

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННОГО ГИДРОФОНА

С.Ю. Авдюхина, В.М. Агафонов, канд. физ.-мат. наук, доцент, А.С. Бугаев, д.ф.-м.н. академик РАН, Е.В. Егоров, канд. физ.-мат. наук, Д.Л. Зайцев, канд. физ.-мат. наук, М.А. Рыжков
Московский физико-технический институт, Москва, Россия

DESIGN AND PRINCIPLES OF OPERATION FOR MOLECULAR ELECTRONIC HYDROPHONE

S.Y. Avdyukhina, V.M. Agafonov, Ph.D., A.S. Bugaev, Academician, E.V. Egorov, Ph.D., D.L. Zaitsev, Ph.D., M.A. Ryzhkov
Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

В работе представлены теоретические и экспериментальные данные о принципах работы низкочастотного электрохимического гидрофона, построенного на основе технологии молекулярно-электронного переноса. Приведены результаты исследования амплитудно-частотных и шумовых характеристик молекулярно-электродных гидрофонов. Продемонстрирована работа прототипа гидрофона с полосой пропускания 0.02-200 Гц и чувствительностью 1.5 мВ/Па. Показано, что собственный шум датчика может быть существенно ниже стандартной модели шумов Венца особенно в области сверхнизких частот.

The work presents theoretical and experimental analysis of the operation principles of a low-frequency electrochemical hydrophone constructed on the basis of molecular-electron transfer technology. The results of measurements of the amplitude-frequency and noise characteristics of molecular-electrode hydrophones are presented. The prototype of a MET hydrophone with a frequency bandwidth of 0.02-200 Hz and a sensitivity of 1.5 mV / Pa is demonstrated. It is shown that the intrinsic noise of the sensor can be substantially lower than the standard Wenz noise model, especially in the region of infra-low frequencies.

Введение

В условиях истощения залежей легкодоступных углеводородов перспективными направлениями поиска и добычи нефти является Арктический шельф и переходные от суши к морю зоны на всем побережье и в зонах широких рек. Для поиска нефти в таких условиях используются специальные датчики: гидрофоны, двойные датчики типа гидрофон/геофон, а также векторные акустические приемники. Известен целый ряд технологий для изготовления современных датчиков измеряющих вариации акустического давления, например, пьезоэлектрические, электрострикционные, магнитоэлектрические, электростатические и др., тем не менее все эти типы чувствительных элементов оказываются неэффективными и не всегда дают возможность добиваться желаемых результатов в полосе низких частот от долей герца до нескольких сотен герц. Независимо от технологии, использованной при создании гидрофонов, возможности измерения слабых сигналов с помощью гидрофонов ограничены уровнем регистрируемых помех, не относящихся к полезному сигналу и представляющих с точки зрения процессов измерения шум. В указанных обстоятельствах встает вопрос разработки датчиков давления на иных технологических принципах, способных удовлетворить возрастающим требованиям инженерных и научных задач.

Сравнительно новая и успешно зарекомендовавшая себя технология, основанная на принципах молекулярно-электронного переноса заряда (МЭП) в области сейсмологии и геофизических исследований [1,2], навигации и управления движением [3], сейсмостойком строительстве [4] и т.д., может быть применена и для разработки датчиков давления отличных от традиционных пьезокерамических, микромеханических и оптоволоконных технологий. Отличительными особенностями датчиков на основе МЭП являются исключительно высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов в области инфра низких частот.

В настоящей работе представлены результаты разработки широкополосного (0.02 – 200 Гц) молекулярно-электронного гидрофона с низким уровнем собственных шумов и высокой чувствительностью на уровне 1.5 мВ/Па. Как и все устройства на основе МЭП, молекулярно-электронный гидрофон работает по принципу возникновения сигнального тока при протекании жидкости через преобразующую электрохимическую ячейку. Кроме того, для достижения широкого динамического диапазона и высоких показателей стабильности характеристик в конструкцию гидрофона введена глубокая электродинамическая обратная связь.

Настоящая работа представляет результаты исследования двумя основными частями. В первой части описываются физические принципы работы и экспериментальная конструкция

разрабатываемого устройства. Во второй приводятся данные экспериментальных исследований мелководных (до 15 метров) прототипов устройства.

Принципы работы гидрофона на основе МЭП

Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП достаточно подробно изложены в следующих учебных [5], научно-популярных [6] и периодических [7] изданиях. Основу любого устройства, работающего по технологии МЭП составляет электрохимическая преобразующая ячейка Рисунок 1.

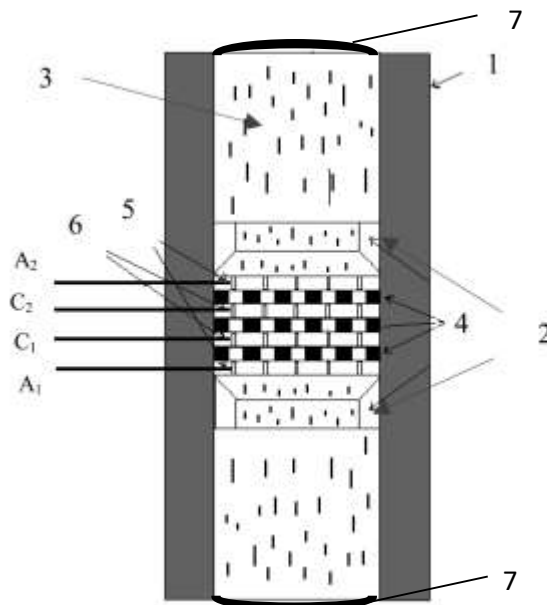


Рисунок 1. Устройство основного чувствительного элемента МЭП, электрохимической ячейки, на примере датчика линейных перемещений. 1 – стенки корпуса канала; 2 – резиновые уплотнители; 3 – электролит; 4 – пористые диэлектрические прокладки; 5 – внешние электроды (аноды, A1, A2); 6 – внутренние электроды (катоды C1, C2), 7 эластичные мембраны, ограничивающие канал.

Электрохимическая ячейка преобразует поток электролита, протекающий через нее благодаря силам инерции, или перепаду давления в сигнальный ток сенсора. Как правило практическая реализация устройств на основе МЭП использует в качестве рабочей жидкости высококонцентрированный водный раствор электролита на основе йодида калия KI или йодида лития LiI на пределе растворимости (~ 4 Моль/литр) с небольшой добавкой ($\sim 0,01 - 0,1$ Моль/литр) молекулярного йода I₂. В растворе происходит почти полная диссоциация KI на отрицательно заряженные ионы I⁻ и положительные ионы K⁺, а молекулярный йод вступает в реакцию с ионами I⁻, с образованием отрицательно заряженных ионов трийодида по схеме: $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$. Если, к помещенным в раствор электродам, приложена некоторая небольшая разность потенциалов ($< 0,9$ В), то на электродах протекают обратимые электрохимические реакции с переносом электронов через границу раздела - металл/раствор электролита: $I_3^- + 2e \rightarrow 3I^-$, причем на катодах идет реакция в прямом направлении, а на анодах - в обратном. При этом в системе устанавливается распределение концентрации активного компонента. В стационарном случае в отсутствии внешних сигналов ток, текущий через электроды, полностью определяется диффузионной составляющей. При наличии гидродинамических потоков к диффузионному добавляется конвективный перенос, что приводит, в зависимости от направления течения жидкости, к увеличению или уменьшению тока в системе. Вариации электрического тока, обусловленные возникающими гидродинамическими потоками, и являются выходным сигналом МЭП.

Конструкция гидрофона имеет сходство с датчиком линейных перемещений, схематично описанного выше, однако имеются и существенные отличия, которые позволяют использовать МЭП ячейку для измерения вариаций внешнего давления. Одна из мембран гидрофона открыта во внешнюю среду, вариации давления которой измеряются, аналогично Рисунку 1. При этом вторая мембрана герметично накрывается твердым колпаком, запирающим небольшой объем воздуха под крышкой. Последнее позволяет измерять вариации давления, так как в сосуде с воздухом при деформации второй мембраны меняется давление. Из уравнения состояния идеального газа, при постоянной

температуре и количестве газа, получим следующее соотношение для параметров заключенного между колпачком и мембраной газа:

$$p_0 V_0 = p(V_0 - s_M x) = \text{const} \quad (1)$$

где s_M – площадь мембран (обе мембраны имеют одинаковую площадь, x – смещение мембран. Рассмотрим поведение системы при подаче на первую мембрану гармонически изменяющегося давления малой амплитуды. Запишем уравнение для расхода жидкости через МЭП из закона Пуазейля:

$$q = s_M \dot{x} = \frac{p_1 - p_2 - \frac{M\ddot{x}}{s_{\text{эф}}}}{R_h} = \frac{p_0(1 + me^{i\omega t}) - \frac{p_0 V_0}{V_0 - s_M x} \frac{M\ddot{x}}{s_{\text{эф}}}}{R_h} \quad (2)$$

Где $\frac{M\ddot{x}}{s_{\text{эф}}}$ учитывает инерционность жидкости в сосуде и представляет собой среднюю силу, действующую на единицу площади поперечного сечения жидкости в сосуде. q – объемный расход жидкости через МЭП, x – смещение мембран, p_1 – внешнее давление, p_2 – давление в сосуде с воздухом, $s_M \sim 100 \text{ мм}^2$ – площадь поверхности мембран, $s_{\text{эф}} \sim 70 \text{ мм}^2$ – эффективная площадь сечения сосуда с электролитом, принятая равной средней площади сечения сосуда, p_0 – внешнее давление в отсутствии возмущения, m – коэффициент модуляции давления, $V_0 \sim 1 \text{ см}^3$ – объем воздушного пузыря в отсутствии возмущения, M – масса электролита в сосуде, $R_h \sim 3 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5}$ – коэффициент сопротивления течению жидкости через МЭП, ω – циклическая частота колебания внешнего давления. Считая $s_M x$ малым по сравнению с V_0 , сделав необходимые преобразования, решим уравнение движения (1) и найдем коэффициент передачи W_{mech} между амплитудой расхода и амплитудой внешнего давления имеет вид:

$$W_{\text{mech}} = \frac{q}{p} = \frac{q}{mp_0} = \frac{1}{\sqrt{\left(\omega^2 - \frac{p_0 s_{\text{эф}} s_M}{V_0 M}\right)^2 + \left(\omega \frac{s_{\text{эф}} s_M R_h}{M}\right)^2}} \frac{\omega s_{\text{эф}} s_M}{M} \quad (3)$$

Семейство зависимостей $W_{\text{mech}}(f)$ от частоты колебания давления для датчиков с размерами электродного узла 3х3 мм и 6х6 мм при различных внешнем давлении и параметре сосуда с воздухом ($pV = 1; 4 \text{ атм} \cdot \text{см}^3$, $p = 1; 3 \text{ атм}$) представлены на Рисунке 2.

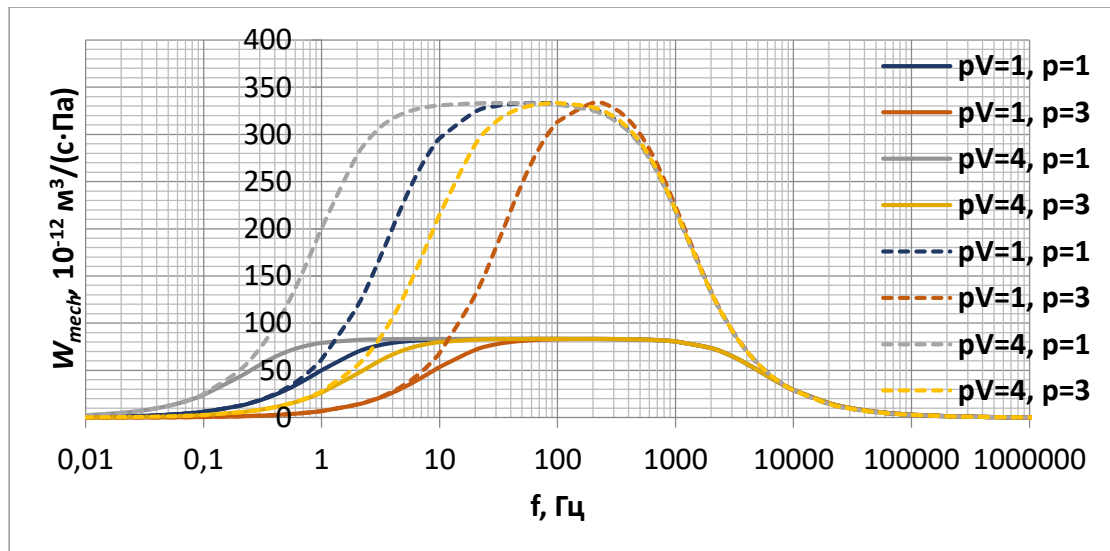


Рисунок 2. График зависимости коэффициента передачи W_{mech} от частоты колебания давления.

Произведем теоретическую оценку собственных шумов гидрофона, основываясь на известных физических механизмах шумов в МЭП описанных в [8,9 и 10] и найденном характере амплитудно-частотной зависимости коэффициента преобразования гидрофона. На Рисунке 3 черным представлена шумовая характеристика окружающей среды при нулевом уровне моря, красным представлен шум моря в стандартной модели Венца [11].

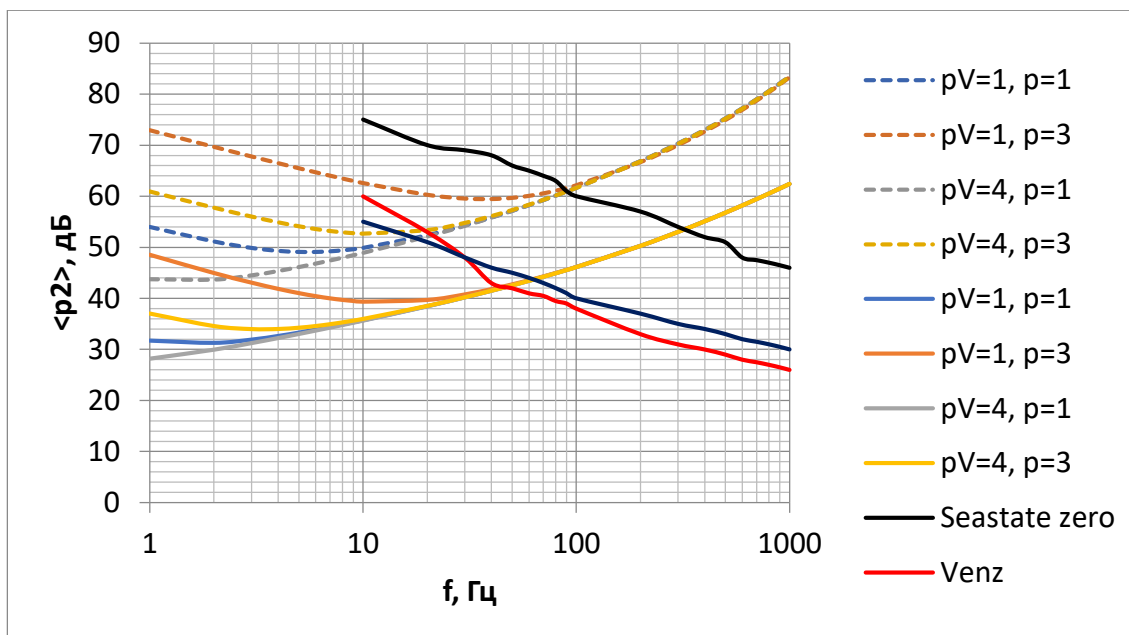


Рисунок 3. Семейство смоделированных кривых собственного шума МЭП гидрофона в терминах спектральной плотности мощности в единицах давления по отношению у 1 мкПа/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Экспериментальные результаты

Для проверки теоретических результатов было собрано несколько прототипов молекулярно-электронных гидрофонов. В конструкцию экспериментального макета вошли элементы силовой отрицательной обратной связи, введенной для стабилизации параметров и расширения динамического диапазона. В замкнутом герметичном объеме с воздухом располагалась электромагнитная катушка и магнит, приклеенный к мембране гидрофона. В катушку подавался регистрируемый датчиком сигнальный ток, приводящий к возникновению электромагнитного поля, и соответствующей силы Лоренца, втягивающей или выталкивающей магнит из катушки. При разомкнутой обратной связи на катушку можно было подавать периодические сигналы, и искусственно вызывать поток жидкости через ячейку имитируя вариации внешнего давления. При известной передаточной характеристике каскада обратной связи указанный способ может быть использован для самокалибровки гидрофона в любых условиях, в том числе полевых. Для практической реализации макета была подобрана частотно независимая передаточная функция каскада, обеспечивающего передачу калибровочного электрического сигнала в движение магнита, прикрепленного к мембране гидрофона. При таком способе снятия отклика системы на внешнее воздействие после калибровки получается безразмерная передаточная характеристика. Для того чтобы найти значение АЧХ в единицах давления, проводилась контрольная сверочная калибровка на стенде с референсным гидрофоном известной чувствительности. Кроме того, экспериментально было показано, что частотная зависимость коэффициента преобразования гидрофона, снятая с помощью самокалибровки катушкой обратной связи, полностью соответствует стандартной калибровке давлением, Рисунок 4. Была проведена целая серия измерений АЧХ при различных глубинах погружения, соответствующих разному статическому давлению в системе. На Рисунке 4 показано семейство соответствующих характеристик. Из представленных характеристик можно сделать вывод, что изменение внешнего статического давления влияет на чувствительность макета молекулярно-электронного гидрофона. Изменение чувствительности происходит главным образом благодаря увеличению жесткости системы из-за постепенного сжатия воздушного пузыря. Увеличение жесткости сдвигает максимум характеристики в сторону низких частот. Изменение чувствительности без специальной компенсации статического давления при изменении на 1 атмосферу составляет около двух раз, что может быть компенсировано за счёт изменения глубины обратной связи. На Рисунке 5 увеличение давления над атмосферным выполнено с шагом 0,2 атм (синяя кривая) до 1,2 атм – серая кривая. Экспериментальные кривые в исследованной области частот соответствуют теоретической модели.

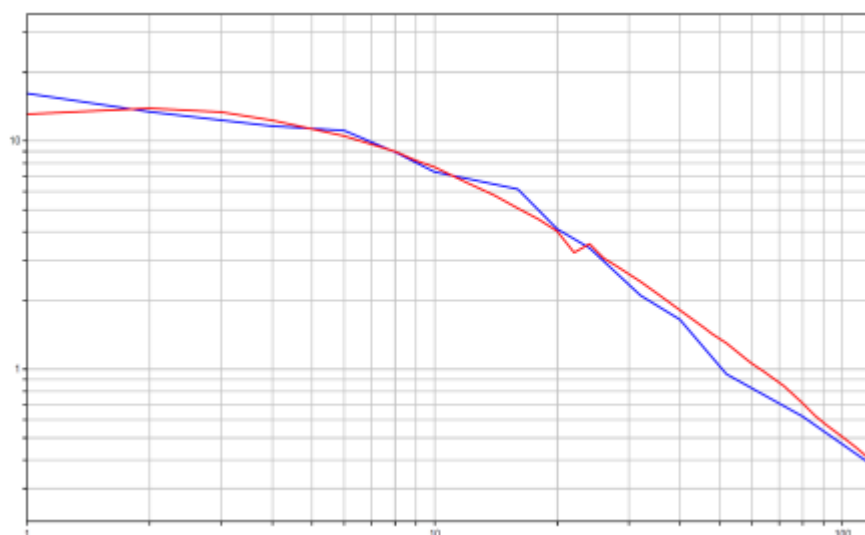


Рисунок 4. Сравнение АЧХ МЭП гидрофона при самокалибровке катушкой (красная кривая) и калибровке на стенде изменения давления (синяя кривая). По оси ординат относительные единицы.

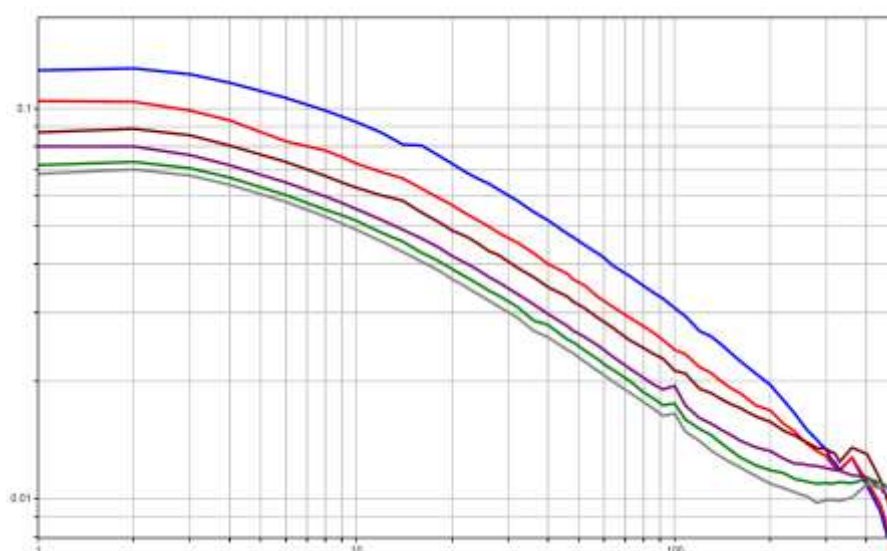


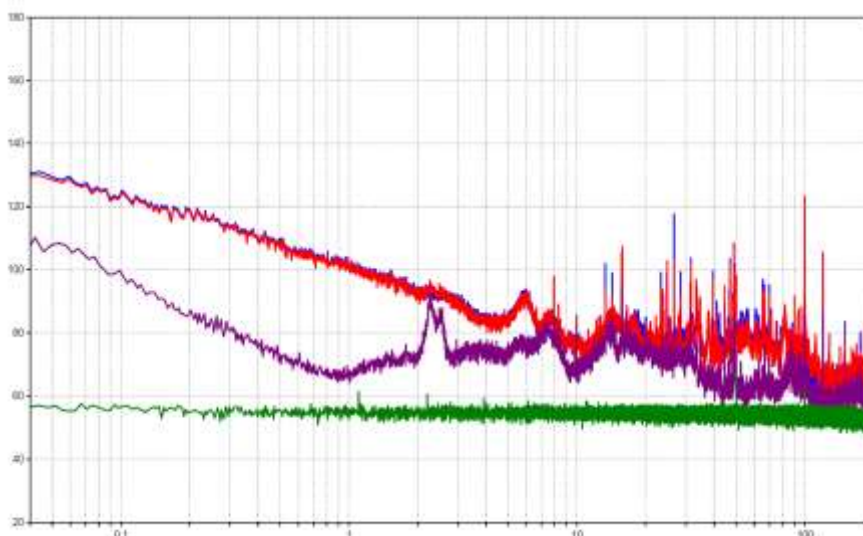
Рисунок 5. Амплитудно-частотные характеристики макета молекулярно-электронного гидрофона при разных статических давлениях.

Экспериментальное исследование собственных шумов было выполнено методом корреляционного анализа в соответствии с методикой, подробно описанной в [12]. Два МЭП гидрофона, имеющих плоскую АЧХ в полосе 0.02-200 Гц (неравномерность 0.5 дБ со спадом 3 дБ на краях полосы) с коэффициентом преобразования 1.5 мВ/Па (процедура подстройки аналогична подробно описанной методике из [12]), были помещены в специальную толстостенную металлическую емкость, заполненную водой. Контейнер накрывался специальным поролоновым куполом, чтобы избежать резких перепадов температуры. Сигнал был записан ночью, для снижения техногенного шума с помощью высокоразрядного АЦП NDAS-8226 (http://www.r-sensors.ru/11_digitizers.shtml). На Рисунке 6 представлены спектральные плотности мощности участка ночной записи двух близкорасположенных молекулярно-электронных гидрофонов (красный и синий). Зеленый- собственный шум АЦП, фиолетовый некоррелированная часть спектральной плотности, имеющая смысл уровня собственного шума гидрофона. Полученные результаты качественно соответствуют теоретическим моделям.

Таким образом, результаты, представленные в настоящем исследовании, описывают теоретические основы и принцип действия МЭП гидрофона. Собран прототип широкополосного

устройства с чувствительностью 1.5 мВ/Па в полосе не менее 0.02 – 200 Гц. Продemonстрировано изменение чувствительности МЭП гидрофона в зависимости от внешнего статического давления, обусловленное изменением жесткости системы. Показано, что собственный шум датчика может быть существенно ниже стандартной модели шумов Венца особенно в области сверхнизких частот.

Рисунок 6. Экспериментальный собственный шум МЭП гидрофона в дБ относительно 1 мкПа/√Гц



Настоящее исследование выполнено при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований гранты №№ 17-07-01334, 16-07-01081 а также 17-20-02183

Литература

1. T. Deng, D. Chen, J. Chen, Z. Sun, J. Wang, "Microelectromechanical Systems-Based Electrochemical Seismic Sensors With Insulating Spacers Integrated Electrodes for Planetary Exploration", IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 16, NO. 3, FEBRUARY 1, 2016.
2. D.G. Levchenko, I.P. Kuzin, M.V. Safonov, V.N. Sychikov, I.V. Ulomov, and B.V. Kholopov, "Experience in seismic signal recording using broadband electrochemical seismic sensors", Seism. Instruments, vol. 46, no. 3, pp. 250–264, 2010
3. D. Zaitsev, A. Antonov, V. Krishtop "Angular MET sensor for precise azimuth determination", Proceedings Volume 10224, International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2016;102241H (2016); doi: 10.1117/12.2267073
4. G. N. Antonovskaya, N. K. Kapustian, A. I. Moshkunov, A. V. Danilov, K. A. Moshkunov, "New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring," J Seismol (2017) 21: 1039. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8>
5. N. S. Lidorenko, B. I. Ilin, I. A. Zaidenman, V. V. Sobol, I. G. Shchigorev, "An Introduction to Molecular Electronics", Moscow, Russia: Energoatomizdat, 1984, p. 320.
6. V. M. Agafonov, A. N. Neeshpapa, and A. S. Shabalina, "Electrochemical seismometers of linear and angular motion," in Encyclopedia of Earthquake Engineering. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 944–961, 2015.
7. A. S. Shabalina et al., "Modern measuring instruments based on molecular electronic transducers," Achievements Modern Radioelectron., vol. 9, pp. 4–33, Sep. 2014. [Online]. Available: <http://www.radiotec.ru/catalog.php?cat=jr4&art=15249>
8. V. A. Kozlov and M. V. Safonov, "Self-noise of molecular electronic transducers," Experim. Instrum. Techn., vol. 73, no. 12, pp. 81–84, 2003.
9. V. Agafonov, D. Zaitsev, "Convective noise in molecular electronic transducers of diffusion type", Tech. Phys. 2010, 55, 130–136.
10. D. L. Zaitsev, V. Agafonov, E. Egorov, A. Antonov, and A. Shabalina, "Molecular electronic angular motion transducer broad band self-noise," Sensors, vol. 15, no. 11, pp. 29378–29392, 2015.
11. G. M. WENZ, Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources, THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, V. 34, N. 12, 1962, 1936-19556
12. I. V. Egorov, A. S. Shabalina, V. M. Agafonov, "Design and Self-Noise of MET Closed-Loop Seismic Accelerometers", IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 17, NO. 7, APRIL 1, 2017.