

Разработка сейсмодатчиков на новых технологических принципах (молекулярная электроника)

© 1999 И.А.Абрамович, В.М.Агафонов, С.К.Дараган,
В.А.Козлов, А.В.Харламов

Прогресс современной сейсмологии неразрывно связан с развитием мировой сейсмической сети, оснащаемой инструментами с большим динамическим и широким частотным диапазонами. Современные сейсмодатчики, конструкции которых основаны на принципах точной механики, слишком дороги. В статье описан новый тип сейсмодатчиков, созданных по принципиально другой технологии – технологии молекулярной электроники. Они практически не содержат элементов точной механики, что существенно снижает их стоимость. Характеристики новых сейсмодатчиков удовлетворяют требованиям, предъявляемым к приборам для работы на региональных сейсмических станциях, а в ближайшей перспективе они могут быть использованы и в полевых условиях для работы в широком диапазоне температур.

1. Введение

Прогресс современной сейсмологии неразрывно связан с развитием мировой сейсмической сети, оснащаемой инструментами с большим динамическим и широким частотным диапазонами. Поскольку все современные сейсмоприемники базируются на принципах точной механики, их стоимость может достигать нескольких тысяч долларов за компоненту, что фактически делает финансовые затраты на создание сейсмических сетей и групп непомерными для большинства исследователей. Только по этой причине часто приходится отказываться от многих проектов и экспериментов.

Существенный прогресс в этой области может быть достигнут путем использования в качестве чувствительных элементов сейсмопреобразователей, работающих на принципах молекулярной электроники. К преимуществам этих преобразователей относятся почти полное отсутствие элементов точной механики, высокая технологичность производства, следствием которых является их низкая стоимость (при достаточно приемлемых технических характеристиках), продолжительном (не менее 15 лет) сроке эксплуатации и простоте установки и обслуживания.

История этого вопроса восходит к началу 60-х годов нашего века. Тогда, почти в одно и то же время в США и СССР, начались широкие исследования по созданию элементов, чувствительных к механическим перемещениям, на основе электрохимических явлений. В Советском Союзе эти исследования проводились в Институте электрохимии АН СССР в содружестве МФТИ и Института источников тока Минэлектропрома.

Однако к середине 70-х годов американцы пришли к выводу о бесперспективности этого направления из-за невозможности создания электрохимических ячеек с устойчивыми во времени характеристиками, что связано с высокой активностью электролитов, воздействующих на внешнюю оболочку элементов и приводящую к изменению их химического состава за счет по-

сторонних примесей. Кроме того, неудачи были связаны и с тем, что исследователи пытались реализовать измерительную ячейку, принцип работы которой описывается в рамках одномерного уравнения конвективной диффузии. Это приводило к появлению в передаточной функции сейсмодатчика членов с дробной степенью от ω , которые не давали возможности сформировать нормальную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) сейсмического канала с более или менее широкой рабочей полосой частот.

В то же время в Советском Союзе эти исследования активно продолжались, и к началу 90-х годов произошел теоретический и технологический прорыв: исследования процессов конвективной диффузии в трехмерных структурах выявили отсутствие принципиальных запретов для создания молекулярно-электронного преобразователя, передаточная функция которого имела бы частотную зависимость, близкую к $1/\omega$ [Бабанин и др., 1990; Козлов и др., 1991; Козлов, Тугаев, 1996]. Удалось подобрать материалы оболочек, практически не взаимодействующих с электролитом, состав которого и характеристики в течении долгого времени (не менее 15 лет) остаются неизменными.

Однако первые сейсмодатчики имели технические характеристики низкого качества с точки зрения формы АЧХ и шумов из-за плохой электроники, как по схемному решению, так и по элементной базе, так как отечественная элементная база не позволяла получить нужные шумовые характеристики усилительного тракта. Кроме того, почти полное отсутствие метрологической и экспериментальной геофизической базы не позволяло этим организациям самостоятельно разрешить стоящие перед ними проблемы. В этих условиях руководство Института источников тока обратилось к руководству бывшего Спецсектора ИФЗ АН СССР с предложением о сотрудничестве в создании молекулярно-электронных сейсмических датчиков. Проведение совместных полевых испытаний показало основные недостатки датчиков и направления их возможного разрешения. Стало очевидным, что без привлечения импортной электронной элементной базы решить проблему шумов не удастся.

В 1991 г. к проекту была привлечена небольшая американская фирма PMD Ingeneering Compani, ранее занимавшаяся разработкой измерительной аппаратуры для нефтяного комплекса, которая проявила интерес к созданию сейсмических датчиков на новой технологической основе. К тому времени участвующая в проекте группа сотрудников Спецсектора перешла в ОИФЗ и теперь в нем участвуют: кафедра молекулярной электроники МФТИ и лаборатория № 307 ОИФЗ РАН, – со стороны России, и фирма, которая теперь называется PND Scientific inc., так как она занимается разработкой только сейсмометрических комплексов, – со стороны США.

2. Принципы работы молекулярно-электронного сейсмодатчика

В основе преобразования внешнего механического сигнала в электрический ток лежит процесс конвективной диффузии ионов в растворе электролита. Главным элементом диффузионного преобразователя (ДП) является молекулярно-электронная ячейка (МЭЯ), которая состоит из двух электродов (анода и катода), помещенных в растворе электролита. При подаче на электроды постоянной разности потенциалов в системе устанавливается градиент концентрации ионов, способных принимать участие в обратимой окислительно-восстановительной реакции и способствующих протеканию диффузионного тока. Если жидкость приходит в движение под воздействием внешнего возмущения, тогда наряду со стационарной диффузией возникает конвектив-

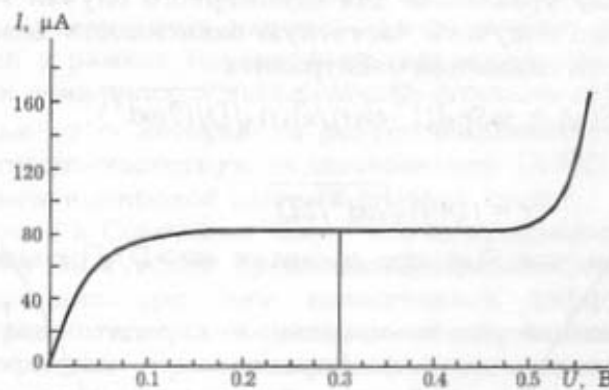


Рис. 1. График зависимости тока МЭЯ горизонтального сейсмодатчика от напряжения питания

ный перенос ионов, что меняет скорость доставки реагирующих веществ к электродам и, соответственно, ток, текущий в МЭЯ.

В рамках одномерной задачи, когда расстояние между электродными пластинами d существенно меньше их линейных размеров, диффузионный ток определяется выражением

$$I = 2eDc_0(S/d)\text{th}(eU/2kT), \quad (1)$$

где D — коэффициент диффузии; c_0 — фоновая концентрация ионов; S — площадь пластины электрода; U — разность потенциалов, приложенная к электродам; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура. На рис. 1 приведена зависимость тока покоя МЭЯ от разности потенциалов, приложенных к ее электродам. При малых U , когда $eU \ll kT$, величина тока линейно возрастает с ростом напряжения, а при $eU \gg kT$ величина тока практически не меняется с ростом напряжения и близка к своему предельному значению:

$$I_{\text{пр}} = 2eDc_0S/d. \quad (2)$$

Если под воздействием внешнего возмущения жидкость приходит в движение со скоростью потока v , то величина протекающего в МЭЯ конвективного тока будет определяться формулой

$$I_{\text{к}} = ec_0v. \quad (3)$$

Сравнивая формулы (2) и (3) и принимая $d \cong 10^{-1}$ см, $D = 10^{-5}$ см²/с и $S = 2$ см², получим, что диффузионный и конвективный токи равны уже при $v \cong 10^{-4}$ см/с. Из этого соотношения видна причина столь высокой чувствительности ДП к действию внешних механических возмущений.

В свою очередь, система уравнений, описывающая конвективный перенос ионов в МЭЯ, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \partial v / \partial t + (v \nabla v) &= -\nabla p / \rho + \nu \Delta v + f / \rho; \\ \text{div } v &= 0; \\ \partial c / \partial t + v \nabla c &= D \Delta c, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где ν — кинематическая вязкость раствора; ρ — его плотность; f — плотность объемных сил. Первое уравнение в системе (4) представляет собой уравнение Навье-Стокса, второе выражает условие несжимаемости жидкости, а последнее описывает нестационарную диффузию ионов в движущейся жидкости.

Анализ этих уравнений показывает, что в одномерном случае градиент концентрации, а стало быть, и текущий в МЭЯ ток, начиная с частот порядка D/d^2 , пропорциональны $\omega^{-1/2}$.

Решая эту систему уравнений для одномерного случая и малых внешних возмущений, можно получить частотную зависимость величины конвективного тока от скорости движения электролита:

$$S(\omega) = jeSc_0((1-\text{ch}\tau)/\text{ch}\tau)\sqrt{D/(2\omega d^2)}, \quad (5)$$

где

$$\tau = (1+j)\sqrt{\omega d^2/2D}. \quad (6)$$

Из формулы (6) видно, что $S(\omega)$ при частотах $\omega \gg D/d^2$ снижается пропорционально $\omega^{-1/2}$.

Приведенная закономерность изменения передаточной функции ДП приводит к тому, что вся тяжесть формирования широкополосной АЧХ сейсмического канала в привычной для сейсмолога функциональной зависимости выходного параметра от входного возмущения, например велосиметра, ложится на электронику, что резко усложняет структурную схему этой части прибора. Однако достижения современной микроэлектроники, в результате которых появилось много промышленных образцов операционных усилителей с уникальными характеристиками по шумам входного тока и напряжения, потреблению энергии и геометрическим размерам, позволяют эффективно решать эту задачу, не выходя за разумные рамки габаритов, энергопотребления и стоимости прибора.

3. Механическая система молекулярно-электронного датчика

Что касается трехмерного случая, то, например, в сферической геометрии третье уравнение системы (4) принимает вид

$$\partial c/\partial t - (D/r^2)(\partial(r^2 \partial c/\partial r)/\partial r) + q \cos(\omega t)(\partial c/\partial r)/(2\pi^2) = 0, \quad (7)$$

где q – объемная скорость жидкости. Уравнение (7), будучи существенно нелинейным, вообще говоря, дает сложную зависимость градиента концентрации от частоты. Однако при выполнении условий $(D/\omega/A)^2 \ll 1$ и $q < 24\pi DA$ (где A – радиус сферического электрода) электрический ток, текущий через ячейку, обнаруживает частотную зависимость $\sim 1/\omega$ [Козлов и др., 1991]. Численный анализ уравнения (7) показывает, что при $A=189$ мкм частотная зависимость указанного типа наблюдается начиная с частоты порядка 0.01 Гц. При этом величина выходного тока линейно связана со скоростью движения электролита в динамическом диапазоне ~ 110 дБ.

Поскольку практическая реализация преобразователя со сферической ячейкой крайне сложна и мало пригодна для массового производства, используется ячейка с сетчатой структурой электродов, приведенная на рис. 2. Такая ячейка выполняет роль сферической при определенных соотношениях между шагом сетки и размером отверстий перфорированной перегородки, разделяющей электроды. В отличие от предыдущей, данная конфигурация более удобна для массового производства.

Что касается создания перепада давления, вызывающего поток жидкости через электродную систему, то в вертикальном сейсмодатчике используются инерционные свойства жидкости, заключенной в полый цилиндр, закрытый с двух сторон упругими мембранами. Сверху и снизу к мембранам приклеены стальные накладки. Для создания возвращающей силы к верхней накладке крепится масса, а снизу сосуд подпирается винтовой пружиной. Электродный узел расположен в средней части сосуда.

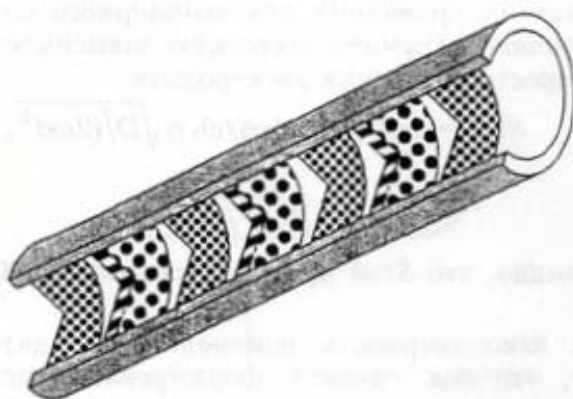


Рис. 2. Сетчатая структура электрода МЭЯ

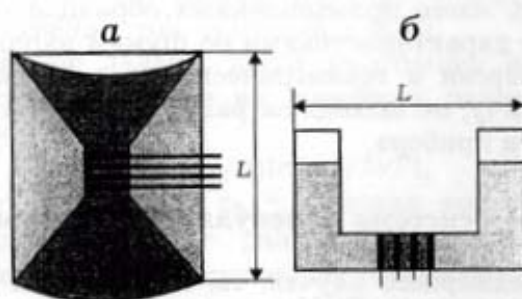


Рис. 3. Схематический чертеж вертикального (а) и горизонтального (б) сейсмодатчиков

Для горизонтального сейсмодатчика механическая система представляет собой вертикально стоящий керамический тор, наполовину заполненный жидкостью. В нижней части тора расположен электродный узел.

Схематически вертикальный и горизонтальный датчики показаны на рис. 3, а, б. Оба датчика представляют собой колебательную систему, в которой роль затухания выполняет гидродинамическое сопротивление чувствительного элемента, а роль упругости – эластичные мембраны для вертикального датчика и сила тяжести – для горизонтального.

Учитывая то, что стандартное значение гидродинамического сопротивления порядка 10^8-10^9 Н·с/м⁵, вертикальный и горизонтальный сейсмодатчики представляют собой сильно демпфированную систему. Обе системы могут быть описаны в рамках единого уравнения путем введения обобщенных координат Q и импульса P :

$$\left. \begin{aligned} Q' &= P/m^*; \\ P' &= -m^*\omega_0^2Q - R_gP, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $Q = V$; $m^* = \rho L/S$; R_g – гидродинамическое сопротивление чувствительного элемента; S – площадь поверхности жидкости или эффективная площадь мембран для вертикального преобразователя, соответственно; $\omega_0^2 = 2g/L$ для горизонтального сейсмодатчика и $\omega_0^2 = \alpha/(\rho L)$ – для вертикального, где α – объемная жесткость мембраны; V – объем жидкости, протекающей через преобразователь в единицу времени.

Решение системы (8) приводит к стандартному выражению для передаточной функции колебательной системы. При этом для малых ω соответствующая передаточная функция пропорциональна ω вплоть до частот $\omega_n = 2\rho g / (SR_g)$ и $\omega_n = \alpha / (SR_g)$ горизонтального и вертикального чувствительных элементов, соответственно. С учетом того, что передаточная функция электродной системы имеет верхнюю граничную частоту, равную D/d^2 , передаточная функция преобразователя имеет колоколообразный вид как для горизонтального, так и для вертикального сенсора. При этом нижняя граничная частота горизонтального сенсора определяется только локальным значением силы тяжести и геометрическими размерами прибора, а для вертикального – величиной объемной жесткости и эффективной площади мембраны.

4. Основные технические характеристики

4.1. Описание электронной схемы

При разработке молекулярно-электронных сейсмодатчиков особое внимание уделялось проектированию элементов сопутствующей электроники, параметры которой во многом определяют динамические и шумовые характеристики прибора в целом.

Несмотря на то, что молекулярно-электронные преобразователи (МЭП) имеют существенно более высокую чувствительность по сравнению с традиционными для сейсмометрии параметрическими системами магнитоэлектрического или конденсаторного типа и не требуют от электроники больших усилений, их крутизна преобразования обнаруживает сильную частотную и температурную зависимость, что усложняет схему и предъявляет соответствующие требования при расчете корректирующих цепей.

Принципиальная схема электроники усилительного тракта МЭП приведена на рис. 4. На аноды МЭЯ подается постоянное стабилизированное напряжение 300 мВ, необходимое для установления градиента концентрации между электродами. При этом в системе протекает некоторый начальный постоянный ток, модулируемый внешним сигналом. Каждая из двух МЭЯ, составляющих МЭП, включена в схему как источник тока.

В первом каскаде схемы выходной ток МЭП преобразуется в напряжение. Следующий каскад выполняет сразу несколько функций: компенсацию спада АЧХ сенсора на низких и высоких частотах, суммирование сигналов дифференциально включенных ячеек (для того чтобы сигналы начальных токов ячеек вычитались, а сигналы от внешнего воздействия складывались, выход первого каскада одной из МЭЯ подключен к инвертору, а сигнал с его выхода идет на сумматор) и термокомпенсацию в области средних и высоких частот.

В третьем каскаде осуществляются дополнительный подъем АЧХ на самых низких частотах, где спад обусловлен механическими параметрами МЭП, а также термокомпенсация изменения крутизны преобразования во всем частотном диапазоне.

Последний каскад схемы включает в себя фильтры низких и высоких частот, определяющие границы рабочего диапазона АЧХ. В этом же каскаде формируется дифференциальный выходной сигнал.

Электрическая схема выполнена с использованием новейших мировых разработок низкошумящих операционных усилителей, что позволило значительно уменьшить уровень собственного шума молекулярно-электронных

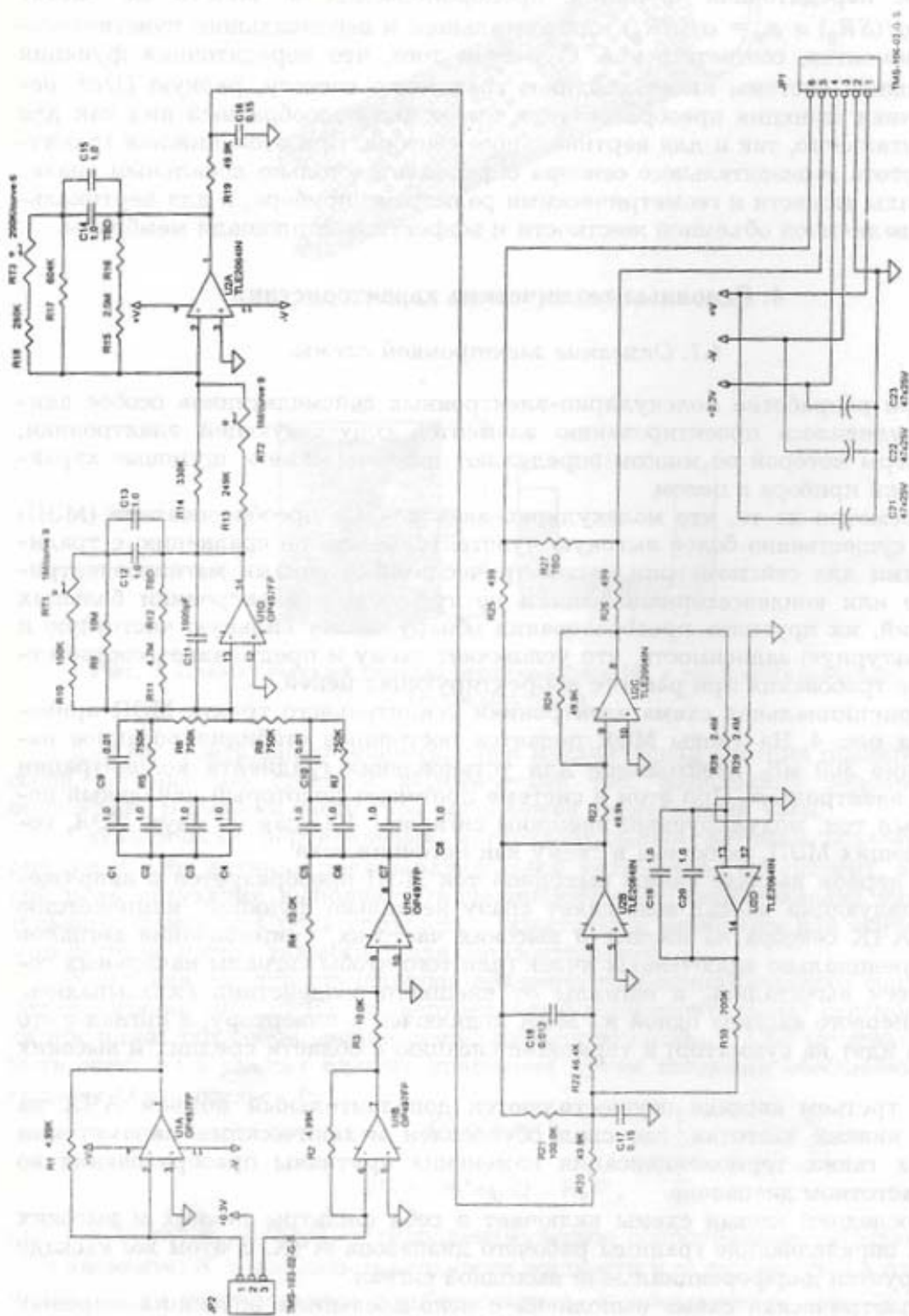


Рис. 4. Электронная схема усилительного тракта велосигнала RMD-2023

сейсмоматчиков и расширить динамический диапазон до 130–140 дБ. При этом шумы электроники оказываются на 20–30 дБ ниже собственных шумов МЭП во всем частотном диапазоне, что открывает дополнительные возможности исследования оптимизации характеристик МЭП, а также позволяет надеяться на дальнейшее расширение рабочего диапазона АЧХ без потерь их основных качественных показателей.

4.2. Описание АЧХ и других параметров приборов

Типичные кривые амплитудно-частотных (АЧХ) и фазовых характеристик (ФХ) трактов по скорости перемещения почвы, т.е. когда прибор является велосиметром, приведены для вертикального канала на рис. 5,а,б, а для горизонтального канала соответственно на рис. 6,а,б. АЧХ имеет низкочастотный срез с крутизной 18 дБ/окт. начиная с частоты 0.033 Гц. Частота среза высокочастотного склона определяется выходным фильтром 3-го порядка. Она может составлять, в зависимости от номиналов элементов фильтра, 5, 10 и 25 Гц. В пределах рабочей полосы частот неравномерность АЧХ не превы-

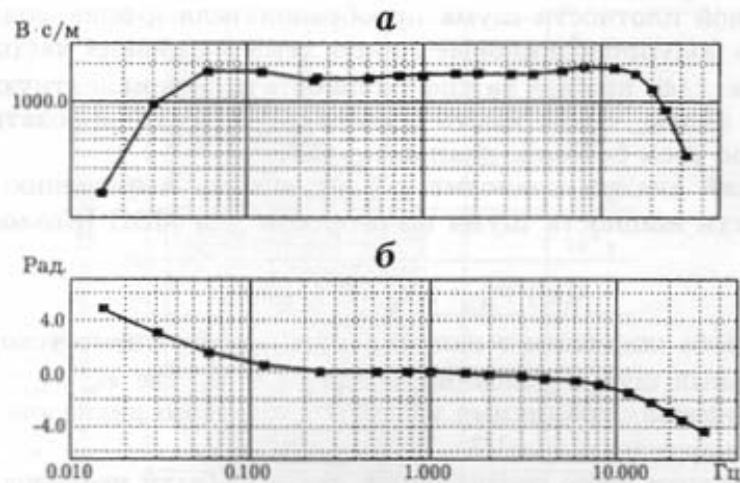


Рис. 5. АЧХ (а) и ФХ (б) вертикального велосиметра РМД-2023

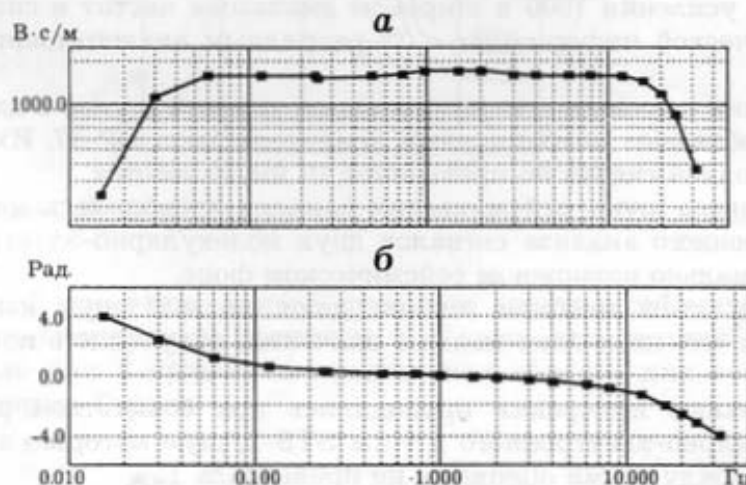


Рис. 6. АЧХ (а) и ФХ (б) горизонтального велосиметра РМД-2023

шает ± 3 дБ. Коэффициент преобразования равен 750 В·с/м на однофазном выходе и 2×750 В·с/м – на симметричном. Минимальный разрешаемый сигнал составляет 50–60 нм/с в рабочей полосе частот и определяется шумами тракта. Динамический диапазон прибора ~110 дБ. Максимальное выходное напряжение сигнала ± 5 В на однофазном выходе и ± 10 В – на дифференциальном. Поперечная чувствительность не превышает 0.5%.

Рабочий диапазон температур, в котором гарантируется отклонение чувствительности от номинальной на любой частоте в рабочей полосе не более $\pm 10\%$, от $+5^\circ$ до $+35^\circ\text{C}$. Напряжение питания прибора $+10 \dots +18$ В. Общее потребление не превышает 4.5 мА.

Сейсмодатчики вместе с электронной схемой помещаются в цилиндрическом корпусе диаметром 203 мм и высотой 155 мм. Масса прибора около 4.5 кг.

5. Шумовые характеристики сейсмических каналов и их отдельных составляющих

Жесткие требования, предъявляемые к шумовым характеристикам сейсмических приборов, диктуют необходимость особо тщательного согласования спектральной плотности шума преобразователя и электронной схемы. Учитывая то, что полупроводниковые микросхемы на низких частотах имеют компоненту шума $1/\omega$, крайне важно разработать эквивалентную шумовую схему прибора в целом, чтобы иметь возможность оптимизировать шумовые характеристики во всем рабочем диапазоне частот.

Теоретический анализ приводит к следующему выражению для спектральной плотности мощности шума по скорости для МЭП [Козлов, Сахаров, 1994]:

$$\langle (x')^2 \rangle_\omega = 2R_g kT / (\rho L \omega)^2, \quad (8)$$

где L – длина столба жидкости в направлении действующего ускорения. Тем самым, интегральный шум в условиях, когда $\omega_v \gg \omega_n$, где ω_v , ω_n – соответственно верхняя и нижняя граничные частоты частотного диапазона сейсмического канала, пропорционален $\omega^{-1/2}$.

С целью проверки этого соотношения сначала были исследованы шумовые характеристики электронной схемы. Для измерения использовался специально разработанный усилитель с низким уровнем собственных шумов с коэффициентом усиления 1000 в широком диапазоне частот и система регистрации сейсмической информации с 22-разрядным аналого-цифровым преобразователем.

Исследования показали, что наименьшим уровнем шумов в данной электронной схеме обладают операционные усилители типа ОР-97. Их уровень в пересчете на входной сигнал не превышает 10 нм/с пик-пик.

Оценка полного шума сейсмических каналов проводилась методом взаимно-корреляционного анализа сигналов двух молекулярно-электронных каналов при минимально возможном сейсмическом фоне.

Полученные этим методом оценки дают полный шум канала около 50 нм/с пик-пик, что несколько меньше значения, полученного по теоретическим расчетам.

Дополнительные измерения проводились при совместной регистрации каналов молекулярно-электронного и типа STS-2, шум которого значительно ниже. Разница между этими оценками не превышала 15%.

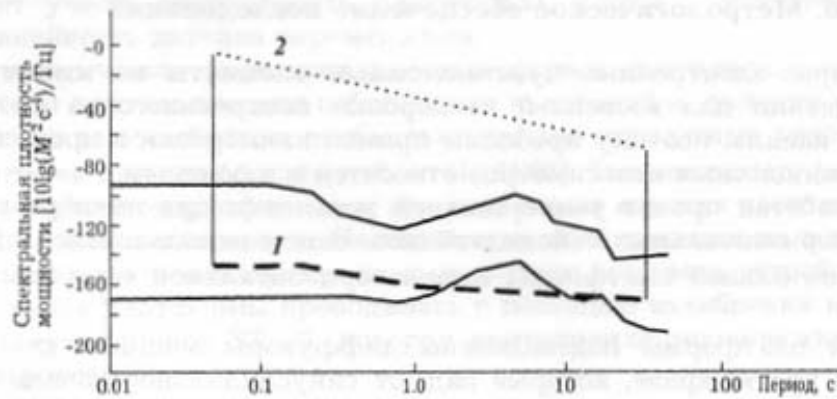


Рис. 7. Область функционирования велосиметра PMD-2023. Вертикальные линии – границы частотного диапазона. 1 – уровень шума прибора; 2 – максимальный уровень сигнала, регистрируемый прибором. HNM – максимальная шумовая модель, LNM – минимальная

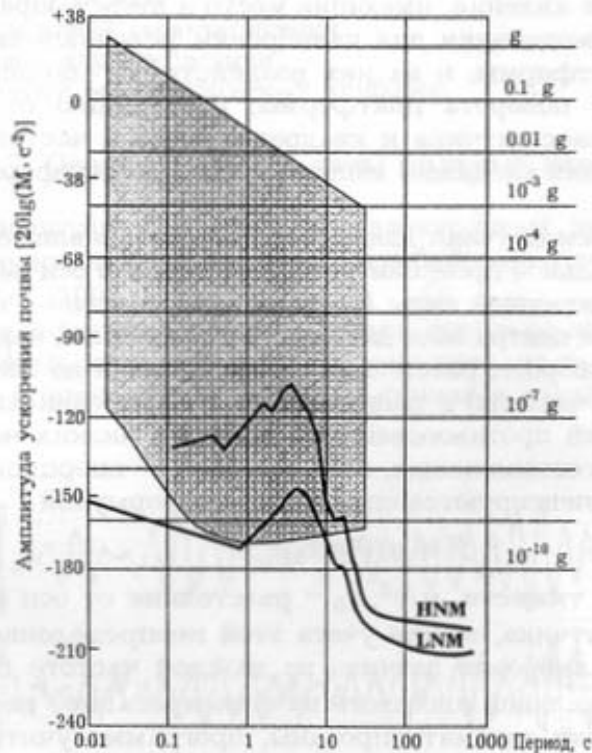


Рис. 8. Область функционирования велосиметра CMG-40T и кривые HNM и LNM

На рис. 7 приведена кривая шумового спектра сейсмического канала с молекулярно-электронным датчиком и область его функционирования. Для сравнения на рис. 8 приведена аналогичная область для велосиметра типа CMG-40T фирмы Гуралп.

6. Метрологическое обеспечение исследований

Молекулярно-электронные чувствительные элементы не имеют механизма возбуждения для косвенной калибровки построенного на их основе сейсмического канала, поэтому проблемы прямой калибровки в процессе разработки широкополосных велосиметров относятся к ключевым.

Был разработан проект универсальной установки для калибровки вертикальных и горизонтальных сейсмодатчиков. В нем использовался принцип качания горизонтальной платформы вокруг горизонтальной оси [Abramovich et al., 1995].

К концам платформы подсоединены диффузоры мощных динамиков, включенных в противофазе, которые задают синусоидальное качание платформы относительно оси, проходящей через центр подвески. Встроенный высокоточный датчик перемещений позволяет независимым образом контролировать истинный характер ее движения.

Развиваемая динамиками мощность достаточна, чтобы на базе в 1 м обеспечивать амплитуду перемещения платформы в 4–5 мм. Специально разработанный генератор высокочастотной “накачки” позволяет практически устранить гистерезисные явления, имеющие место в диффузорах.

Вертикальные сейсмодатчики для калибровки устанавливаются на концах горизонтальной платформы, и на них воздействуют инерционные силы, пропорциональные углу поворота платформы, расстоянию от оси качания платформы до центра масс датчика и квадрату угловой частоты. При установке датчика специальная следящая система выводит платформу в горизонтальное положение.

Горизонтальные сейсмодатчики для калибровки устанавливаются в центре платформы – на вертикальной проекции ее горизонтальной оси качания. На них воздействует сумма инерционной силы (появление ее связано с несовпадением оси качания платформы и центра масс датчика, и ее величина, как было сказано выше, зависит от угла поворота, расстояния от оси качания до центра масс датчика и квадрата угловой частоты) и гравитационной силы, зависящей только от угла поворота и имеющей противоположный знак. На низких частотах доминирует гравитационная составляющая, а на высоких – инерционная. Частота, на которой эти силы компенсируются определяются формулой

$$f^2 = g/(4\pi^2\tau_0), \quad (10)$$

где g – ускорение силы тяжести, м/с²; τ_0 – расстояние от оси качания установки до центра масс датчика, м. Для учета этой неопределенности с τ_0 производится повторная калибровка датчика на каждой частоте при смещении его центра масс в вертикальной плоскости на фиксированное расстояние l .

Операции калибровки автоматизированы, программа учитывает все аспекты, связанные с несовпадением оси качания с центром масс датчика, и взаимодействие инерционных и гравитационных сил на разных частотах. Исследователь задает только набор частот, на которых калибруется датчик, амплитуды воздействия на разных частотах и точное положение корпуса прибора на платформе.

Сигналы с выходов датчика перемещения и калибруемых приборов фиксируются специально разработанной системой цифровой регистрации, а затем обрабатываются на ЭВМ. Сигнал от калибруемого датчика, полученный на каждой частоте, подвергается спектральному преобразованию и модуль АЧХ калибруемого канала вычисляется как отношение максимумов спектров сигналов на его выходе и на выходе датчика перемещений. Такой алгоритм

позволяет учесть нелинейность платформы, которая, естественно, больше, чем нелинейность датчика перемещений.

Математическое моделирование платформы позволило выявить все ее практически важные частоты собственных колебаний и провести оптимизацию конструкции таким образом, чтобы вывести все паразитные резонансы за рабочий интервал частот [Abramovich et al., 1996]. Так, например, моделирование показало недостаточную фиксацию оси качания на высоких частотах с помощью крестообразных шарнирных подвесов. Замена этих подвесов на торсионный вал позволила повысить частоту первого паразитного резонанса устройства до 45 Гц.

Проверка платформы проводилась с помощью калибровки на ней образцовых сейсмодатчиков STS-2, которая подтвердила технические характеристики устройства:

Частотный диапазон	0.0005–30 Гц
Максимальная скорость перемещения:	
при частоте 0.01 Гц	0.6 мм/с
при частоте 20 Гц	2.4 мм/с
Максимальная угловая скорость на частоте 1 Гц	20 мрад/с
Точность установки частоты	0.01 %
Точность определения:	
амплитудной характеристики	2 %
фазовой характеристики	< 0.02 рад
Максимальный вес калибруемых приборов	20 кг

7. Основные результаты полевых испытаний

Полевые испытания молекулярно-электронных датчиков PMD проводились в геофизической обсерватории Колумбийского университета в г. Ла-монт [Abramovich et al., 1993, 1995].

Первая модификация прибора имела довольно значительные шумы регулярного и импульсного характера. Кроме того, из-за отсутствия в то время калибрующей установки передаточная функция каналов отличалась от теор-

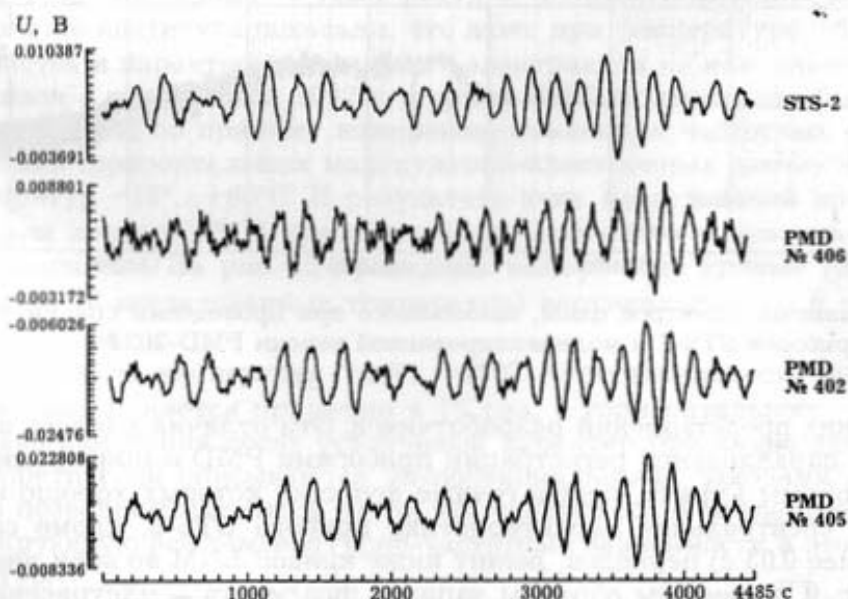


Рис. 9. Сравнительная регистрация вертикальных каналов приборов STS-2 (верхняя трасса) и трех молекулярно-электронных приборов

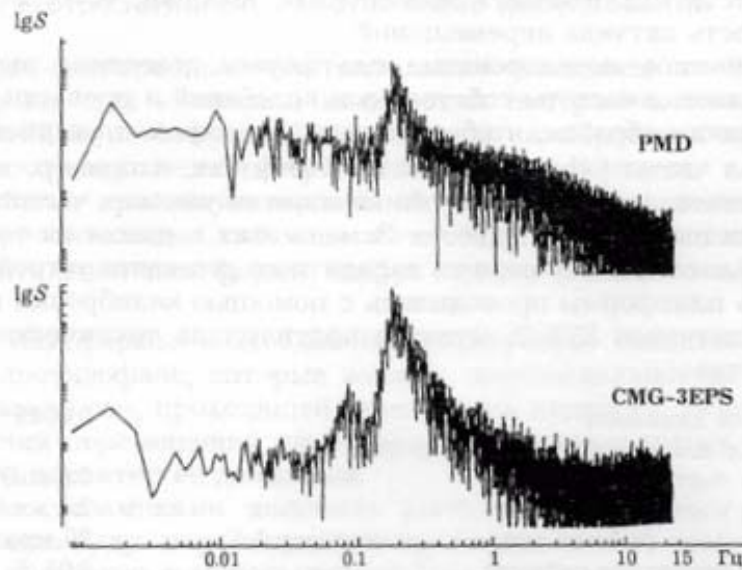


Рис. 10. Сравнение спектров фона, записанного при проведении сравнительной регистрации прибором первого поколения PMD и прибором CMG-3ESP

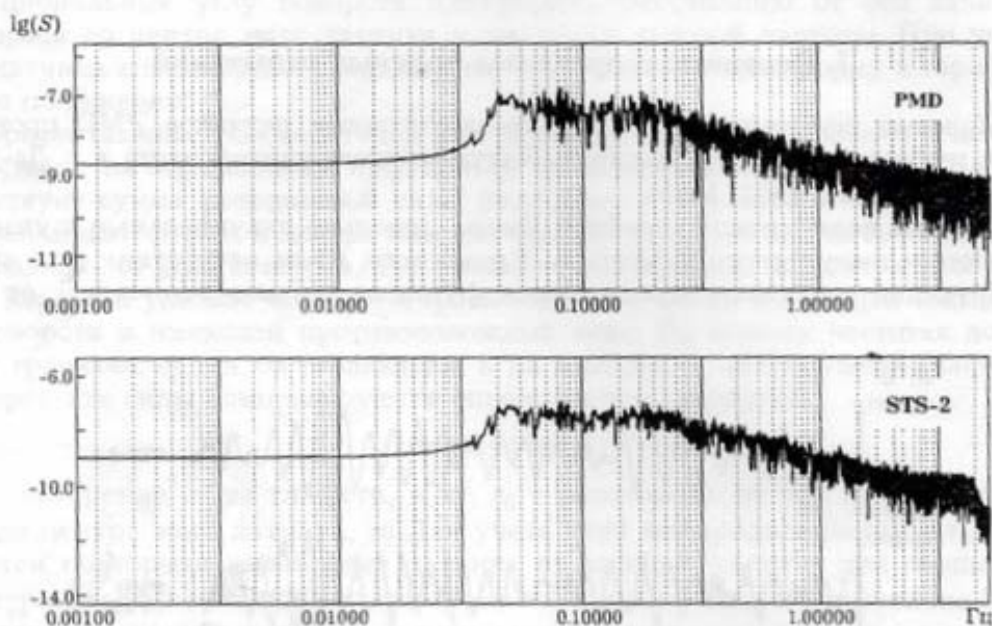


Рис. 11. Сравнение спектров фона, записанного при проведении сравнительной регистрации приборов STS-2 и модернизированной версии PMD-2023

теоретических представлений разработчиков. Эти отличия удалось выявить в результате параллельной регистрации приборами PMD и приборами STS-2 и CMG-40T фирмы Гуралп, передаточные функции которых хорошо известны, а шумовая спектральная характеристика прибора STS-2, кроме самых коротких (менее 0.03 с) периодов, лежит ниже кривой LNM во всем диапазоне.

На рис. 9 приведены образцы записей фрагмента землетрясения в Греции 15 июня 1993 г., записанное прибором STS-2 и тремя вертикальными датчиками PMD. Видны существенные расхождения формы сигналов, запи-

санных приборами STS и PMD, а также между записями, сделанными с помощью только приборов PMD.

На рис. 10 приведены спектры фонового сигнала, записанного с помощью прибора PMD первого поколения и прибора CMG-3ESP. Из этого сравнения видно, что передаточная функция чувствительного элемента близка к $\omega^{-1/2}$, а шум на высоких частотах недопустимо высок.

Оптимизация параметров МЭЯ, улучшение формы и способа крепления подпиральной пружины, герметизация вертикального датчика, улучшение шумовых параметров электронной схемы за счет рационализации ее структуры и параметров отдельных элементов, появление средства прямой калибровки, – все это привело к улучшению характеристик приборов PMD-2023, как по форме кривой АЧХ, так и по шумам.

На рис. 11 приведены спектры фонового сигнала, записанного модернизированным прибором PMD-2023, и прибором STS-2. В настоящее время АЧХ прибора PMD по скорости имеет в рабочем диапазоне частот вид $\omega^{0.04}$, шумы испытуемого прибора снижены почти в 50 раз, поэтому спектры практически не отличаются во всем диапазоне частот. Некоторый спад спектра STS-2 на частотах выше 5 Гц связан с наличием фильтра нижних частот на выходе его канала, которого не было в приборе PMD.

8. Перспективы улучшения характеристик приборов

Дальнейшее улучшение эксплуатационных характеристик молекулярно-электронных приборов следует вести по нескольким направлениям.

1) *Расширение температурного диапазона функционирования.* Как указывалось выше, температурный диапазон, в котором приборы сохраняют свои характеристики с точностью не хуже 10%, составляет $+5 \dots +35^\circ\text{C}$, что дает возможность использовать их только в стационарных условиях приэкваториальных и умеренных широт (средняя температура в шахте на сейсмостанции Боровое, например, составляет около $+5^\circ\text{C}$), накладывающее большие ограничения на их применение. В то же время в МФТИ был разработан морозостойкий электролит с температурой функционирования до -20°C . Работы этого же института показали, что даже при температуре $+60^\circ\text{C}$ химические свойства и характеристики такого электролита не изменяются.

В связи с этим весной 1997 г. фирмой PMD Scientific inc. были проведены эксперименты по прямому измерению изменения частотных свойств вертикальных и горизонтальных молекулярно-электронных датчиков в диапазоне температур $-15^\circ \dots +60^\circ\text{C}$. В результате этих исследований впервые получены серии кривых АЧХ чувствительных элементов в указанном температурном диапазоне. На рис. 12 приведены выборочные кривые АЧХ (для нескольких из 16 исследованных температур) вертикальных (а) и горизонтальных (б) сенсоров.

В интервале температур $-10^\circ \dots +55^\circ\text{C}$ чувствительность вертикального сейсмодатчика меняется примерно в 15 раз, а горизонтального – почти в 40 раз, однако изменения носят устойчивый характер при смене датчиков и хорошо теоретически описываются экспоненциальными законами. Эти обстоятельства позволяют надеяться на то, что удастся создать электронную схему, компенсирующую все температурно-частотные зависимости в этом диапазоне температур.

2) *Снижение уровня шума.* На данном этапе критичными является шум датчиков, поэтому его уменьшение наиболее актуально.

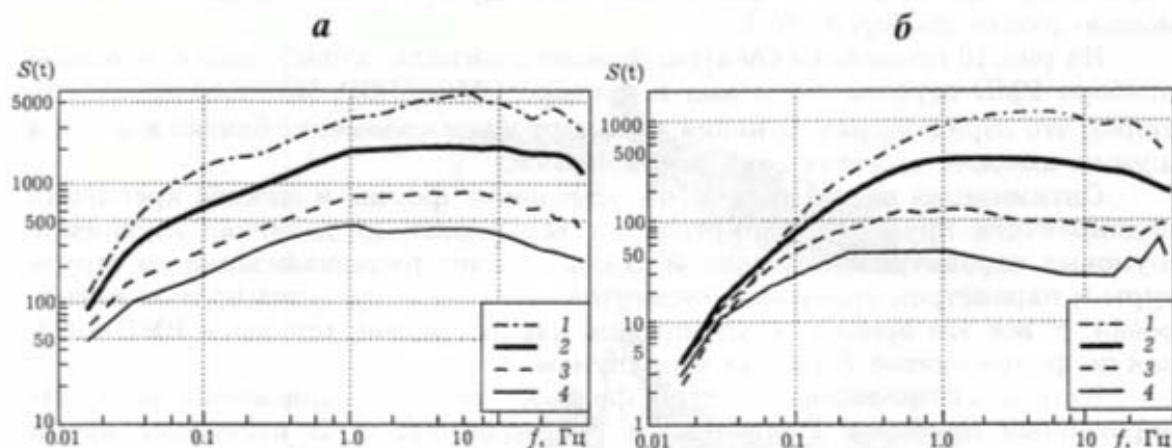


Рис. 12. АЧХ вертикального (а) и горизонтального (б) сейсмодатчика в зависимости от окружающей температуры: $+55^{\circ}\text{C}$ (1), $+20^{\circ}\text{C}$ (2), 0°C (3), -10°C (4)

Снижение шума вертикального сенсора осуществляется увеличением присоединенной массы. Для горизонтальных сенсоров снижение шума возможно с помощью изменения геометрии, которое позволит увеличить количество электролита, реагирующего на горизонтальные ускорения (превращение круглого тора в эллиптический с большой горизонтальной осью). Эти мероприятия позволят, практически не меняя габариты и массу прибора, уменьшить шум датчиков примерно на порядок и довести его до 10 нм/с пик-пик.

3) Создание механизма для введения обратной связи двумя способами: электромеханическим и с использованием магнитогидродинамического эффекта. На данном этапе изучения более перспективен второй способ. Если удастся создать не очень энергоемкое устройство, использующее этот эффект, оно позволит охватить весь сейсмический канал глубокой отрицательной обратной связью, что существенно улучшит его амплитудные и частотные свойства, а также даст возможность проводить калибровку прибора косвенным методом на месте регистрации с помощью электронного генератора.

9. Выводы

1. Разработаны молекулярно-электронный датчик и схема усилительного тракта для вертикального и горизонтального каналов, на основе которого создан велосиметр типа РМД-2023 с чувствительностью 50–60 нм/с в диапазоне частот 0.033–25 Гц, динамическим диапазоном около 110 дБ, функционирующий при температуре внешней среды $+5^{\circ}\text{C}$... $+35^{\circ}\text{C}$.

2. Для исследования параметров велосиметра совместными усилиями трех участвующих в проекте организаций разработана универсальная калибрующая платформа, которая позволяет исследовать характеристики как вертикальных, так и горизонтальных сейсмодатчиков.

3. Исследования велосиметра на калибрующей установке подтвердили расчетные характеристики прибора.

4. В результате проведенных полевых испытаний в обсерватории Колумбийского университета в г. Ла-монт установлено, что технические характеристики велосиметра РМД-2023 позволяют его использовать на региональных сейсмических станциях.

5. Дальнейшее улучшение характеристик прибора необходимо вести по следующим основным направлениям:

- а) расширение рабочего диапазона температур до $-15^{\circ}\dots+55^{\circ}\text{C}$;
- б) снижение порога чувствительности каналов до 10 нм/с пик-пик;
- в) улучшение функциональных возможностей прибора за счет разработки механизма для введения обратной связи, охватывающей весь сейсмический тракт.

Литература

- Бабанин А.В., Козлов В.А., Петькин Н.В. Нестационарная диффузия в электрохимической системе с периодической структурой электродов // *Электрохимия*. 1990. Т.26, № 5. С.601-606.
- Козлов В.А., Сахаров К.А. Собственные шумы молекулярно-электронных преобразователей диффузионного типа // *Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации*. М.: МФТИ, 1994. С.37-42.
- Козлов В.А., Тугаев П.А. Влияние геометрии электрохимической ячейки на частотную зависимость ее неравновесного импеданса и тока в условиях конвективной диффузии // *Электрохимия*. 1996. Т.32, № 12. С.1436-1443.
- Козлов В.А., Коршак С.А., Петькин Н.В. Теория диффузионных преобразователей сверхмалых расходов электролита // *Электрохимия*. 1991. Т.27, № 4. С.20-24.
- Abramovich I.A., Agafonov V.M., Daragan S.K., Kazak B.N. Wide-band motion sensor calibrator // *Seismol. Res. Lett.* 1996. Vol. 67, № 4.
- Abramovich I.A., Agafonov V.M., Daragan S.K., Kozlov V.A. The latest advances in the development of wide-band molecular electronic seismometers // *Eastern Section of SSA meeting at La-mont-Doherty Earth Observatory of Columbia University*. 1995. P.4.
- Abramovich I.A., Agafonov V.M., Kazak B.N., Kozlov V.A. Rocking platform for wide-band calibration of motion sensors // *Eastern Section of SSA meeting at La-mont-Doherty Earth Observatory of Columbia University*. 1995. P.2.
- Abramovich I.A., Daragan S.K., Kozlov V.A. et al. Molecular electronic seismometers // *Supplement to EOS*. 1993. Spring Meeting. Baltimore, MD. P.206.