



УДК 544.6.076.2, 544.6.018.21

DOI: 10.22184/NanoRus.2019.12.89.582.585

# ВЫСОКОТОЧНЫЙ ГИДРОФОН НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

## PRECISION HYDROPHONE BASED ON ELECTROCHEMICAL PRESSURE TRANSDUCER

КРИШТОП ТАТЬЯНА ВИКТОРОВНА<sup>1</sup>KRISHTOP TATIANA V.<sup>1</sup>КОХАНОВСКИЙ СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ<sup>1</sup>KOKHANOVSKY SERGEY V.<sup>1</sup>ДУДКИН ПАВЕЛ ВАЛЕНТИНОВИЧ<sup>1,3</sup>DUDKIN PAVEL V.<sup>1,3</sup>ЖЕВНЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ<sup>1,2,3</sup>ZHEVNENKO DMITRY A.<sup>1,2,3</sup>ЗЛОБИН АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ<sup>3</sup>ZLOBIN ALEXANDER S.<sup>3</sup>БЕЛЯЕВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ<sup>2,3</sup>BELYAEV ALEXEY YU.<sup>2,3</sup>КРИШТОП ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ<sup>1,4</sup>  
vgkvvgk@mail.ruKRISHTOP VLADIMIR G.<sup>1,4</sup>  
vgkvvgk@mail.ru<sup>1</sup> ООО «Сейсмотроника»

Россия, г. Москва, Долгопрудненское ш., 3

<sup>2</sup> АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград,

1-й Западный проезд, 12, стр. 1

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

<sup>4</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники  
и особо чистых материалов РАН

142432, г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 6

<sup>1</sup> Seismotronics LLC

3 Dolgoprudnenskoye Highway, Dolgoprudny, 141700

<sup>2</sup> Molecular Electronics Research Institute JSCbld. 1, 12 1st Zapadny Lane, Zelenograd,  
Moscow, 124460, Russia<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
(State University)

9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

<sup>4</sup> Institute of Microelectronics Technology  
and High-Purity Materials of RAS

6 Ac. Ossipyan St., Chernogolovka, 142432, Russia

В данной работе мы демонстрируем прототип высокоточного гидрофона, построенный на основе электрохимического преобразователя планарного типа. Мы разработали новый планарный электрохимический микрочип и придумали механическую систему, позволяющую регистрировать переменное давление при низких частотах вплоть до 0,01 Гц.

**Ключевые слова:** гидрофон; электрохимический преобразователь; электрохимические микросхемы; датчик давления.

The paper highlights a new prototype of a high-precision hydrophone based on an electrochemical planar-type transducer. We have developed a new planar electrochemical microchip and designed a mechanical system that allows detecting the variable pressure at low frequencies up to 0.01 Hz. The developed sensing element can become the basis for the new generation of acoustic pressure receivers, vector acoustic receivers and sound pressure gradient loggers.

**Keywords:** hydrophone; electrochemical transducer; electrochemical microchips; pressure sensor.

Электрохимические преобразователи хорошо зарекомендовали себя при разработке и производстве высокоточных акселерометров, сейсмометров, геофонов и датчиков вращения [1–5]. Мы разрабатываем и развиваем микроэлектронную технологию производства высокоточных планарных электрохимических преобразователей [6–9].

В данной работе мы демонстрируем новый прототип высокоточного сверхнизкочастотного гидрофона (рис. 1), построенный на основе электрохимического преобразователя планарного типа. Мы разработали планарный электрохимический микрочип и придумали механическую систему, позволяющую регистрировать переменное давление при низких частотах.

Мы получили передаточные характеристики нашего устройства по преобразованию давления в электрический сигнал и нашли их многообещающими. Разработанный чувствительный элемент может стать основой для семейства (нового поколения) приемников акустического давления, векторных акустических приемников, регистраторов градиента звукового давления.

Гидрофон состоит из микроэлектронного преобразователя давления в электрический ток, гидроинтерфейса/гидроусилителя давления, механического гидрокомпенсатора статического давления, электролитического канала, в котором расположена преобразующая микросхема, гидрокомпенсатора статического давления и преобразующего усилителя с цепями термокомпенсации.

Показания электрохимического чувствительного элемента зависят от температуры. Эти зависимости хорошо изучены [10], также разработаны метод и цепи термокомпенсации, которые корректируют температурный уход характеристик во всем рабочем диапазоне.

Электрохимическая система (электролит/электроды) подобрана таким образом, что не происходит осаждения продуктов химической реакции на поверхности электрода. Реакции обратимы и идут в одну сторону на катодах и в обратную сторону на анодах, обеспечивая только электронный обмен между ионами раствора и поверхностью электрода. Теоретически реакция (прямая и обратная) может идти бесконечное время, компоненты электролита не расходуются и параметры остаются стабильными в течение всего срока службы. Нет прямой зависимости ресурса от объема электролита. Старению подвержены резиновые детали мембран и уплотнителей, в то же время подтвержденный срок их службы — более десяти лет.

Мы использовали для испытаний рабочий эталон 2-го разряда единицы звукового давления в водной среде в диапазоне частот от 1 Гц до 2 кГц производства ВНИИФТРИ (Москва, Зеленоград), откалиброванный с применением первичных эталонов ФГУП ВНИИФТРИ, укомплектованный измерительными модулями Zetlab (Москва, Зеленоград) и калиброванным эталонным гидрофоном.

Для этого испытываемые гидрофоны закреплялись в испытательной камере малого объема эталона на одной высоте с эталонным гидрофоном и в камеру малого объема подавалась серия звуковых сигналов в диапазоне частот от 1 до 2000 Гц. Сигналы с градуируемого и с эталонного гидрофонов регистрировались с помощью измерительного оборудования производства Zetlab, входящего в состав эталона звукового давления. Далее зарегистрированные сигналы с эталонного и с калибруемого гидрофонов сравнивались с помощью калибровочного ПО эталона и вычислялась характеристика испытываемого гидрофона.

Необходимо упомянуть, что электролитический преобразователь является источником тока, т. е. на выходе микросхемы формируется токовый сигнал, пропорциональный давлению (сигнал электролитического преобразователя пропорционален давлению для гидрофона или пропорционален ускорению для акселерометра). Т. к. измерительная аппаратура звукового эталона рассчитана на сигнал по напряжению, то для использования электролитического преобразователя требуется преобразователь тока с выходом по напряжению. Большинство систем

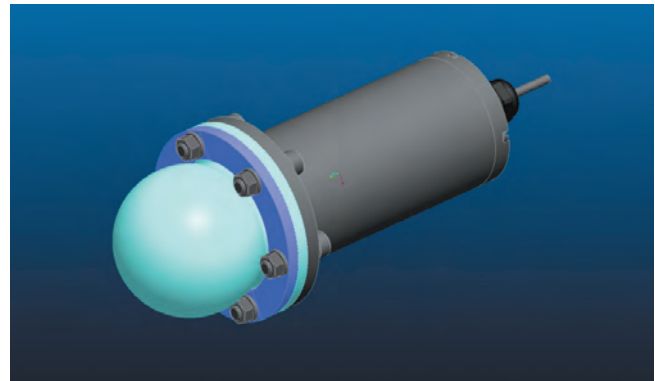


Рис. 1. СНЧ-гидрофон

Fig. 1. ULF-hydrophone

сбора данных также требуют от первичных датчиков выхода по напряжению.

Максимальное потребление чувствительного элемента преобразователя составляет около 300 мкВт, однако мы планируем повысить чувствительность в будущем, и вместе с этим потребление возрастет до 1 мВт. Надо заметить, что потребление зависит от уровня регистрируемого сигнала и достигает максимума при регистрации больших внешних сигналов. Фактическое потребление прибора определяется потреблением сопутствующей электроники.

Данные с выхода усилителей гидрофонов были пересчитаны в единицы чувствительности электролитического преобразователя мкА/Па (рис. 2).

Electrochemical transducers have proven to be useful in high-precision accelerometers, seismometers, geophones and rotation sensors [1–5]. We have been designing and developing a microelectronic technology for the production of high-precision planar electrochemical transducers [6–9].

In this paper we demonstrate a new prototype of a high-precision ultra-low-frequency hydrophone, (Fig. 1) constructed on the basis of a planar type electrochemical transducer. We have developed a new planar electrochemical microchip and designed a mechanical system that allows detecting the variable pressure at low frequencies up to 0.01 Hz. We have obtained the transfer characteristics

of our device to convert pressure into an electrical signal, and they are very promising. The developed sensing element can become the basis for the new generation of acoustic pressure receivers, vector acoustic receivers, sound pressure gradient loggers.

The hydrophone consists of a micro-electronic pressure transducer into an electric current, a hydro-interface & hydraulic booster, a mechanical static pressure compensator, an electrolytic channel in which the converting microchip is located, hydraulic pressure compensator, and a converting amplifier with thermo compensation circuits.

The characteristics of the electrochemical sensing element depend on the temperature.

These dependences are well studied [10]. A method and circuits of thermal compensation have been developed to correct the temperature drift of the characteristics in the entire working range.

The electrochemical system (electrolyte/electrodes) has been selected so that there is no precipitation of chemical reaction products on the electrode surface.

Chemical reactions are reversible, and occur in one direction at the cathodes and in the opposite direction at the anodes, providing only an electron exchange between the solution ions and the electrode surface.

Theoretically, the reaction (direct and reverse) can go on for an infinite time, the



Скорость отклика чувствительного элемента на внешнее воздействие определяется скоростью распространения акустического воздействия в электролите, т.е. скоростью прохождения звука в объеме электролита от гидроинтерфейса до преобразующего элемента на длине канала с электролитом. Однако сопутствующая электроника имеет определенную полосу пропускания, и в итоге скорость отклика ограничивается верхней частотой полосы пропускания прибора. При верхней рабочей частоте в 100 Гц это время реакции составляет 10 миллисекунд.

Инфразвуковые СНЧ-гидрофоны могут использоваться в составе систем водной и донной сейсморазведки, в составе векторных акустических антенн, систем освещения подводной обстановки, донных радиогидроакустических буев, охранных систем заградительного типа и буксируемой гибкой антенны. Добавление элемента, обладающего высокой чувствительностью в герцевом и субгерцевом диапазоне, позволит расширить возможности имеющейся гидроакустической приборной базы и, вероятно, послужит развитию новых методов в гидроакустике.

Мы благодарим АО «Концерн «Океанприбор» за предоставленное оборудование и поддержку нашей работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бугаев А. С., Антонов А. Н., Агафонов В. М., Белотелов К. С., Вергелес С. С., Дудкин П. В., Егоров Е. В., Егоров И. В., Жевненко Д. А., Жабин С. Н., Зайцев Д. Л., Криштоп Т. В., Неешпапа А. В., Попов В. Г., Усков В. В., Шабалина А. С., Криштоп В. Г. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей // Радиотехника и электроника, 2018. — Т. 63. — № 11.
2. Шабалина А. С., Зайцев Д. Л., Егоров Е. В., Егоров И. В., Антонов А. Н., Бугаев А. С., Агафонов В. М., Криштоп В. Г. Молекулярно-электронные преобразователи в современных измерительных приборах // Успехи современной радиоэлектроники, 2014. — № 9. — С. 33–42.
3. Shabalina A. S. and Krishtop V. G. *The precision seismometer based on planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241K.

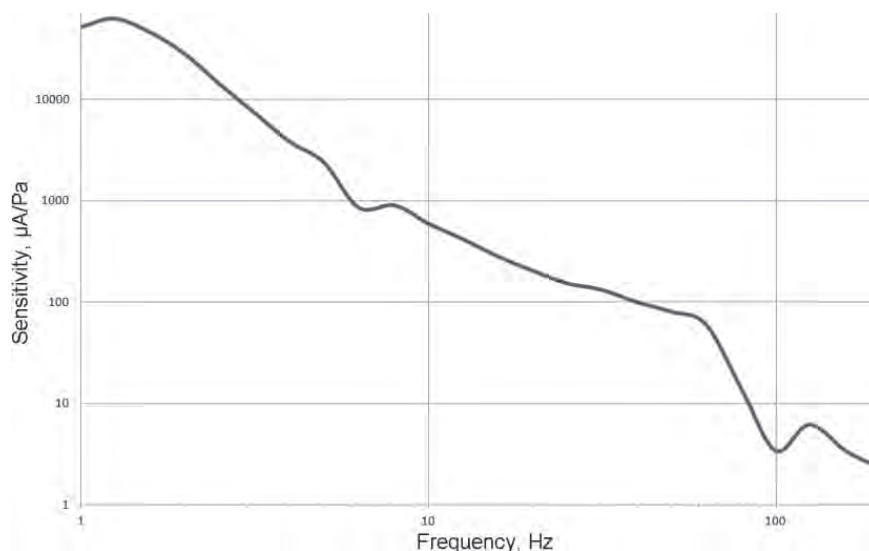


Рис. 2. Передаточная функция СНЧ-гидрофона

Fig. 2. Transfer function of the ULF-hydrophone

4. Zaitsev D., Antonov A., Krishtop V. *Angular MET sensor for precise azimuth determination* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241H.
5. Zaitsev D. L., Agafonov V. M., Egorov E. V., Antonov A. N., Krishtop V. G. *Precession Azimuth Sensing with Low-Noise Molecular Electronics Angular Sensors* // Journal of Sensors, 2016. Vol. 2016. Article ID 6148019.
6. Zhevenko D. A., Vergeles S. S., Krishtop T. V., Tereshonok D. V., Gornev E. S., Krishtop V. G. *The simulation model of planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241I.
7. Novikov A. V., Egorchikov A. E., Dolgov A. N., Gornev E. S., Popov V. G., Egorov I. V., Krishtop V. G. *The planar silicon-based microelectronic technology for electrochemical transducers* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241J.
8. Zaitsev D. L., Dudkin P. V., Krishtop T. V., Neeshpapa A. V., Popov V. G., Uskov V. V., Krishtop V. G. *Experimental Studies of Temperature Dependence of Transfer Function of Molecular Electronic Transducers at High Frequencies* // IEEE Sensors Journal, 2016. Vol. 16. № 22. P. 7864–7869.
9. Криштоп В. Г. Экспериментальное моделирование температурной зависимости амплитудно-частотной характеристики преобразователей вращательных движений на основе электрохимических преобразователей // Электрохимия, 2014. — Т. 50. — № 4. — С. 392–397.

components of the electrolyte are not consumed, and the parameters remain stable throughout the lifetime.

There is no dependence between the device resource and the amount of the electrolyte.

Rubber parts of membranes and seals are subject to aging, but their confirmed service life is more than ten years.

We used for testing the working Standard of the second category of the unit of sound pressure in water in the frequency range from

1 Hz to 2 kHz. The Standard was manufactured by VNIIFTRI (Russia, Zelenograd) and calibrated using State Primary Special Standard of the unit of sound pressure in water (VNIIFTRI). The testing stand is equipped with Zetlab measuring modules (Russia, Zelenograd) and a reference hydrophone.

For testing, the test hydrophones were fixed in a small volume chamber of the Standard at the same height as the reference hydrophone, and series of sound signals in the

frequency range from 1 to 2000 Hz were fed into the small volume chamber.

The signals from the calibrated hydrophone and from the reference hydrophone were recorded by the Zetlab measuring equipment included in the Standard kit.

Further, the recorded signals from the reference hydrophone and from the calibrated hydrophone were compared with the calibration software of the Standard, and the characteristic of the hydrophone under test was calculated.





It should be mentioned that electrolytic transducer is a current source, i.e. a current signal proportional to the pressure is formed at the output of the microchip (the signal of the electrolytic transducer is proportional to the pressure at the hydrophone, or proportional to the acceleration at the accelerometer). Thus, a current converter with a voltage output is required to use an electrolytic transducer because the measuring equipment of the Standard is designed for a voltage signal. Most data acquisition systems also require a voltage output from the primary sensors.

The maximum power consumption of the sensing chip of the hydrophone is about 300  $\mu$ W, but we are going to increase the sensitivity, and along with this, the consumption will increase to 1 mW. It should be noted that consumption depends on the level of the recorded signal, and reaches a maximum when registering large external signals. The actual consumption of the device is determined by the power consumption of amplifying electronics.

Data from the output of hydrophone amplifiers were recalculated into units of sensitivity of the electrolytic transducer  $\mu$ A/Pa (Fig. 2).

The speed of the response of the sensing element to the external action is determined by the speed of propagation of the acoustic effect in the electrolyte, i.e. by the speed of sound in the volume of electrolyte at the distance from the hydrointerface to the sensing element at the length of the channel with electrolyte.

However, the associated electronics have a certain bandwidth, and as a result, the response speed is limited by the upper frequency of the instrument's bandwidth. At the top operating frequency of 100 Hz, the reaction time is 10 milliseconds.

Infrasound ULF hydrophones may be used as part of water and bottom seismic systems, as part of vector acoustic antennas, underwater surveillance systems, bottom radio-acoustic buoys, security systems of barrier type and towed flexible antennas.

Adding the sensor with a high sensitivity in the hertz and sub-Hz ranges can expand the capabilities of the existing hydroacoustic instrument base, and, might serve the development of new methods in hydroacoustics.

We are grateful to "Concern "Oceanpribor" JSC for the provided equipment and support for our work.

## REFERENCES

1. Bugaev A. S., Antonov A. N., Agafonov V. M., Belotelov K. S., Vergeles S. S., Dudkin P. V., Egorov E. V., Egorov I. V., Zhevnenko D. A., Zhabin S. N., Zaitsev D. L., Krishtop T. V., Neeshpapa A. V., Popov V. G., Uskov V. V., Shabalina A. S., Krishtop V. G. *Izmeritel'nye pribory na osnove molekulyarno-elektronnykh preobrazovatelei* // Radiotekhnika i elektronika, 2018. V. 63. № 11. (In Russian).
2. Shabalina A. S., Zaitsev D. L., Egorov E. V., Egorov I. V., Antonov A. N., Bugaev A. S., Agafonov V. M., Krishtop V. G. *Molekulyarno-elektronnye preobrazovateli v sovremennykh izmeritel'nykh priborakh* // Uspekhi sovremennoi radioelektroniki, 2014. № 9. P. 33–42. (In Russian).
3. Shabalina A. S. and Krishtop V. G. *The precision seismometer based on planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241K.
4. Zaitsev D., Antonov A., Krishtop V. *Angular MET sensor for precise azimuth determination* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241H.
5. Zaitsev D. L., Agafonov V. M., Egorov E. V., Antonov A. N., Krishtop V. G. *Precession Azimuth Sensing with Low-Noise Molecular Electronics Angular Sensors* // Journal of Sensors, 2016. Vol. 2016. Article ID 6148019.
6. Zhevnenko D. A., Vergeles S. S., Krishtop T. V., Tereshonok D. V., Gornev E. S., Krishtop V. G. *The simulation model of planar electrochemical transducer* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241I.
7. Novikov A. V., Egorchikov A. E., Dolgov A. N., Gornev E. S., Popov V. G., Egorov I. V., Krishtop V. G. *The planar silicon-based microelectronic technology for electrochemical transducers* // Proc. SPIE, 2016, 10224, ICMNE-2016, 102241J.
8. Zaitsev D. L., Dudkin P. V., Krishtop T. V., Neeshpapa A. V., Popov V. G., Uskov V. V., Krishtop V. G. *Experimental Studies of Temperature Dependence of Transfer Function of Molecular Electronic Transducers at High Frequencies* // IEEE Sensors Journal, 2016. Vol. 16. № 22. P. 7864–7869.
9. Krishtop V. G. *Ekspperimental'noe modelirovanie temperaturnoi zavisimosti amplitudno-chastotnoi kharakteristiki preobrazovatelei vrashchatel'nykh dvizhenii na osnove elektrokhimicheskikh preobrazovatelei* // Elektrokimiya, 2014. V. 50. № 4. P. 392–397. (In Russian).



**ТЕХНОСФЕРА**  
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

[www.technosphere.ru](http://www.technosphere.ru)

ЭЛЕКТРОНИКА НАУКА  
ТЕХНОЛОГИИ И  
БИЗНЕС

НАНОИНДУСТРИЯ  
НАУКА | ИНВЕСТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО

ФОТОНИКА  
НАУКА | ИНВЕСТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО

ПЕРВАЯ  
МИЛЯ  
НАУКА | ИНВЕСТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО

АНАЛИТИКА  
НАУКА | ИНВЕСТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО

СТАНКОИНСТРУМЕНТ  
НАУКА | ИНВЕСТИРОВАНИЕ | ПРОИЗВОДСТВО

Цифровая экономика