автоматизация сейсмических наблюдений. Владивосток, 1976. С. 4–17.
3. Фред В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: Наука, 1978. 174 с.
4. Block B., Moore R.D. Tidal to seismic frequency investigations with a quartz accelerometer of new geometry / J. Geophys. Res., 1970. Vol. 75, N 3. P. 1493–1505.
5. Peterson J., Butler H.M., Holcomb L.G., Hutt C.R. The seismic research observatory // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1976. Vol. 66, N 6. P. 2049–2068.
6. Agnew D., Berger J., Buland R. et al. International deployment of accelerometers: a network for very long-period seismology // Trans. Amer. Geophys. Union, 1976. Vol. 57, N 4. P. 180–188.
7. Кондорская Н.В., Аранович З.И. Методические основы оптимизации системы сейсмических наблюдений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1971. № 7. С. 14–29.
8. Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Унифицированный измерительный сейсмопреобразователь // Измерения в гидроаэродинамике и геофизической акустике. М.: ВНИИФТРИ, 1984. С. 96–105.
9. Сицельников А.Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. М.: Изд-во стандартов, 1979. 176 с.
10. Фред В.М., Осинковская С.В. Вращательный стенд для калибровки и проверки акселерометров ТПС // Сейсмические приборы: Вып. 8. М.: Наука, 1975. С. 165–167.
11. Кирнос Д.П., Давыдов В.Н., Забелин Н.В. и др. Методы и некоторые результаты испытаний акселерографов типа ССР-3-М // Инструментальные средства сейсмических наблюдений. М.: Наука, 1980. С. 67–78. (Сейсмические приборы; Вып. 13.)

СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИНДУКЦИОННОГО, ЕМКОСТНОГО И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ

Стремление к проведению достоверных измерений характеристик сейсмических колебаний минимально возможного уровня в диапазоне частот 10^{-5} – 10^2 Гц объясняет то возросшее внимание, которое исследователи уделяют проблеме собственных шумов измерительных сейсмоприемников (СП) [1–4]. Рассматривая СП как сложный прибор, состоящий из ряда последовательно включенных преобразовательных элементов (механической подвески (МП), механоэлектрического преобразовательного элемента (МЭПЭ), электронного преобразователя (ЭП) и элементов отрицательной обратной связи), стремятся досконально проанализировать уровни и спектральный состав шумов каждого из них и на основе этого оценить собственный шум сейсмоприемника в целом [2, 4].

Наиболее подробно и детально рассмотрены шумы механической подвески. Получено, что создание малошумящих МП может осуществляться не только путем конструирования низкочастотных и крупногабаритных (с большой инерционной массой M) подвесок, но и путем разработки малогабаритных, высокочастотных и высокодобротных ($Q > 10$) подвесок повышенной эксплуатационной надежности и помехозащищенности [4]. Эти идеи реализованы в ряде конструкций нового типа высокочувствительных малогабаритных вертикальных [3, 5] и горизонтальных [6] СП.

Механоэлектрическими преобразовательными элементами, обеспечивающими преобразование относительных перемещений инерционной массы в электрический сигнал, в этих сейсмоприемниках являются индукционные, емкостные и пьезоэлектрические МЭПЭ. Эти преобразователи различаются как по физическим принципам работы, так и по сложности своей технической реализации. Они предъявляют свои специфические требования к последующему электронному преобразователю и обладают различными частотными зависимостями уровней собственных шумов. В работах, посвященных описанию СП, содержащих какие-либо из упомянутых МЭПЭ, анализируются шумы только конкретных преобразовательных элементов и отсутствуют оценки предельных возможностей каждого из МЭПЭ.

Целью данной работы является получение расчетных оценок предельно достижимых характеристик для индукционного, емкостного и пьезоэлектрического преобразовательных элементов, т.е. МЭПЭ, наиболее широко применяемых в сейсмометрии, сравнение их со значениями, реально допустимыми в практике, а также определение областей предпочтительного использования конкретного типа преобразователей путем сопоставления их метрологических и эксплуатационных характеристик.

Индукционные преобразователи, появившиеся в практике сейсмических измерений первыми, являются на сегодня самым распространенным типом МЭПЭ в сейсмометрии. К их несомненным достоинствам следует отнести простоту технической реализации и низкую чувствительность к влияющим факторам. Индукционные МЭПЭ относятся к классу пассивных и являются преобразователями дифференцирующего типа (их выходной сигнал пропорционален скорости), что снимает требования стабильности нулевого положения инерционной массы СП.

Однако при всех своих достоинствах индукционные преобразователи имеют чувствительность, убывающую с понижением частоты входного воздействия, что обуслови-

ло использование сейсмоприемников с этими МЭПЭ в основном для измерений в области частот выше собственной частоты СП. При таком подходе стремление к расширению диапазона измерений в область низких частот приводит к необходимости снижения резонансной частоты подвески СП, для чего увеличивают инерционную массу и применяют астазированные подвески. По этой причине современные широкополосные высокочувствительные сейсмоприемники с индукционными МЭПЭ являются крупногабаритными приборами с ограниченными эксплуатационными возможностями, надежное функционирование которых можно обеспечить только в условиях специально оборудованных помещений.

ЭДС, наводимая на катушке индукционного МЭПЭ, при перемещении ее со скоростью \dot{X} перпендикулярно силовым линиям магнитного поля с индукцией B может быть найдена из уравнения

$$U = B l \dot{X}, \quad (1)$$

где l — длина проводника, намотанного на катушку. Если проводник намотан на катушку объемом V с коэффициентом заполнения m , то легко показать, что коэффициент преобразования индукционного МЭПЭ можно записать в виде

$$K_{и}^{\dot{x}} = \frac{B}{2\pi f} \sqrt{mVR/\rho}, \quad (2)$$

где f — частота колебаний; ρ — удельное сопротивление проводника; R — активное сопротивление катушки.

Используя (2), приведем ко входу МЭПЭ шумы, генерируемые активным сопротивлением катушки $P_{и}^U = 4KTR$, величина которых определяет порог чувствительности собственно индукционного МЭПЭ независимо от типа используемого электронного преобразователя:

$$P_{и}^{\dot{x}} = 16\pi kT\rho f^2/B^2 mV, \quad (3)$$

где $P_{и}^x$ — спектральная плотность мощности эквивалентного шумового ускорения.

Анализ уравнения (3) позволяет сделать ряд интересных выводов. $P_{и}^x$ в явном виде не зависит от активного сопротивления катушки, а определяется только лишь индукцией в зазоре магнитной системы и его заполнением (mV). Это означает, что повышение коэффициента преобразования сейсмоприемника путем изменения намоточных параметров катушки не приведет автоматически к снижению порога его чувствительности. Более того, увеличение $K_{и}$, а следовательно, и R ужесточает требования к ЭП и, как следствие этого, может привести к увеличению суммарных шумов измерительного канала.

Работа [7] посвящена оптимизации конструкции магнитной системы, в ней показано, что при ограничении габаритов преобразователя диаметром 100 мм максимальные эффективные значения магнитной индукции и объема катушки составляют 0,8 Т и $2 \cdot 10^{-6}$ м³ соответственно. Подставляя эти значения в выражение (3) и учитывая то, что медь — наиболее приемлемый материал для намоточного провода, а практически коэффициент заполнения объема равен 0,6, получим оценку минимальной спектральной плотности мощности эквивалентного шумового ускорения для индукционного преобразователя:

$$P_{и \min}^{\dot{x}} = 10^{-20} f^2. \quad (4)$$

Следует подчеркнуть, что выражение (4) определяет тот предел разрешения, который в принципе может быть достигнут СП с индукционными МЭПЭ, имеющими указанные параметры. Все современные измерительные каналы, использующие индукционные СП, имеют значения $P_{и}^x$ большие, чем дает (4). Также следует отметить, что выражения

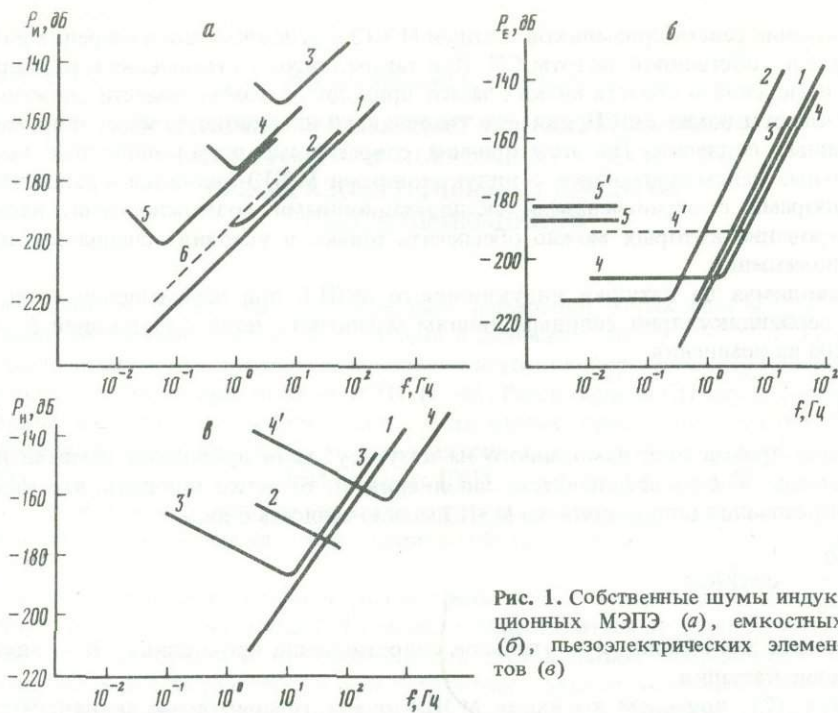


Рис. 1. Собственные шумы индукционных МЭПЭ (а), емкостных (б), пьезоэлектрических элементов (в)

(3) и (4) применимы для оценки $P_{и}^{\chi}$ только в диапазоне частот выше собственной частоты подвески. Ниже f_0 следует учитывать изменение передаточной функции последней.

На рис. 1, а представлены пороговые значения шумов индукционных МЭПЭ и измерительных каналов с индукционными сейсмоприемниками. Видно, что максимальным из известных разрешением обладает измерительный канал на основе высокочастотного ($f_0 = 1$ Гц) преобразователя TG 20171 с усилителем 43310 фирмы "Теледайн-Геотекс" [3]. Однако и в этом измерительном канале (кривая 2), оптимизированном для работы в полосе 0,5–40 Гц, собственные шумы превосходят $P_{и min}^{\chi}$. Остальные измерительные каналы имеют собственные шумы, значительно превосходящие принципиально достижимый уровень собственных шумов для индукционных сейсмопреобразователей.

Следует отметить также, что в приведенных примерах (за исключением кривой 2) основной вклад в суммарное значение собственных шумов вносят электронные преобразовательные элементы. Так, для преобразователей ДС и HS-10-1, имеющих коэффициенты преобразования 360 и 850 В · с · м⁻¹ и сопротивления катушек 10 и 50 кОм соответственно, собственные шумы, приведенные ко входу, имеют значение $5 \cdot 10^{-20} f^2$ (мс⁻²)² Гц⁻¹ (прямая б), что хотя и превышает значение шумов оптимального индукционного сейсмопреобразователя $P_{и min}^{\chi}$ (прямая 1), но существенно меньше шумов соответствующих измерительных каналов (кривые 5 и 4).

Большой уровень входных шумов электронных преобразователей (низкочастотных усилителей) объясняется, в частности, тем, что индукционные МЭПЭ предъявляют к их входным сопротивлениям $R_{вх}$ достаточно жесткие требования. Являясь преобразователями пассивного типа, индукционные МЭПЭ для генерации выходного напряжения отбирают энергию от подвески, что способствует увеличению демпфирования, а следовательно, возрастанию ее шумов. Для того чтобы индукционные МЭПЭ не увеличивали шумы подвески, необходимо выполнение следующего требования к входным

параметрам электронного преобразователя:

$$R_{вх}/R \gg B^2 mV/2\rho M\omega_0 \quad (5)$$

или, подставляя параметры оптимальной магнитной системы, приведенные выше,

$$R_{вх}/R \gg 100/\omega_0 M, \quad (6)$$

где M выражено в килограммах. Для высокочувствительных низкочастотных СП, согласно (6), требуются усилители с входными сопротивлениями, большими несколькими мегаом. Например, в канале ДС [8] применены усилители, имеющие $R_{вх} = 2$ МОм.

Емкостные преобразователи относятся к классу активных МЭПЭ. Они не отбирают при своей работе механической энергии от подвески и поэтому не увеличивают ее тепловые шумы, чем принципиально отличаются от индукционных преобразователей.

Собственные шумы емкостного МЭПЭ определяются при отсутствии утечек только шумами генератора и последующего усилителя. Поэтому любой прогресс в улучшении параметров емкостных преобразователей обусловлен прежде всего улучшением используемых схемотехнических решений. Здесь следует отметить, что объем электронных устройств, обеспечивающих надежную и устойчивую работу емкостного МЭПЭ, во много раз больше, чем требуемый для индукционного или пьезоэлектрического преобразователя.

По принципу построения электрической схемы емкостные МЭПЭ можно разбить на два вида — радиотехнические и мостовые. Поскольку основой радиотехнических емкостных преобразователей является высокодобротный LC контур, то для них характерны крайне низкий уровень собственных шумов, с одной стороны, и малый динамический диапазон — с другой [9].

Значительно большими динамическим диапазоном, линейностью и достаточно высоким разрешением обладают мостовые емкостные преобразователи с подвижной средней обкладкой, включенной в мост переменного тока с тесно связанными индуктивностями в качестве плеч отношения. Коэффициент преобразования такого МЭПЭ по перемещению определяется выражением [10]

$$K_E^x = 2U_r/\delta, \quad (7)$$

где U_r — питающее напряжение внешнего генератора; δ — первоначальный зазор между средней и любой из крайних обкладок.

Обычно величина U_r составляет единицы вольт, δ — десятые доли миллиметра, поэтому K_E , как правило, лежит в пределах 10^4 – 10^5 В. Дальнейшее увеличение осложнено из-за влияния электростатического взаимодействия обкладок.

В сейсмометрии емкостные МЭПЭ начали применяться с начала 60-х годов [11, 12]. Они позволили разработать СП акселерометрического типа, обеспечивающие измерения колебаний от суточных, приливных, до сейсмических. На основе этого типа СП создана новая международная сеть сейсмостанций для изучения низкочастотных сейсмических процессов [13].

Емкостные СП базируются на малогабаритных, высокодобротных, с высокой механической точностью изготовленных подвесках малых инерционных масс, что позволяет достаточно просто механически защищать их от влияющих факторов [1], помещая в активные термостаты и применяя вакуумирование [6], причем иногда двухконтурное [12, 13]. Однако все эти меры защиты приводят к значительному увеличению общих габаритов СП (наружной контур $\phi 460 \times 600$ мм [13]). К тому же в активных термостатах поддерживается температура 50–60°C с точностью $5 \cdot 10^{-4}$ С, что, кроме значительного расхода энергии, требует и прецизионных устройств измерения и поддержания температуры. Но все это не вызывает проблем при размещении данных СП в специальных помещениях сейсмических лабораторий.

Как уже отмечалось, шумы емкостных МЭПЭ определяются в основном шумами используемых электронных устройств: стабильностью по напряжению и частоте задающего генератора (источника питания МЭПЭ), входными шумами предусилителя и шу-

мами стоящих за ним усилителя, демодулятора и фильтра, которыми обычно пренебрегают из-за их малого относительного вклада [6]. В работе [14] методами теории параметрических усилителей видеочастот с учетом происходящих в усилителе преобразований частот шумов высокочастотного задающего генератора теоретически получены оценки предельной чувствительности емкостного МЭПЭ, параметры которого близки к приведенным в [6]. Оценка минимального значения спектральной плотности эквивалентного шумового перемещения $P_{E \min}^x$ для емкостного МЭПЭ при условии подавления шумов генератора накачки равна 10^{-12} м/Гц.

На рис. 1, б приведены теоретически и экспериментально полученные значения шумов отдельно емкостного МЭПЭ (прямые 1, 3) и сейсмоприемников с емкостными МЭПЭ (кривые 2, 4, 5). Следует отметить хорошее совпадение результатов для частот выше собственной частоты СП, т.е. в области, где шумы в основном определяются входными шумами предусилителя. Здесь оценка для $P_{E \min}$ (прямая 1) практически совпадает со значением шумов для лучшего серийного СП фирмы "Теледайн-Геотекс" TG 36000-04 (кривая 3) [3] и несколько выше, чем экспериментально полученная в работе [6], что позволяет использовать величину $P_{E \min}^x = 10^{-21} f^4$ ($\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4$) Гц^{-1} для оценки предельных возможностей емкостных МЭПЭ на современном этапе.

Ниже собственной частоты подвески, т.е. в основном рабочем диапазоне частот емкостных сейсмоприемников, где они имеют равномерную по ускорению АЧХ, уровни их собственных шумов определяются (в противоположность индукционным СП с низкочастотными крупногабаритными подвесками) тепловыми шумами механических подвесок (см. рис. 1, б прямые 4, 5, 5'), а не электрическими шумами собственно емкостного преобразователя (кривая 4).

Пьезоэлектрические преобразователи традиционно широко применяются в виброметрии, где МЭПЭ в виде пьезокерамики, работающей на сжатие, сдвиг, кручение, входят в состав различных вибропреобразователей, обеспечивая благодаря пьезоэффекту преобразование механических деформаций, возникающих в них при колебательных движениях, в электрические сигналы на частотах до десятков килогерц [15]. Являясь преобразователями силы пассивного типа с большим динамическим диапазоном (до 200 дБ), они выгодно отличаются от всех остальных МЭПЭ прототипом своей технической реализации, малыми габаритами, надежностью и незначительным объемом требуемого электронного оборудования. Это обусловило использование пьезоэлектрических МЭПЭ в сейсмоприемниках акселерометрического типа, применяемых для регистрации сильных движений в эпицентральных областях землетрясений и при инженерно-сейсмических исследованиях [16], т.е. в СП, работающих при больших уровнях входных воздействий.

Пьезоэлектрические МЭПЭ — это преобразователи контактного типа. Их жесткость входит в жесткость механической подвески инерционной массы и является доминирующей для всех подвесок, кроме низкочастотных, где в целях уменьшения собственных шумов подвески и увеличения чувствительности СП предпринимаются специальные меры снижения собственной частоты подвесок путем применения биморфных преобразователей [5].

Оценим предельные возможности пьезоэлектрического биморфного преобразователя с наиболее широко распространенным последовательным соединением пластин, имеющего длину l , ширину b и толщину h , свободно опирающегося по краям и нагруженного по центру. Коэффициент преобразования по перемещению такого биморфа будет определяться соотношением [5]

$$K_{\Pi}^x = 3/2 d_{31} E / \epsilon \epsilon_0 (h/l)^2, \quad (8)$$

где d_{31} , ϵ и E — пьезомодуль, диэлектрическая проницаемость и модуль Юнга материала биморфа соответственно; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Подставив в (8) значения пьезоэлектрических постоянных для наиболее распрост-

раненной пьезокерамики ЦТС-19, получим

$$K_{\Pi}^x = 1,2 \cdot 10^9 (h/l)^2. \quad (9)$$

Из (9) видно, что биморфные пьезоэлементы являются одними из самых чувствительных преобразователей перемещения. Так, например, чувствительность биморфа с размерами $h = 1$ мм, $l = 40$ мм равна $7,5 \cdot 10^5$ В/м, что во много раз больше максимально достижимого коэффициента преобразования емкостного преобразователя. При этом малая жесткость биоморфов позволяет на их основе создавать достаточно низкочастотные подвески.

Для оценки предельной разрешающей способности биморфных МЭПЭ найдем выражение для его собственных шумов, для чего используем эквивалентную схему пьезоэлектрического МЭПЭ в виде емкости C , нагруженной на сопротивление потерь R . Спектральная плотность мощности напряжения тепловых шумов такой схемы определяется выражением [17]

$$P_{\Pi}^u = 4KT \operatorname{tg} \delta / \omega C, \quad (10)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла диэлектрических потерь.

Видно, что определяющим параметром при оценке собственных шумов, наводимых на выходе пьезоэлектрического МЭПЭ, является его емкость, увеличение которой ведет к снижению P_{Π}^u . Шумы пьезоэлементов частотно зависимы. Их абсолютное значение растет с уменьшением частоты.

Воспользовавшись (8) и (10), а также очевидным соотношением $C = \epsilon \epsilon_0 b l / h$, получим общее выражение для спектральной плотности мощности эквивалентных колебательных перемещений на входе биморфного МЭПЭ

$$P_{\Pi}^x = \frac{64}{9} \frac{kT \operatorname{tg} \delta}{\omega (K_{31})^2 W}, \quad (11)$$

где W — жесткость биморфа; $K_{31} = d_{31} \sqrt{E/\epsilon \epsilon_0}$ — коэффициент электромеханической связи пьезокерамики. Выражение (11) показывает, что собственные шумы биморфных МЭПЭ, приведенные ко входу, определяются электромеханическими константами пьезокерамики (член $\operatorname{tg} \delta / (K_{31})^2$) и жесткостью пьезоэлементов. Причем изменения собственных шумов МЭПЭ в широких пределах можно практически добиться только путем изменения жесткости биморфов, так как отличие коэффициента K_{31} для большинства известных составов пьезокерамик незначительно. Подставив в (11) значения электромеханических констант для состава ЦТС-19, получим упрощенное выражение, позволяющее оценивать величину спектральной плотности мощности эквивалентного шумового ускорения на входе биморфного пьезоэлемента P_{Π}^x в зависимости от его жесткости:

$$P_{\Pi}^x = 6 \cdot 10^{-19} f^3 / W. \quad (12)$$

Используя (12), можно получить выражение для оценки минимального уровня собственных шумов $P_{\Pi \min}^x$ тех пьезоэлектрических СП, у которых величина суммарной жесткости определяется в основном жесткостью применяемых биморфов. Для этого в (12) подставим вместо W его выражение $W = (2\pi f_0)^2 M$ и найдем P_{Π}^x , которое достигает минимального значения на резонансной частоте подвески f_0 :

$$P_{\Pi \min}^x = 1,5 \cdot 10^{-20} f_0 / M. \quad (13)$$

Выше и ниже резонансной частоты собственные шумы СП будут возрастать. Выше — пропорционально f^3 , ниже — обратно пропорционально f . Это обусловлено наличием частотной зависимости собственных шумов у пьезоэлементов и передаточной функцией подвески.

На рис. 1, в представлены расчетные значения спектральной плотности мощности эквивалентного шумового ускорения для различных биморфов и пьезоэлектрических сейсмоприемников на их основе. Прямые 1, 3, 4 характеризуют зависимость собственных шумов пьезоэлементы из ЦТС-19 от их жесткости. Прямая 1 — пьезоэлемент с размерами $40 \times 2 \times 1 \text{ мм}^3$.

Совокупность прямых 3 и 3' характеризует собственные шумы вертикального СП С1012, рассчитанные по данным, приведенным в работе [5]. Видно, что использован пьезоэлемент с меньшей жесткостью (его размеры $40 \times 2,5 \times 0,66 \text{ мм}^3$). В результате это привело к некоторому возрастанию его собственных шумов (прямая 3), но одновременно позволило увеличить предельное разрешение сейсмоприемника на низких частотах (прямая 3').

Пьезоэлементы трехкомпонентного пьезоакселерометра [18] обладают наибольшей жесткостью из всех рассматриваемых пьезоэлектрических МЭПЭ. Естественно, их собственные шумы минимальны (прямая 4). Однако СП на их основе является высокочастотным с малой разрешающей способностью на низких частотах (прямая 4').

Прямая 2 взята из работы [3] и характеризует собственные шумы пьезоэлектрического СП S-750 фирмы "Теледайн-Геотекс" в его дорезонансной области частот. Видно, что это высокочастотный СП с ограниченным разрешением в области частот менее 1 Гц.

Из рассмотрения результатов, представленных на рис. 1, в, можно сделать вывод, что повышение жесткости биморфа только с целью снижения его собственных шумов нецелесообразно, так как одновременно при этом возрастают собственная частота сейсмоприемника и его низкочастотные шумы (в дорезонансной области). Увеличение жесткости также приводит к уменьшению емкости биморфных пьезоэлементов, что затрудняет их согласование с последующими электронными преобразователями на низких частотах. Однако и уменьшать жесткость биморфов с целью устранения этих недостатков можно не беспредельно, так как снижение W ведет к увеличению шумов в области высоких частот. Таким образом, снижение жесткости МЭПЭ приводит к ограничению рабочего диапазона частот пьезоэлектрических сейсмоприемников сверху, а увеличение жесткости — снизу. Оптимальным можно принять значение $W \sim 10^4 \text{ Н/м}$, подставив которое в (12) получим выражение для собственных шумов оптимального с точки зрения использования в составе измерительных сейсмоприемников пьезоэлектрического биморфного преобразователя из состава ЦТС-19:

$$P_{\text{н опт}}^2 = 10^{22} \cdot f^3. \quad (14)$$

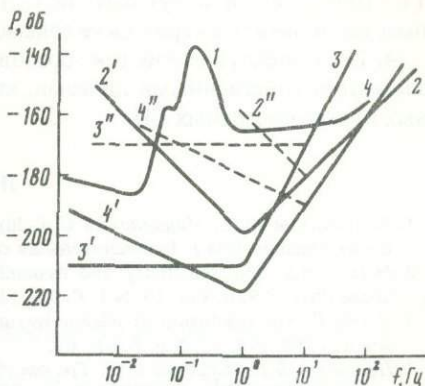
Следует отметить, что при рассмотрении характеристик пьезоэлектрического МЭПЭ мы в отличие от предыдущих двух случаев не учитывали шумы электронного усилителя. Это обусловлено тем, что входные шумы современных усилителей с полевыми транзисторами на входе имеют значения меньше, чем спектральная плотность мощности напряжения тепловых шумов на выходе пьезоэлементов [5].

Сравнение характеристик рассмотренных типов преобразовательных элементов и сейсмоприемников на их основе проведем в два этапа — отдельно для высокочастотного и низкочастотного диапазонов.

В области высоких частот (выше собственной частоты сейсмоприемника) предельная разрешающая способность любого СП определяется только параметрами используемого в его составе механоэлектрического преобразовательного элемента. Поэтому первоначально на рис. 2 нанесем значения минимально допустимых собственных шумов индукционного и емкостного МЭПЭ (прямые 2 и 3 соответственно), шумы оптимального пьезоэлектрического биморфного МЭПЭ (прямая 4), а также микросейсмические шумы наименьшего на Земле уровня (кривая 1) [2, 3].

Видно, что СП с емкостными преобразователями пригодны для измерений именно микросейсмических шумов в основном на частотах менее 3–5 Гц, так как данный тип МЭПЭ обладает в диапазоне частот выше 3 Гц наибольшими собственными шумами.

Рис. 2. Характеристики сейсмоприемников с различными МЭПЭ



Это ставит под сомнение высказанное в работе [6] предположение о возможности использования емкостного СП до частоты 100 Гц.

Шумы пьезоэлектрического МЭПЭ с оптимальной жесткостью (прямая 4) являются наименьшими из рассмотренных. К тому же в отличие от емкостного и индукционного преобразователей у пьезоэлектрического МЭПЭ имеется возможность снижения его собственных шумов путем увеличения жесткости (см. рис. 1, в прямые 1 и 4). Это позволяет рекомендовать пьезоэлектрические преобразователи для использования в составе сейсмоприемников, специально предназначенных для исследования высокочастотных микросейсм.

Рассмотрим применение элементов, имеющих собственные шумы, представленные на рис. 2 прямыми 2-4, в составе сейсмоприемников, имеющих собственную частоту 1 и 10 Гц. В этом случае минимальные собственные шумы СП могут быть представлены двумя семействами ломаных: для $f_0 = 1$ Гц (ломаные 2-2', 3-3', 4-4') и для $f_0 = 10$ Гц (ломаные 2-2'', 3-3'', 4-4'').

Из приведенных данных следует, что только емкостный СП с $f_0 = 1$ Гц (ломаная 3-3') может быть использован благодаря постоянной спектральной плотности мощности собственных шумов для измерения ускорения при микросейсмических колебаниях в диапазоне частот от квазистатических до 3 Гц. В то же время емкостный СП с $f_0 = 10$ Гц (ломаная 3-3'') практически непригоден для исследования характеристик микросейсм минимального уровня.

Частотная зависимость собственных шумов индукционных и пьезоэлектрических СП, приводящая к росту их шумов не только с увеличением, но и с уменьшением частоты (ломаные 2-2', 4-4', 2-2'', 4-4''), приводит к ограничению их рабочего диапазона частот определенной полосой, вне которой их собственные шумы превосходят, например, уровень микросейсм. Общим для этих двух типов сейсмоприемников является также необходимость снижения собственной частоты подвески для расширения рабочей полосы в сторону нижних частот. Однако из-за различий в частотных зависимостях собственных шумов, у индукционных СП для получения характеристик, эквивалентных таковым сейсмоприемникам с пьезоэлектрическими МЭПЭ, требуется использовать подвески с существенно меньшими f_0 .

Таким образом, рассмотрение и сопоставление предельно достижимых характеристик наиболее распространенных в сейсмометрии преобразовательных элементов — индукционного, емкостного и пьезоэлектрического, а также сейсмоприемников, основанных на применении этих преобразователей, позволяют сделать следующие выводы.

1. Минимальные уровни спектральной плотности мощности эквивалентного шумового ускорения на входе рассмотренных преобразовательных элементов могут быть представлены следующими выражениями: а) для индукционного $P_{и \min} = 10^{-20} f^2$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4} \cdot \text{Гц}^{-1}$; б) для емкостного $P_{е \min} = 10^{-21} f^4$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4} \cdot \text{Гц}^{-1}$; в) для пьезоэлектрического (при $W = 6 \cdot 10^3 \text{ Н/м}$) $P_{п} = 10^{-22} f^3$, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-4} \cdot \text{Гц}^{-1}$.

2. Проведение прецизионных измерений параметров микросейсмических колебаний в диапазоне частот от 0 до 3-5 Гц могут обеспечить в условиях специально оборудованных сейсмических обсерваторий только емкостные сейсмоприемники с собственной частотой не выше 2 Гц.

3. Для проведения наиболее массовых сейсмических исследований в диапазоне частот

$(3 \cdot 10^{-2})$ —30 Гц могут быть использованы как традиционно применяемые индукционные, так и пьезоэлектрические сейсмоприемники.

4. Пьезоэлектрические преобразователи обладают наименьшими среди рассмотренных элементов собственными шумами, что позволяет использовать их в составе прецизионных высокочастотных СП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колесников Ю.А., Мацневский С.А. Шумы вертикальных длиннопериодных сейсмометров. Методы их уменьшения // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1979. Вып. 12. С. 125–144.
2. Melton B.S. The sensitivity and dynamic range of inertial seismographs // Reviews of Geophys. and Space Phys., 1976. Vol. 14, N 1. P. 93–116.
3. Herrin E. The resolution of seismic instruments used in treaty verification research // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1982. Vol. 72, N 6. P. 61–67.
4. Некрасов В.Н., Сергеев С.В., Трохан А.М. Измерительные сейсмопреобразователи. Возможность унификации // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1985. № 5. С. 28–39.
5. Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Унифицированный измерительный сейсмопреобразователь // Измерения в гидроаэродинамике и геофизической акустике. М.: ВНИИФТРИ, 1984. С. 96–106.
6. Usher M.I., Buckner I.W., Burch R.F. A miniature wideband horizontal-component feedback seismometer // Y. Phys. E., Seient. Instru. 1977. Vol. 10, N 12. P. 1253–1260.
7. Анцыферов М.С. Электродинамические геофоны типа СЭД. Применение сейсмоакустических методов в горном деле. М.: Наука, 1964. С. 18–42.
8. Кевлишвили П.В., Башилов Н.П. Некоторые вопросы построения автоматизированных систем сбора и обработки геофизической информации // Автоматизация сейсмических исследований. Владивосток: Дальневост. кн. изд-во, 1976. С. 18–36.
9. Колесников Ю.А., Мацневский С.А. Применение емкостных преобразователей линейных перемещений в сейсмометрии // Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1978. Вып. 11. С. 142–179.
10. Нуберт Г.П. Измерительные преобразователи неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1970. 360 с.
11. Ветчинкин А.Н. Электронный сейсмограф с емкостным датчиком // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1962. № 4. С. 27–29.
12. Block B., Moore R.D. Measurements in the Earth mode frequency by an electrostatic sensing and feedback gravimeter // J. Geophys. Res. 1966. Vol. 71, N 18. P. 4361–4375.
13. Agnew D., Berger J., Buland R. et al. International deployment of accelerometers: a new network for very long-period seismology // Trans. Amer. Geophys. Union. 1976. Vol. 57, N 4. P. 180–188.
14. Левинзон Ф.А., Зюзин В.Н. Емкостный датчик смещения как чувствительный преобразователь низкочастотных механических колебаний в электрические сигналы // Регистрация и обработка информации в сейсмометрии. М.: Наука, 1982. С. 88–91. (Сейсмические приборы; Вып. 15.)
15. Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник под ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 1978. Т. 1. 448 с.
16. Фрейд В.М. Инструментальные средства и методы регистрации сильных землетрясений. М.: Наука, 1978. 174 с.
17. Гросул А.Б., Некрасов В.Н., Сергеев С.В. Тепловые шумы пьезокерамических преобразовательных элементов в диапазоне частот 0,5–1000 Гц // Тез. докл. II Всесоюз. конф. "Получение и применение сегнето- и пьезокерамических материалов". М., 1984. Ч. 1. 48 с.
18. Андрианов В.А., Мазин В.Д. Измерение малых ускорений пьезоэлектрическими преобразователями // Измерения, контроль, автоматизация. 1979. № 5. С. 3–12.

СОДЕРЖАНИЕ

I. НОВАЯ АППАРАТУРА

<i>Крылов С.М., Левшенко В.Т.</i> Сейсмомагнитный датчик	3
<i>Аранович З.И., Воробьев Б.Т., Трапезников Н.Л., Трифонов Н.В.</i> Сейсмическая станция с видимой записью ССК	8
<i>Ахсаханян Г.А., Гаспарян А.С., Дозоров Т.А., Мхитарян С.А., Нагапетян Г.К.</i> Инфранизкочастотный высокочувствительный пьезоэлектрический сейсмометр для донных станций	11
<i>Бахчинян А.О., Заргарян Д.Н., Рыков А.В.</i> Широкополосный трехкомпонентный скважинный сейсмометр С-032	15
<i>Башилов И.П., Бажанов А.В., Гинзбург А.А., Давыдов А.А., Ершова Т.Н., Мустафин Т.А.</i> Автоматизированная цифровая сейсмическая станция	19
<i>Фремд В.М.</i> Трехкомпонентные симметричные пьезоэлектрические сейсмометры	23
<i>Катренко В.Г., Чилибьева Е.А.</i> Автономная программируемая сейсмическая станция	26
<i>Фремд В.М., Школьников С.А.</i> Ждущий сейсмограф сильных землетрясений с комбинированным сейсмоакустическим запуском	38
<i>Латыпов М.М.</i> Пьезоэлектрические сейсмометры и акселерометры для регистрации землетрясений и низкочастотной промышленной вибрации	43
<i>Латыпов М.М., Аракелян Г.К., Касянук В.М.</i> Трехкомпонентный пьезоэлектрический сейсмометр с кубической инерционной массой	47
<i>Преображенский В.Б., Поляков А.Л.</i> Цифровое устройство для дискретной регистрации аналоговых сигналов	50

II. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

<i>Мардиросян Гаро Х.</i> Повышение эффективности геофизического фоторегистратора при помощи автоматического регулирования экспозиции	53
<i>Агаларова Э.Б., Аранович З.И., Корчагина О.А., Наврузов Х.Г., Трапезников Н.Л.</i> Результаты сравнения регистрационных возможностей приборов с фотогальванометрической и видимой регистрацией	57
<i>Шведчиков Л.К.</i> Передаточная функция электродинамического сейсмоприемника с активными обратными связями	60
<i>Гаспарян А.С., Мхитарян С.А., Карапетян С.В., Дозоров Т.А.</i> Применение прямой аналоговой записи для регистрации сейсмических сигналов в диапазоне частот от 0,1 до 15 Гц	71
<i>Рыков А.В.</i> К проблеме инфранизкочастотного сейсмографа	75
<i>Уломов И.В.</i> Сейсмометрические каналы регистрации сильных движений	78
<i>Дубровина Г.В., Фремд В.М.</i> Регистрационные возможности сейсмометрической аппаратуры при изучении тонких особенностей среды	82
<i>Трифонов Н.В., Чистяков В.А.</i> Особенности проектирования сейсмометров с обратными связями	85

III. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ АППАРАТУРЫ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

<i>Грайзер В.М., Рожной А.А., Соловьева М.С.</i> О восстановлении смещений по записям приборов с магнитной и цифровой регистрацией и выборе уравнения системы	91
<i>Карнаухова О.В., Каминский И.С., Чудакова М.В.</i> Система ввода цифровой сейсмической информации и алгоритмы автоматического выделения цугов поперечных колебаний при многоканальной регистрации	96
<i>Успенский Б.Г.</i> Передача данных геофизических наблюдений	103
<i>Трифонов Н.В.</i> Устройство стабилизации положения маятника сейсмометра	110

<i>Заславский Ю.Л., Растопшин А.И.</i> Подготовка аппаратного комплекса АСС-6/12-ВСС-6 к проведению сейсмометрических наблюдений	114
<i>Будников В.А., Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К., Поликарпов А.М.</i> Опыт исследования сейсмометрическим каналом работы электрогидравлического пресса	118
<i>Рыков А.В., Савин И.В., Смирнов Ю.Н., Старовойт Ю.О.</i> Сверхдлиннопериодный фильтр и предварительные наблюдения вертикальных колебаний	121
<i>Коридалин В.Е., Сергеев В.М.</i> Замкнутая система активной защиты измерительной аппаратуры от сейсмических шумов	126
<i>Железняк Т.К.</i> Длиннопериодные процессы и их связь с цунамигенными землетрясениями	127
<i>Катренко В.Г., Спириин А.И., Уломов И.В., Фрейд В.М., Чилибьева Е.А.</i> Опыт регистрации землетрясений наземными и донным сейсмографами для целей сейсмического районирования шельфа	131
<i>Левшенко В.Т., Штанге Д.В.</i> Об интерпретации колебаний, зарегистрированных безынерционным сейсмометром, от землетрясений на Алеутских островах в мае 1986 г.	139
<i>Коридалин В.Е., Сергеев В.М.</i> Механизм крепления аэродинамического блока магнитных головок регистратора сейсмозврьвных волн	144

IV. КАЛИБРОВКА СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ КАНАЛОВ

<i>Володин А.А., Урдуханов Р.И.</i> Калибровка сейсмостанции АСС 6/12 "Черепаша"	148
<i>Горбатов А.В., Преображенский В.Б., Урдуханов Р.И.</i> Некоторые вопросы методики калибровки сейсмостанции АСС 6/12	151
<i>Володин А.А., Зеликман Э.И., Капустян Н.К., Поликарпов А.М., Фрейд В.М.</i> Способ калибровки сети сейсмометрических каналов с помощью сейсмического сигнала, генерируемого ГЭС	155

V. МЕТРОЛОГИЯ

<i>Гончаров Л.А., Васильев И.М., Медведев В.Г., Токмаков В.А.</i> Нормирование надежности сейсмоизмерительных каналов	159
<i>Чистяков В.А.</i> О воспроизведении случайных сейсмических колебаний	163
<i>Чистяков В.А., Трифонов Н.В.</i> К определению наклонов подвижных систем образцовых сейсмометрических установок ПСГУ и ПСВУ	164
<i>Корытко Е.П., Капустина Н.Г.</i> Определение характеристик сейсмопреобразователей СМ-3 на поверочных установках ПСГУ и ПСВУ	169
<i>Саркисян Р.Е., Арзуманян Р.К.</i> О погрешности трехкомпонентных пьезоакселерометров	173
<i>Гросул А., Некрасов В.Н., Сергеев С.В.</i> Применение метода динамических наклонов в поле силы тяжести для градуировки вертикальных сейсмоприемников акселерометрического типа	175
<i>Некрасов В.Н., Сергеев С.В.</i> Сравнение характеристик индукционного, емкостного и пьезоэлектрического преобразовательных элементов сейсмоприемников	180

Научное издание

**АВТОМАТИЗАЦИЯ СБОРА И ОБРАБОТКИ
СЕЙСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ**

Сейсмические приборы

В ы п у с к 21

*Утверждено к печати
Институтом физики Земли
им. О.Ю. Шмидта АН СССР*

Художественный редактор *И.Ю. Нестерова*

Технический редактор *Н.М. Бурова*

Корректор *О.А. Разуменко*

Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 46778

Подписано к печати 08.12.89. Т — 15246
Формат 70 X 100 1/16. Бумага офсетная № 1
Гарнитура Пресс-Роман. Печать офсетная
Усл.печ.л. 15,6. Усл.кр.-отт. 15,9
Уч.-изд.л. 16,9. Тираж 750 экз.
Тип. зак. 2195. Цена 3 р. 40 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука" 117864 ГСП-7,
Москва В-485, Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ "НАУКА"

готовятся к печати книги:

Комплексная оценка сейсмической опасности. 20 л.

В книге рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с детальным изучением землетрясений: параметров колебаний грунтов, поверхностного эффекта. Изложены результаты работ по усовершенствованию методики оценки сейсмической опасности, прогнозирования сейсмических воздействий.

Для сотрудников научно-исследовательских и изыскательских организаций, занимающихся вопросами инженерной сейсмологии, геофизики, сейсмотектоники, инженерной геологии и сейсмостойкого строительства.

Автоматизация, метрология и новые разработки в сейсмометрии. 18 л.

В книгу включены материалы по разработке новых инструментальных средств в сейсмометрии, исследованию и совершенствованию существующей сейсмометрической аппаратуры, автоматизации сбора и обработки информации; рассмотрены проблемы нормирования метрологических характеристик приборов.

Для инженерно-технических работников, сейсмологов.

Адреса книготорговых предприятий "Академкнига"
с указанием магазинов и отделов "Книга-почтой"

Магазины "Книга-почтой":

252107 Киев, ул. Татарская, 6; 197345 Ленинград, ул. Петрозаводская 7; 117393 Москва, ул. Академика Пилюгина, 14, корп. 2.

Магазины "Академкнига" с указанием отделов "Книга-почтой":

480091 Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 "Книга-почтой"; 370001 Баку, ул. Коммунистическая, 51 "Книга-почтой"; 232600 Вильнюс, ул. Университето, 4 "Книга-почтой"; 690088 Владивосток, Океанский пр-т, 140 "Книга-почтой"; 320093 Днепрпетровск, пр-т Гагарина, 24 "Книга-почтой"; 734001 Душанбе, пр-т Ленина, 95 "Книга-почтой"; 375002 Ереван, ул. Туманяна, 31; 664033 Иркутск, ул. Лермонтова, 289 "Книга-почтой"; 420043 Казань, ул. Достоевского, 53 "Книга-почтой"; 252030 Киев, ул. Ленина, 42; 252142 Киев, пр-т Вернадского, 79; 252025 Киев, ул. Осипенко, 17; 277012 Кишинев, пр-т Ленина, 148 "Книга-почтой"; 343900 Краматорск Донецкой обл., ул. Марата, 1 "Книга-почтой"; 660049 Красноярск, пр-т Мира, 84; 443002 Куйбышев, пр-т Ленина, 2 "Книга-почтой"; 191104 Ленинград, Литейный пр-т, 57; 199164 Ленинград, Таможенный пер., 2; 194064 Ленинград, Тихорецкий пр-т, 4; 220012 Минск; Ленинский пр-т, 72 "Книга-почтой"; 103009 Москва, ул. Горького, 19-а; 117312 Москва, ул. Вавилова, 55/7; 630090 Новосибирск, Морской пр-т, 22 "Книга-почтой"; 630076 Новосибирск, Красный пр-т., 51; 142284 Протвино Московской обл., ул. Победы, 8; 142292 Пушкино Московской обл., ул. МР "В", 1 "Книга-почтой"; 620151 Свердловск, ул. Мамина-Сибиряка, 137 "Книга-почтой"; 700000 Ташкент, ул. Ю. Фучика, 1; 700029 Ташкент, ул. Ленина, 73; 700070 Ташкент, ул. Ш. Руставели, 43; 700185 Ташкент, ул. Дружбы народов, 6 "Книга-почтой"; 634050 Томск, наб. реки Ушайки, 18; 450059 Уфа, ул. Р. Зорге, 10 "Книга-почтой"; 450025 Уфа, ул. Коммунистическая, 49; 720001 Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 "Книга-почтой"; 310078 Харьков, ул. Чернышевского, 87 "Книга-почтой"

3р. 40 к.

5246

ISSN 0131—6230. Автоматизация сбора и обработки сейсмической информации.
Сер. Сейсмические приборы, 1990. Вып. 21. 1—192.