

УДК 550.8.08, 550.84.08, 531.767, 531.768

Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью

© 2013 г. В.М. Агафонов¹, И.В. Егоров², А.С. Шабалина³

¹ *Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Россия*

² *ООО "МИКРОАКС", г. Долгопрудный, Московская область, Россия*

³ *ООО "Р-сенсор", г. Долгопрудный, Московская область, Россия*

Представлены результаты исследования выходных параметров сейсмических малогабаритных датчиков движения на основе молекулярной электроники. Особенностью приборов является использование молекулярно-электронного преобразователя в сочетании с отрицательной обратной связью, с помощью которой удается значительно улучшить потребительские качества, в частности расширить частотный диапазон, снизить неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), уменьшить коэффициент нелинейных искажений (КНИ). Показан принцип работы приборов. Экспериментально получены основные характеристики, такие как АЧХ, КНИ, уровень собственных шумов и описаны методы их получения. Проведен анализ полученных данных и сравнение их с зарубежными аналогами. Указаны основные направления дальнейших исследований для улучшения не только технических характеристик, но и для создания технологии многосерийного производства.

Ключевые слова: молекулярная электроника, отрицательная обратная связь, сейсмический датчик (геофон), акселерометр.

PACS: 06.03.Gv; 07.07 Df

Введение

Традиционный сейсмический датчик представляет собой катушку, закрепленную на упругом подвесе и помещенную в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, неподвижно закрепленным на корпусе устройства. Внешнее механическое воздействие создает силы инерции, приводящие к перемещению катушки в магнитном поле. В результате эффекта электромагнитной индукции на выводах катушки создается разность потенциалов – выходной сигнал. Несмотря на внешнюю простоту устройства, с его помощью удается достичь высоких технических параметров, удовлетворяющих современным требованиям для многих применений. За десятилетия, прошедшие с момента создания первых подобных датчиков, технология их производства достигла высокой степени совершенства в части снижения цены, повышения надежности, достижения высокой стабильности и повторяемости параметров. Производством геофонов в мире занимаются десятки компаний и для многих массовых применений приборы такого типа стали общепринятым индустриальным стандартом.

В то же самое время уже в самом физическом принципе работы геофона заложен ряд ограничений на достижимые выходные параметры. В-первых, рабочая полоса геофона со стороны низких частот ограничена собственной частотой колебаний инерциальной массы на упругом подвесе. Наиболее распространенные геофоны имеют полосу, начинающуюся с 10 Гц. Для ее расширения в сторону низких частот приходится использовать большую инерциальную массу и более мягкий подвес, что увеличивает габариты, массу и вероятность поломки при транспортировке. При этом резко возрастают

требования к точности изготовления элементов электромеханической системы и, как следствие, низкочастотные геофоны имеют более высокую цену. Во-вторых, чувствительность геофонов не очень высока (обычно от 20 до 30 В/м/с), что затрудняет регистрацию слабых сигналов. До некоторой степени проблему решает группирование, широко применяемое, в частности, в сейсморазведке. Одновременно с увеличением чувствительности, за счет усреднения сигналов по группе, снижаются шумы измерений. Надо, однако, иметь в виду, что использование группы датчиков повышает стоимость измерительного канала, а по мере распространения высокоплотных расстановок [Heath, 2008a] теряет свою актуальность с точки зрения фильтрации шумов, поскольку тот же результат достигается на этапе обработки данных [Heath, 2008b]. В-третьих, геофоны требуют известной аккуратности при установке и полностью теряют работоспособность при больших углах наклона. Указанное обстоятельство имеет особенно важное значение для подводных применений. Наконец, идентичность, линейность и динамический диапазон даже самых высокоточных геофонов постепенно перестают отвечать все возрастающим требованиям современных высокоточных сейсмических измерений.

Указанные обстоятельства стимулируют разработку новых сейсмодатчиков, которые в перспективе могли бы заменить традиционные геофоны. Наиболее известны усиления, связанные с применением технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС).

По сравнению с геофонами сейсмодатчики, выполненные по технологии МЭМС, обеспечивают более широкую полосу регистрируемого сигнала, высокую линейность измерений, нечувствительность к наклонам при установке, высокую идентичность [Homeijer et al., 2011]. Как правило, такого рода датчики объединяются в одном устройстве с цифровым каналом регистрации, формируя, таким образом, готовый канал для цифровых сейсмических измерений. В то же время датчики на основе технологии МЭМС пока не достигли степени распространения, сопоставимой с геофонами, прежде всего, из-за более высокой цены и повышенного уровня собственных шумов. Надо также отметить, что создание производства сейсмодатчиков по технологии МЭМС требует использования очень дорогостоящего технологического оборудования, что под силу только очень крупным компаниям. Одну из наиболее перспективных разработок в этой области ведут совместно такие индустриальные гиганты, как Shell и Hewlett-Packard [Homeijer et al., 2011].

Удачной альтернативой традиционным геофонам и сейсмическим МЭМС могут оказаться компактные датчики, основанные на принципах молекулярно-электронного переноса (МЭП) [Абрамович и др., 1999; Агафонов и др., 2010]. К основным достоинствам таких измерителей относятся крайне высокий коэффициент преобразования механического движения в электрический сигнал, возможность значительного (по сравнению с геофоном) расширения частотного диапазона как в сторону низких, так и высоких частот, простота и надежность конструкции. До последнего времени приборы такого типа использовались почти исключительно для измерений в низкочастотной области, однако прогресс, достигнутый в последние годы, позволил создать устройства с верхней граничной частотой, перекрывающей значения, типичные для большинства геофонов.

Опыт, накопленный при разработке подобных датчиков, свидетельствует, что оптимальные рабочие характеристики достигаются при использовании датчиков на основе МЭП в сочетании с механизмом, обеспечивающим формирование электродинамической отрицательной обратной связи. Настоящая работа содержит описание принципов работы малогабаритного сейсмодатчика, основанного на принципах МЭП, охваченного отрицательной обратной связью, а также результаты экспериментальных исследований его рабочих характеристик.

Принципы работы сейсмодатчика на основе МЭП с отрицательной обратной связью

Чувствительный элемент сейсмодатчика, принцип работы которого основан на явлении молекулярно-электронного переноса, – твердотельные электродные структуры, заполненные проводящей рабочей жидкостью. Обычно используется раствор с высокой концентрацией фонового, не участвующего в электродных реакциях, электролита с небольшой добавкой активного компонента, ответственного за перенос заряда через границу раздела жидкость – металл электрода. Известно, что, в этом случае протекающий в системе ток определяется диффузионным и конвективным переносом активного компонента. Роль фонового электролита сводится при этом к экранированию электрического поля в жидкости и, тем самым, к подавлению миграционного переноса зарядов.

Работа чувствительного элемента основана на том, что скорость электрохимической реакции на электродах значительно больше скорости доставки к ним реагирующих веществ. В этом случае электродные реакции приводят к появлению градиента концентрации реагирующих веществ, и заряд в неподвижном электролите переносится с помощью молекулярной диффузии от одного электрода к другому. Если жидкость приходит в движение, то наряду с диффузией возникает конвективный перенос ионов, что резко изменяет скорость доставки реагирующих веществ к электродам и, соответственно, ток, протекающий через электроды чувствительного элемента.

В настоящее время наиболее широкое применение получили йод-йодидные системы с платиновыми электродами. Электролит такой системы состоит из высококонцентрированного водного раствора йодида калия KI (нижняя граница температурного диапазона –15 °С) или йодида лития LiI (нижняя граница температурного диапазона – 55 °С) и небольшого количества молекулярного йода I₂. Йод при избытке йодида переходит в хорошо растворимое комплексное соединение – три-йодид – по схеме



При прохождении тока через МЭП на электродах происходят следующие электрохимические реакции:

восстановление йода на катоде:



окисление йода на аноде:



Ионы K или Li не принимают участия в реакциях.

При увеличении межэлектродной разности потенциалов интенсивность электрохимических реакций постепенно нарастает, пока не возникает ситуация, когда все ионы три-йодида, достигшие электрода, мгновенно вступают в электрохимическую реакцию. При этом реализуется режим тока насыщения, дальнейшее увеличение разности потенциалов не изменяет его величины. В этом режиме ток ограничивается объемной скоростью доставки активного компонента к электродам. В неподвижном электролите скорость доставки определяет диффузия ионов. При движении раствора появляется дополнительный, конвективный механизм, который существенно изменяет ток насыщения, что иллюстрируют ВАХ электродной системы в неподвижном и движущемся электролите, показанные на рис. 1. В общем случае характерной особенностью процесса является высокий коэффициент преобразования, что выражается в сильном электрическом отклике, значительно превышающем шумы сопутствующих электронных приборов (даже при низких уровнях входного механического воздействия). В конечном счете, обеспечивается высокое отношение сигнал/шум для всего измерительного тракта.

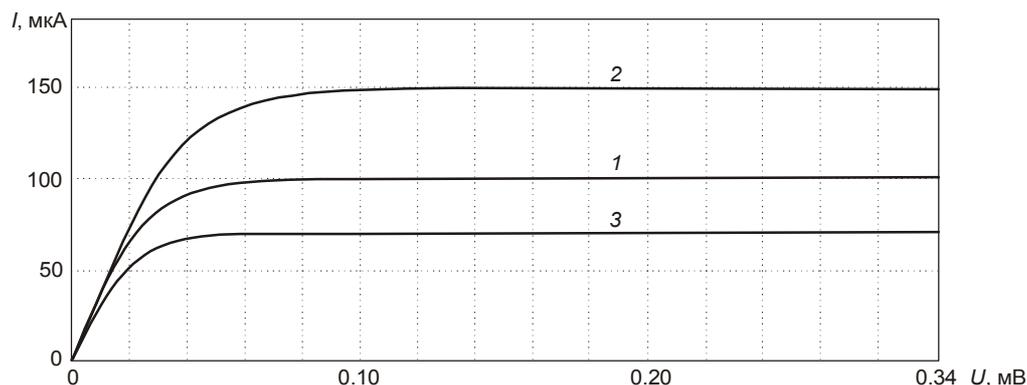


Рис. 1. Вольтамперная характеристика (ВАХ) преобразующей электродной системы в неподвижном (1), движущемся от анода к катоду (2) и в противоположном направлении (3) электролите

Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования выявили существенную зависимость выходных параметров устройства от геометрии преобразующей системы и широкие возможности оптимизации отклика преобразующей системы в зависимости от решаемых задач. В частности, установлено [Агафонов, Криштон, 2004; Агафонов и др., 2009], что уменьшение характерных размеров элементов электродной преобразующей структуры существенно повышает чувствительность, расширяет частотный диапазон регистрируемых сигналов, улучшает линейность, а также подавляет собственный шум, связанный с естественной конвекцией электролита. Именно в использовании мелкомасштабных преобразующих структур и содержится основное отличие современных молекулярно-электронных датчиков от более ранних хемотронных преобразователей, несмотря на близость физических принципов [Larcam, 1965; Графов и др., 1969; Лидоренко, 1984].

В настоящее время организовано мелкосерийное производство преобразующих элементов на основе электродного узла, выполненного на базе микрокерамических технологий. При изготовлении сейсмического датчика чувствительный электродный узел, содержащий микроканалы для перетока жидкости, помещается поперек диэлектрического канала, ограниченного с обеих сторон гибкими мембранами, и заполненного рабочей жидкостью. Внешний вид датчика и основных элементов его конструкции показан на рис. 2. Такая конструкция датчика обеспечивает перетекание рабочей жидкости через преобразующий элемент и, соответственно, вариации выходного тока, под действием

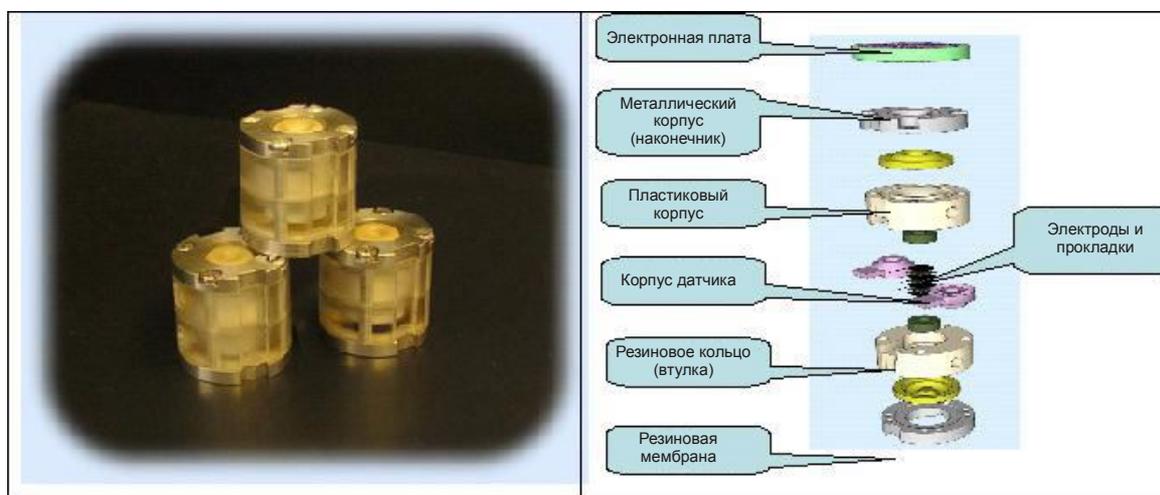


Рис. 2. Серийно выпускаемый молекулярно-электронный сейсмодатчик с преобразующей ячейкой сеточного типа

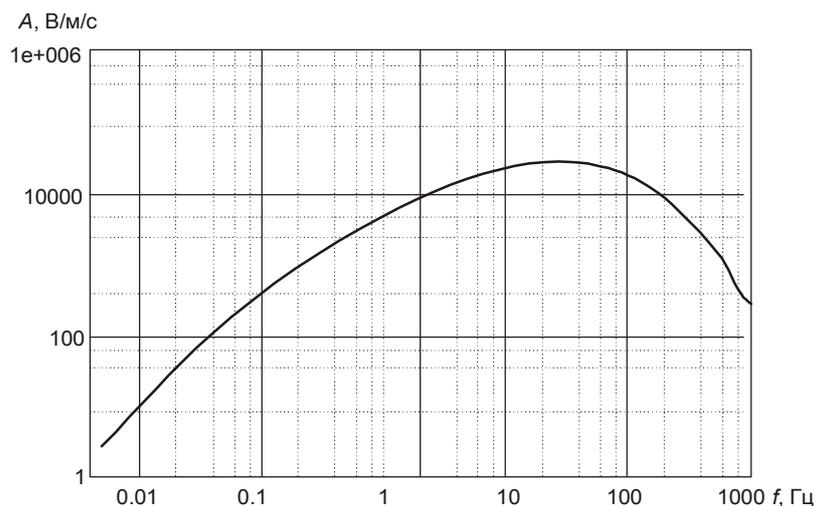


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика чувствительного элемента сейсмодатчика с преобразующей ячейкой сеточного типа

переменных сил инерции, вызванных внешним механическим сигналом, направленным вдоль оси канала. Поскольку окончательный выходной сигнал формируется с использованием контура обратной связи, параметры преобразователя оптимизируются с точки зрения достижения максимальной чувствительности и минимального уровня собственных шумов, при этом совершенно не обязательно иметь плоскую амплитудно-частотную характеристику до включения датчика в контур обратной связи. Типичный вид АЧХ для серийно выпускаемого преобразователя приведен на рис. 3.

Принцип работы устройства, содержащего отрицательную обратную связь, иллюстрирует рис. 4.

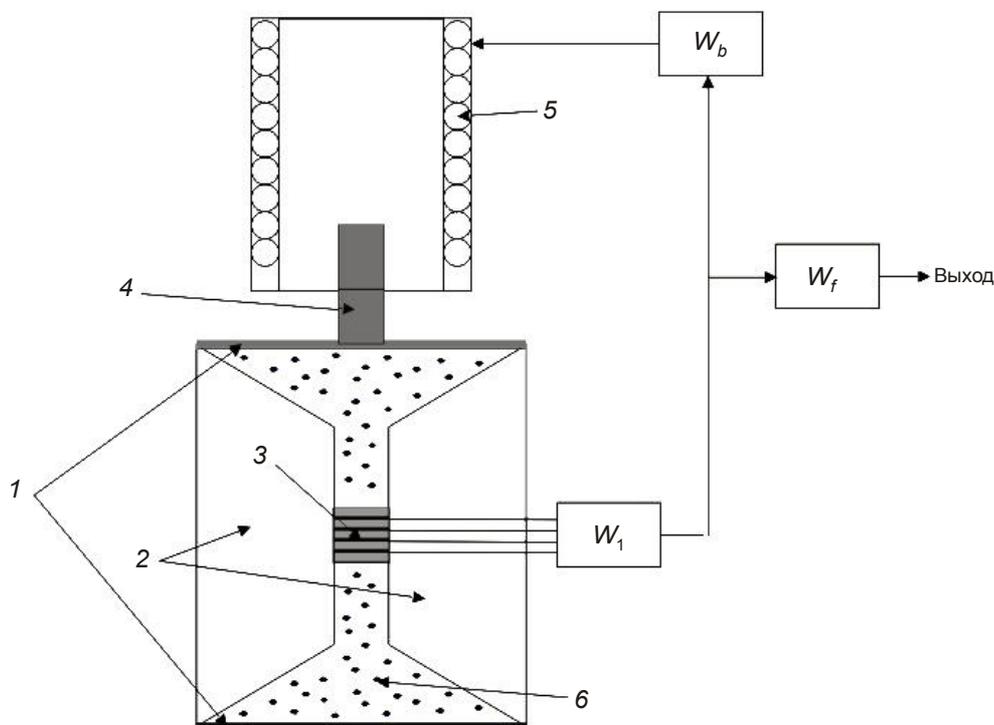


Рис. 4. Принципиальное устройство сейсмодатчика на основе МЭП с глубокой отрицательной обратной связью

1 – упругие мембраны; 2 – корпус датчика; 3 – преобразующий элемент на основе МЭП; 4 – постоянный магнит; 5 – катушка обратной связи

Сигнал на выходе чувствительного элемента 3 преобразуется в электронике прямой W_{ff} и обратной W_{fb} цепей и подается в виде электрического тока в катушку обратной связи 5. В свою очередь, электрический ток в катушке, взаимодействуя с магнитом 4, закрепленным на мембране 1, создает противосилу, компенсирующую силы инерции, развиваемые под действием внешнего механического сигнала. Окончательно выходной сигнал формируется фильтром W_f , настроенным на необходимую рабочую полосу. Частотная характеристика прибора может быть представлена в виде

$$W = \frac{W_s W_{ff}}{1 + W_s W_{ff} W_{fb}} W_f, \quad (4)$$

где W_s – передаточная функция чувствительного элемента.

В предположении большой глубины обратной связи ($W_s W_{ff} W_{fb} \gg 1$) последнее выражение принимает вид

$$W = \frac{W_f}{W_{fb}}. \quad (5)$$

В зависимости от способа формирования сигнала обратной связи (вида передаточной функции W_{fb}) можно получить выход, пропорциональный скорости либо ускорению. В настоящей работе исследовались характеристики сейсмодатчиков обоих видов.

Экспериментальное исследование выходных характеристик сейсмодатчика

Исследование АЧХ

Получить АЧХ прибора с отрицательной обратной связью можно несколькими способами: на экспериментальных вибростендах, с помощью катушки каскада обратной связи и с помощью внешней катушки, установленной таким образом, чтобы обеспечить ее взаимодействие с постоянным магнитом (см. рис. 4), входящим в состав механизма обратной связи. Первый способ прямой, так как задается сигнал, который действует непосредственно на прибор. При таком способе необходимо иметь референсный (эталонный) датчик движения. Им может быть, например, датчик смещения или акселерометр. Также необходимо, чтобы эталонный прибор имел известные характеристики в необходимом диапазоне частот, а вибростенд воспроизводил сигнал с характеристиками не хуже, чем эталон. Два остальных способа косвенные, так как в обоих случаях жидкость двигается за счет взаимодействия тока в катушке, создаваемого с помощью генератора, с магнитом на мембране.

Несмотря на близость указанных способов, основанных на использовании катушки, в которой возбуждается сигнал, и магнита, закрепленного на мембране, между ними имеется одно существенное отличие. Дело в том, что при использовании катушки каскада обратной связи сигнал, подаваемый с генератора, проходит через тот же каскад электроники обратной связи, что и сигнал с преобразующего элемента. В результате ток в катушке оказывается суммой тока, задаваемого генератором и тока сигнала обратной связи. Фактически это означает, что электроника обратной связи работает в несколько ином режиме, чем при реальном механическом воздействии той же амплитуды. В этом случае в качестве эталона используется сигнал, вырабатываемый генератором.

Проведенные исследования показали, что при использовании в каскада обратной связи компонент, имеющих стабильные характеристики в широком амплитудном диапазоне прикладываемых напряжений, несмотря на различие режимов работы электронной части прибора, метод достаточно точный для определения АЧХ прибора. При ис-

пользовании внешней катушки на нее подается сигнал с генератора через электронную схему, не связанную с электроникой самого прибора, а в качестве эталона используется напряжение, приложенное к выводам катушки. Таким образом, режим работы электроники датчика полностью соответствует условиям реального механического воздействия, некоторая сложность заключается в том, чтобы учесть влияние взаимной индукции катушек. Прямые измерения показали, что вклад взаимной индукции незначителен, и им можно пренебречь. В частности, при амплитуде сигнала на внешней катушке 10 мВ за счет взаимной индукции на катушке обратной связи создается напряжение, не превышающее 0.5 мВ. При этом сигнал, который возникает за счет механического возбуждения, в той же самой точке превышает 10 В.

Важно подчеркнуть, что при возбуждении калибровочных сигналов с использованием катушки точность измерений зависит от характеристик генератора, катушки и параметров электроники, с помощью которой сигнал с генератора подается на катушку. При этом отсутствует влияние, иногда достаточно сложное, механической системы калибратора, что представляет собой безусловное преимущество, поскольку уменьшается погрешность измерений. С другой стороны, к недостаткам таких методов, помимо принципиально косвенного характера измерений, относится сложность в определении точного коэффициента взаимодействия между катушкой и магнитом, что влечет за собой возможность определения АЧХ только с точностью до постоянного, но неизвестного коэффициента. В настоящей работе были применены как прямые методы с использованием вибростенда, так и косвенные, основанные на использовании катушек возбуждения.

Для определения АЧХ с помощью вибростенда использовалось оборудование ФГУП «НИИФТРИ», в частности поверочная виброустановка типа ВУ-2 с частотным диапазоном 0.1–400 Гц и анализатор сигналов узкополосный АС-У16. При использовании в качестве генератора внешних сигналов катушки применялось устройство сбора данных USB-6211 фирмы National Instruments, совмещенное с ЦАП, а на ПК осуществлялся спектральный анализ данных.

На рис. 5, 6 приведены АЧХ сейсмометра и акселерометра, полученные разными способами. Видно, что методы показывают одни и те же результаты, совпадающие

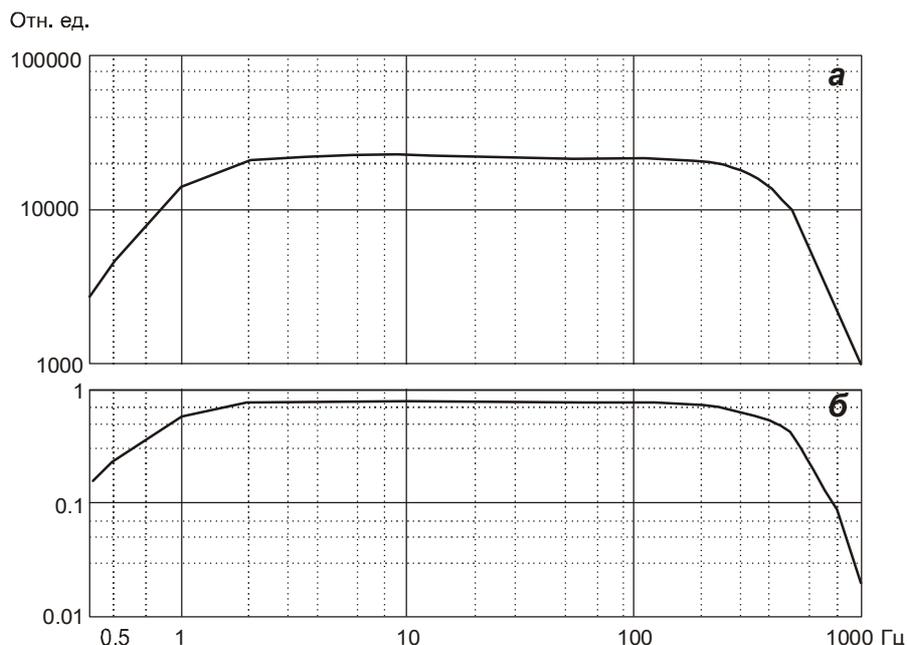


Рис. 5. АЧХ акселерометра, полученные с использованием внешней катушки (а) и катушки каскада обратной связи (б)

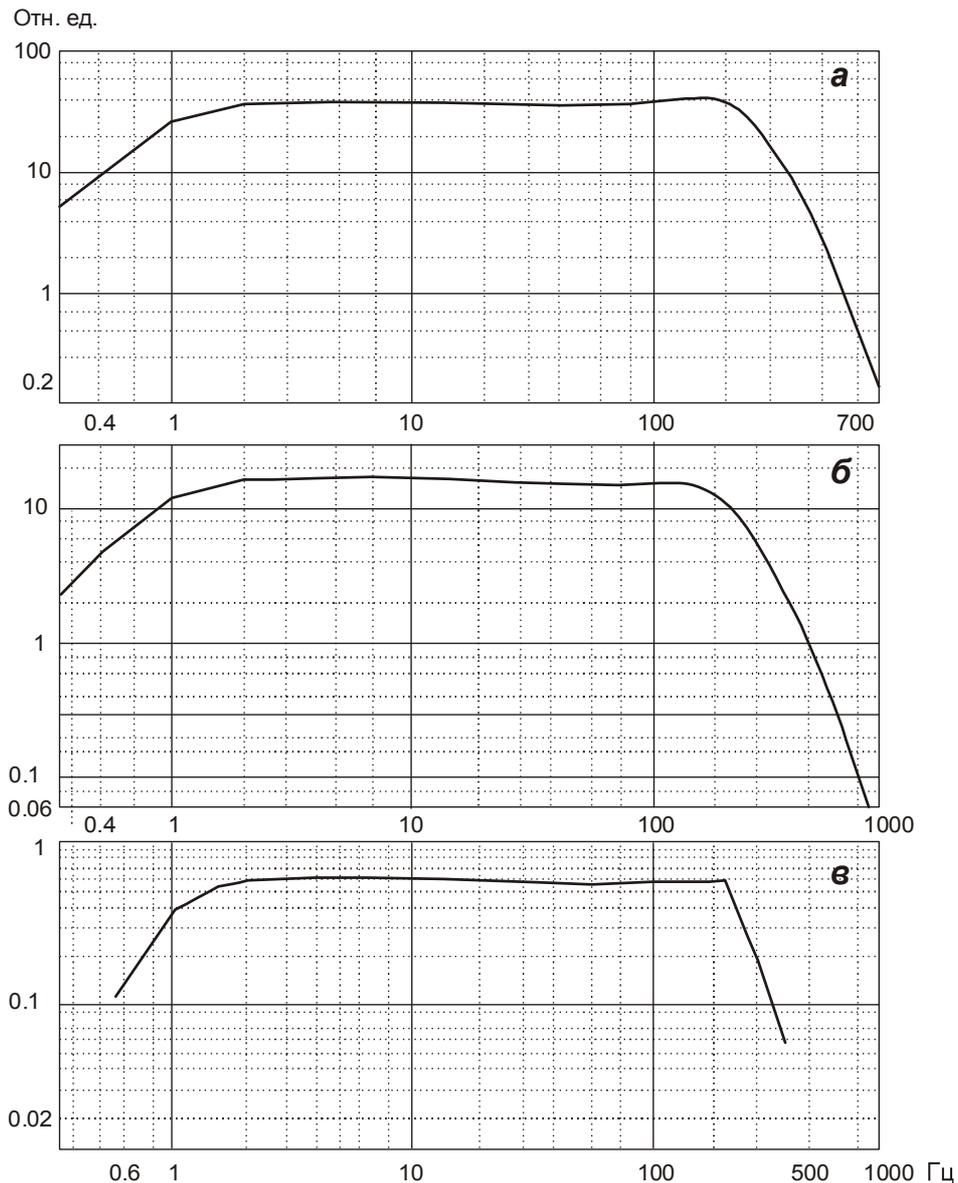


Рис. 6. АЧХ акселерометра, полученная: *а, б* – методом, использующим внешнюю катушку (*а*), катушку каскада обратной связи (*б*), *в* – на виброустановке

с точностью до константы. АЧХ сейсмометра имеет частотный диапазон 1–400 Гц по уровню 3 дБ, при этом неравномерность характеристики в диапазоне 3–150 Гц не превышает 6%, а чувствительность составляет 290 В/м/с.

Для акселерометра получены следующие значения: частотный диапазон 1–250 Гц по уровню 3 дБ, неравномерность в диапазоне 2–200 Гц не превышает 10%, чувствительность составляет 0.61 В/м/с².

Исследование собственных шумов

При определении собственных шумов приборов использовался метод корреляции сигналов. Для этого два идентичных прибора ставили в одинаковые внешние условия: размещали как можно ближе друг к другу на твердом консолидированном основании в тихом месте с одной ориентацией.

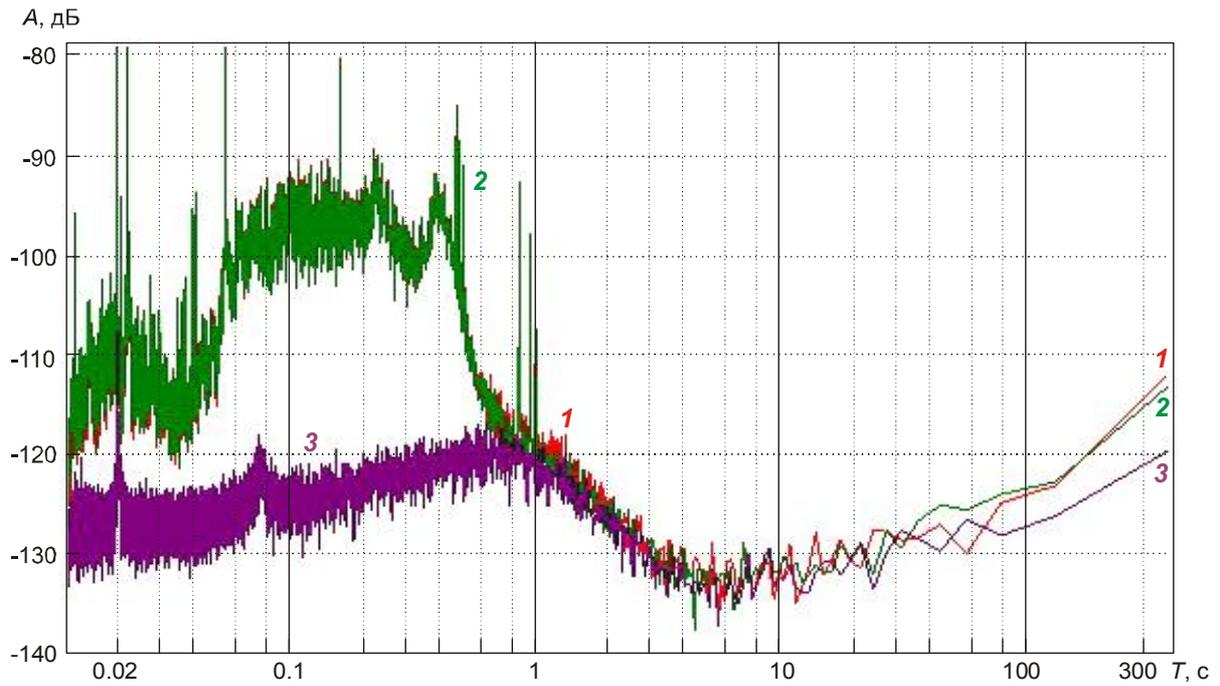


Рис. 7. Спектральные плотности шумов двух акселерометров (1, 2) и некоррелированного сигнала (3)

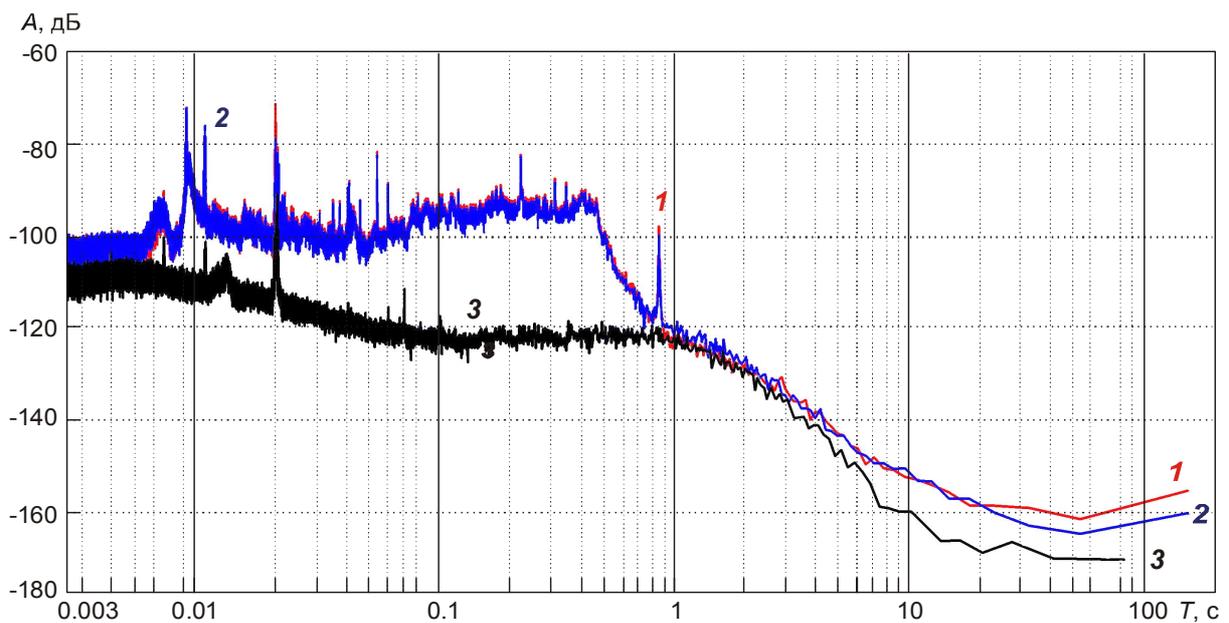


Рис. 8. Спектральные плотности шумов двух сейсмометров (1, 2) и некоррелированного сигнала (3)

Далее производилась запись сигналов достаточной длительности с обоих датчиков. Тогда, если $U_1(\omega), U_2(\omega)$ – спектры сигналов регистрируемых датчиками, а $U(\omega)$ – спектр внешнего возмущающего сигнала, то для двух приборов можно записать

$$\begin{cases} U_1(\omega) = W_1(\omega)U(\omega) + N_1(\omega) \\ U_2(\omega) = W_2(\omega)U(\omega) + N_2(\omega) \end{cases} \quad (6)$$

где $W_1(\omega), W_2(\omega)$ – передаточные функции приборов; $N_1(\omega), N_2(\omega)$ – шумы каждого прибора.

Основываясь на (6), можно записать следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} |U_1(\omega)|^2 = |W_1(\omega)|^2 |U(\omega)|^2 + W_1(\omega)U(\omega)N_1^*(\omega) + W_1^*(\omega)U^*(\omega)N_1(\omega) + |N_1(\omega)|^2 \\ |U_2(\omega)|^2 = |W_2(\omega)|^2 |U(\omega)|^2 + W_2(\omega)U(\omega)N_2^*(\omega) + W_2^*(\omega)U^*(\omega)N_2(\omega) + |N_2(\omega)|^2 \\ U_1(\omega)U_2^*(\omega) = W_1(\omega)W_2^*(\omega)|U(\omega)|^2 + W_1(\omega)U(\omega)N_2^*(\omega) + W_2^*(\omega)U^*(\omega)N_1(\omega) + \\ + N_1(\omega)N_2^*(\omega) \\ U_1^*(\omega)U_2(\omega) = W_1^*(\omega)W_2(\omega)|U(\omega)|^2 + W_1^*(\omega)U^*(\omega)N_2(\omega) + W_2(\omega)U(\omega)N_1^*(\omega) + \\ + N_1^*(\omega)N_2(\omega) \end{cases} \quad (7)$$

Если ввести обозначения $N_1(\omega) = W_1(\omega)U_{N_1}(\omega)$, $N_2(\omega) = W_2(\omega)U_{N_2}(\omega)$ и провести усреднение по времени с учетом того, что шумы приборов некоррелированы ни с сигналом, ни между собой, а в итоге и равны ($U_{N_1}(\omega) = U_{N_2}(\omega)$) для обоих приборов, то после несложных преобразований получаем формулу для определения собственного шума каждого прибора

$$\langle |U_N(\omega)|^2 \rangle = \frac{\sqrt{\langle |U_1(\omega)|^2 \rangle \langle |U_2(\omega)|^2 \rangle}}{|W_1(\omega)||W_2(\omega)|} \left(1 - \sqrt{\frac{\langle U_1^*(\omega)U_2(\omega) \rangle \langle U_1(\omega)U_2^*(\omega) \rangle}{\langle |U_1(\omega)|^2 \rangle \langle |U_2(\omega)|^2 \rangle}} \right). \quad (8)$$

Данный метод реализован в программной среде Dadisp. Результаты представлены на рис. 7, 8 в виде зависимости спектральной плотности некоррелированного сигнала (шумов), приведенного к $1 \frac{\text{м/с}^2}{\sqrt{\text{Гц}}}$ в дБ от частоты.

Исследование линейности преобразования сигнала

Исследование линейности преобразования сигнала можно проводить теми же несколькими способами, которые применялись для получения АЧХ. Но использовании метода с катушкой каскада обратной связи сильное влияние оказывает тот факт, что в каскаде электроники обратной связи сигнал с преобразующего элемента вычитается из калибрующего сигнала с генератора, тем самым заведомо улучшается линейность преобразования сигнала, по крайней мере, в каскаде электроники обратной связи. Поэтому данный метод не использовался при определении коэффициента нелинейных искажений (КНИ) образцов. Для получения КНИ приборов с помощью виброустановки необходимо, чтобы ее линейность на частоте измерений, так же как и линейность эталонного датчика, превосходила характеристики исследуемого образца. Те же требования предъявляются к генератору и системе регистрации в методе, использующем внешнюю катушку.

Измерения производились с использованием спектрального анализа сигналов образца и эталона. Для этого делалась запись сигналов требуемой амплитуды при достаточно длинном временном интервале. Далее интервал делился на несколько отрезков, для каждого из которых производился расчет для КНИ по формуле

$$D = \frac{\sqrt{\sum A_j^2}}{A_1}, \quad (9)$$

где A_1 и A_j – амплитуда первой и высших гармоник соответственно. Расчет производился для трех гармоник, так как более высокие гармоники не превосходили уровень шумов, что при учете давало бы большую случайную составляющую и не представляло объективной картины. В итоге для каждой амплитуды внешнего воздействия было получено среднее значение КНИ и его дисперсия.

В табл. 1 приведены результаты расчета КНИ сейсмометра в зависимости от амплитуды входного сигнала на частоте воздействия 10 Гц с помощью внешней катушки, при этом КНИ эталона составлял $0.060 \pm 0.015\%$ во всем диапазоне амплитуд.

Таблица 1. КНИ сейсмометра

Эквивалентная амплитуда внешнего воздействия, мм/с	Амплитуда первой гармоники, отсчеты	Амплитуда второй гармоники, отсчеты	Амплитуда третьей гармоники, отсчеты	КНИ образца, %
1	$2.75 \cdot 10^5 \pm 238$	284 ± 224	112 ± 73	0.114 ± 0.081
3	$8.45 \cdot 10^5 \pm 337$	557 ± 244	260 ± 80	0.074 ± 0.026
4.5	$12.65 \cdot 10^5 \pm 696$	751 ± 266	415 ± 118	0.069 ± 0.019
9	$25.19 \cdot 10^5 \pm 3072$	1439 ± 509	3497 ± 550	0.152 ± 0.019
18	$49.34 \cdot 10^5 \pm 11250$	3506 ± 1643	31310 ± 1003	0.640 ± 0.020

В табл. 2 приведены значения КНИ акселерометра в зависимости от амплитуды входного сигнала на частоте воздействия 10 Гц с помощью внешней катушки. При этом КНИ, полученный на виброустановке на амплитуде 9 мм/с и частоте 12 Гц, составляет 0.129% при КНИ эталонного акселерометра 0.054%, что хорошо согласуется с результатом, приведенным в таблице.

Таблица 2. КНИ акселерометра

Амплитуда внешнего воздействия, м/с ² (мм/с)	Амплитуда первой гармоники, отсчеты	Амплитуда второй гармоники, отсчеты	Амплитуда третьей гармоники, отсчеты	КНИ образца, %
0.28 (4.5)	$1.80 \cdot 10^5 \pm 27$	31 ± 7	27 ± 4	0.023 ± 0.003
0.57 (9)	$3.60 \cdot 10^5 \pm 16$	121 ± 4	101 ± 6	0.043 ± 0.001
0.85 (13.5)	$5.4 \cdot 10^5 \pm 52$	271 ± 5	55 ± 4	0.051 ± 0.001
1.14 (18)	$7.49 \cdot 10^5 \pm 85$	544 ± 13	116 ± 4	0.074 ± 0.002
1.70 (27)	$11.37 \cdot 10^5 \pm 123$	1569 ± 9	388 ± 6	0.142 ± 0.001
2.54 (40.5)	$16.54 \cdot 10^5 \pm 143$	4297 ± 28	576 ± 10	0.262 ± 0.002

Из табл. 1 и 2 видно, что при малых сигналах КНИ сравнимы с КНИ эталона или превосходят их, но имеют при этом большую случайную составляющую. Это свидетельствует о том, что для этих амплитуд КНИ образцов меньше, чем КНИ эталона.

Заключение

Эксперименты показали, что приборы, созданные на основе молекулярно-электронного преобразователя, вполне успешно конкурируют с зарубежными аналогами, даже превосходят их по некоторым параметрам, не только техническим, но и экономическим. В табл. 3, 4 приведено сравнение параметров молекулярно-электронных велосиметров и акселерометров с аналогами ведущих зарубежных производителей.

В настоящее время продолжают активные исследования и разработка новых технологий по созданию чувствительного элемента, от конфигурации которого, как отмечалось выше, зависят такие параметры, как линейность, уровень шумов и частотный диапазон. Использование в качестве инерциальной массы жидкости избавляет конструкцию приборов от подвижных деталей, что облегчает такие разработки и сводит их к применению поверхностных микротехнологий, таких как напыление тонких структур и обработка их с высокой точностью, что сейчас доступно в сравнительно большом диапазоне.

Таблица 3. Сравнительные характеристики зарубежных и отечественных велосиметров

Параметр	GS-11D (OYO Geospace)	L28LB (Sercel)	Молекулярно-электронный сейсмодатчик MTSS1001
Количество осей	1	1	1
Нижняя граничная частота, Гц	4.5, 8, 10, 14±0.75	4.5	1±0.05
Коэффициент преобразования, В/м/с	32 ±10%	31.3	290 ±3%
Коэффициент нелинейных искажений при сигнале 18 мм/с, измеряется на 12 Гц	<0.2% – для версий 8 Гц, 10 Гц, 14 Гц Не специфицирован – для версии 4.5 Гц	<0.2%	<0.15 %
Размер ЧЭ: высота, мм диаметр, мм	34 32	38 31	35 32
Требования к установке	Угол наклона < 30°	Не указано	Работоспособен в любой ориентации

Таблица 4. Сравнительные характеристики зарубежных и отечественных акселерометров

Параметр	SI-Flex SF3000L Colybris	Молекулярно-электронный акселерометр MTSS-1043A
Диапазон измеряемых сигналов, g	±3	±1.3
Коэффициент преобразования, В/g	1.2	6
Частотный диапазон, Гц	0–1000	1–250
Динамический диапазон (в полосе 100 Гц), дБ	120	128
Шум, нг/√Гц	300–500, на частоте 10 Гц	60, на частоте 10 Гц
Температурный диапазон, °С	–40 +85	–40 +75
Нелинейные искажения, %	±0.1	±0.1
Напряжение питания, В	6–15	6–15
Потребление, мА	< 30	< 35
Вес, г	450	300

Это позволит не только улучшить параметры приборов, но и обеспечить высокую повторяемость характеристик для всех приборов, что принципиально важно при серийном производстве. Другое направление исследований связано с усовершенствованием электронной части приборов.

Благодарности

Проект поддержан Российским фондом фундаментальных исследований (проекты № 11-07-00663-а, № 12-07-00704) и Минобрнауки в рамках ФЦП “Исследования

и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 гг.” (г/к № ГК16.513.11.3016).

Литература

- Абрамович И.А., Агафонов В.М., Дараган С.К., Козлов В.А., Харламов А.В.* Разработка сейсмодатчиков на новых технологических принципах (молекулярная электроника) // Сейсмические приборы. 1999. Вып. 31. С. 56–71.
- Агафонов В.М., Криштон В.Г.* Исследование АЧХ молекулярно-электронного преобразователя с новой геометрией // Микросистемная техника. 2004. № 9. С.40–45.
- Агафонов В.М., Бугаев А.С., Орел А.А.* Нелинейные эффекты в молекулярно-электронной ячейке с планарной геометрией // Нано и микросистемная техника. 2009. № 5. С. 32–38.
- Агафонов В.М., Егоров Е.В., Зайцев Д.Л.* Молекулярно-электронные измерители линейных ускорений: Предварительные результаты исследований // Гироскопия и навигация. 2010. № 1. С.72–80.
- Добрынин Е., Луковцев П. (ред.).* Электрохимические преобразователи первичной информации. М.: Машиностроение, 1969. 196 с.
- Лидоренко Н.С. (ред.)* Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
- Heath R.G.* Land Seismic: the move towards the mega-channel // First Break. 2008a. V. 26. P.53–58.
- Heath R.G.* Trends in land seismic instrumentation // The Leading Edge. 2008b. V. 27, N 7. P.872–877.
- Homeijer B., Lazaroff D., Milligan D., Alley R., Wu J., Szepesi M., Bicknell B., Zhang Z., Walmsley R.G., Hartwell P.G.* Hewlett Packard's seismic grade MEMS accelerometer // Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2011 IEEE 24th International Conference. Cancun, Mexico, January 23-27, 2011. P.385–388.
- Larcam C.W.* Theoretical Analysis of the Solion Polarized Cathode Acoustic Linear Transducer // J. Acoustical Soc. Amer. 1965. V. 37, N 4. P.644–678.

Сведения об авторах

АГАФОНОВ Вадим Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, доцент, Московский физико-технический институт. 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: (498)744-66-42. E-mail: agvadim@yandex.ru

ЕГОРОВ Иван Владимирович – ведущий специалист, ООО “МИКРОАКС”. 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 8А. Тел.: (499)503-73-97. E-mail: iegorov@mikroaks.com

ШАБАЛИНА Анна Сергеевна – инженер-электронщик, ООО “Р-сенсорс”. 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Жуковского, д. 8А. Тел.: (498)744-69-65. E-mail: btform@mail.ru

Operating principles and technical characteristics of portable molecular-electronic seismic sensor with negative feedback

V.M. Agafonov, I.V. Egorov, A.S. Shabalina

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia*

² *LLC “MICROAKS”, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

³ *LLC “R-sensors”, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia*

Abstract. Study results of the parameters of seismic portable movement sensors based on molecular electronic are presented. The principal feature of the device is using molecular-electronic transducer together with negative

feedback that makes it possible to considerably improve its consumer performance including frequency range, nonlinearity of frequency-response characteristic, coefficient of nonlinear distortion. The device operating principle is described. The sensor main characteristics including frequency-response characteristic, coefficient of nonlinear distortion, and inherent noise level are experimentally studied, the measurement techniques are described in details.

We analyzed the data obtained and compare them with foreign analogs. The principal directions of future studies aimed at improving technical characteristics and development of technology for the device mass production are proposed.

Keywords: molecular electronics, negative feedback, seismic sensor, geophone, accelerometer.