

Влияние первичных параметров соединительного кабеля на точность измерений электроакустических характеристик мощных низкочастотных гидроакустических излучателей

А. К. Бритенков^{1,2,*}, О. И. Канаков^{2†}

¹Институт прикладной физики Российской академии наук. Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, д. 46

²Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского

Россия, 603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23

(Статья поступила 14.11.2019; Подписана в печать 09.01.2020)

Специфика разработки низкочастотных гидроакустических излучателей под конкретные задачи накладывает жёсткие требования к обеспечению заданных электроакустических параметров преобразователя, что требует точного измерения характеристик при проведении испытаний. Использование длинного кабеля от системы возбуждения до излучателя без учёта электрических характеристик такой линии приводит с одной стороны, к уменьшению точности измерений, а с другой — к отсутствию оптимального согласования системы возбуждения и низкочастотного излучателя, снижая эффективность работы излучающего комплекса в целом. Исследования влияния кабеля длиной 1 км на результаты измерений электроакустических характеристик излучателя и параметров его эквивалентной схемы показали, что вносимые погрешности при измерении резонансной частоты и ширины полосы частот в диапазоне до 1 кГц незначительны, однако значения напряжения и тока системы возбуждения значительно отличаются от значений тока и напряжения на излучателе. КПД и чувствительность излучателя оказываются занижены по отношению к его реальным характеристикам. В работе приведены рекомендации по методике измерений и обработке экспериментальных данных с учётом первичных параметров кабеля для различных метрологических задач гидро- и электроакустики, радио- и электротехники для любых нагрузок в диапазоне звуковых и ультразвуковых частот.

PACS: 47.35.Rs, 89.20.Bb, 89.20.Kk

УДК: 534.143, 534.4, 537.311.6, 621.3.011.712

Ключевые слова: гидроакустический излучатель, пьезоэлектрический преобразователь, электроакустические характеристики, длинная линия, четырёхполюсник, телеграфные уравнения, импеданс нагрузки, схема замещения, радиотехника, гидроакустика.

ВВЕДЕНИЕ

Спектр приложений низкочастотных гидроакустических излучателей [1] довольно обширен: от дальней звукоподводной связи и освещения подводной обстановки до рыбопромысловой разведки и исследования влияния мощных акустических полей на биологические объекты и экосистемы. Обилие задач и условия конкретного технического задания, как правило, требуют гарантированного обеспечения заданных электроакустических параметров [2] разрабатываемых излучателей. В связи с этим необходимо проведение натурных испытаний в открытых акваториях на различных глубинах для точного измерения электроакустических характеристик гидроакустических преобразователей [3]. При подобных измерениях подводная и надводная части обычно структурно разделены, соединяясь длинными линиями связи. Использование длинного кабеля связи от системы возбуждения до излучателя без учёта электрических характеристик такой линии приводит, с одной стороны, к высоким погрешностям измерений, а с другой — к отсутствию оптимального согласования системы возбуждения с низко-

частотным излучателем (НЧИ) и снижению эффективности работы излучающего комплекса. Соединительный кабель длиной более 100 м уже можно рассматривать как длинную линию с эквивалентной схемой в виде четырёхполюсника [4], что является упрощённой формой записи телеграфных уравнений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЧИ

Измерения электроакустических характеристик НЧИ продольно-изгибного типа [5] с пьезоэлектрическим активным элементом проводились в гидроакустическом бассейне и в морских условиях (рис. 1) согласно методике, изложенной в работе [3].

НЧИ с закреплённым на подвесе измерительным гидрофоном (рис. 1), расположенным на фиксированном расстоянии от излучателя, погружаются на глубину от 30 до 250 м. Генерация сигналов и сбор данных осуществляются цифро-аналоговым (ЦАП) и аналого-цифровым (АЦП) преобразователями на базе шасси National Instruments cRIO-9031 при помощи виртуальных приборов, установленных на управляющем компьютере в пакете программ LABVIEW. После генерации на виртуальном генераторе после ЦАП сигнал возбуждения подаётся на усилитель мощности, повышающий (согласующий) трансформатор и далее поступает

*E-mail: britenkov@ipfran.ru

†E-mail: okanakov@rf.unn.ru



Рис. 1: НЧИ продольно-изгибного типа с закреплённым измерительным гидрофоном и кабелем связи перед погружением для проверки электроакустических параметров

через кабель связи на НЧИ. Сигнал с гидрофона, ток и напряжение на выходе системы возбуждения, а также входной сигнал на усилителе мощности синхронно регистрируются одновременно с контролем на экране осциллографа (рис. 2).

В экспериментах по оценке влияния кабеля на результаты измерений электроакустических характеристик НЧИ использовался кабель КГВЭВ 10×0.5 (10 токопроводящих жил и экран) длиной 1000 м, соединённый последовательно с коаксиальным кабелем ПГЭШ- $1 \times 1,5 - 2500$ В (1 токопроводящая жила и экран) длиной 200 м (сопротивление постоянному току 8 Ом, индуктивность менее 1 мкГн и ёмкость 47 нФ). Схема коммутации кабеля при проведении измерений приведена на рис. 3.

В кабеле КГВЭВ 10×0.5 в единый токопровод объединялись по 3 жилы, образуя двухпроводную линию сечением токопровода 1.5 мм^2 с общим экраном (рис. 4) с суммарным сопротивлением постоянному току 30 Ом, индуктивностью 12 мкГн и общей ёмкостью 380 нФ. Измерения электроакустических характеристик НЧИ на ЛЧМ-сигналах и запись осциллограмм тока и напряжения проводились в несколько этапов на выходе усилителя в точках 1 и 2 (входе кабеля КГВЭВ 10×0.5) и в точках 3 и 4, где кабель КГВЭВ 10×0.5 соединялся с кабелем ПГЭШ- $1 \times 1.5 - 2500$ В. Для снятия и регистрации силы тока и напряжения в этих точках использовались измерительные токовые клещи и высоковольтный дифференциальный пробник.

2. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КАБЕЛЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения показали, что влияние кабеля КГВЭВ 10×0.5 длиной 1000 м на погрешность определения резонансной частоты и ширины полосы частот излучателя несущественно. Однако по срав-

нению с коротким кабелем (100 – 200 м) для НЧИ, создающего приведённое к 1 м звуковое давление в несколько тысяч Па (более 100 Вт акустической мощности [3, 6]), сила тока и напряжение на выходе системы возбуждения значительно отличаются от силы тока и напряжения на излучателе, вследствие чего измеренные КПД и чувствительность оказываются заниженными по отношению к его реальным характеристикам на 15 – 20 % ввиду выраженной реактивной составляющей нагрузки и линии связи. С другой стороны, при измерении ЭАХ для малогабаритных и миниатюрных НЧИ, развивающих до 50 – 70 Вт акустической мощности [5, 7, 8], влияние длинного кабеля в первую очередь отражается на частотной характеристике, так как соотношение $C_{\text{каб}}/C_0$ не так мало, как у мощных НЧИ. Как следствие, использование кабеля такой длины ведёт к серьёзным ошибкам в определении параметров эквивалентной схемы (рис. 5) как мощного, так и малогабаритного НЧИ, получаемых после обработки записей тока и напряжения системы возбуждения на входе кабеля [3].

Погрешности измерений электроакустических характеристик НЧИ сложно оценить, учитывая неопределённость при измерениях (смена НЧИ между измерениями) импеданса нагрузки [9]

$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C_0} \left(R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right)}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + \frac{1}{j\omega C_0}},$$

где C_0 — ёмкость активного элемента преобразователя, L — индуктивность, отражающая влияние присоединённой массы воды, C — ёмкость колебательного контура, определяемая жёсткостью колебательной системы, R — сопротивление, вызванное потерями при электромеханическом преобразовании. Таким образом, влияние кабеля связи может привести к невозможности сопоставления измеренных параметров для различных НЧИ.

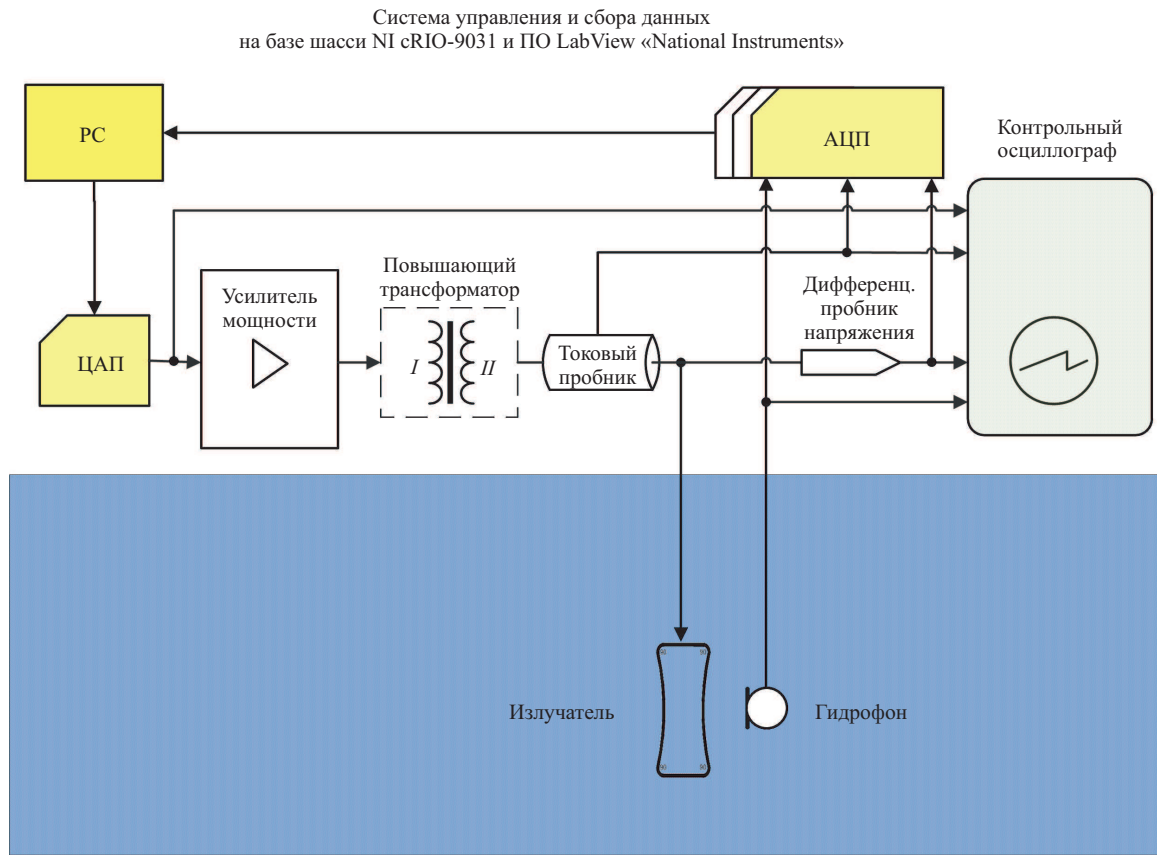


Рис. 2: Схема измерения электроакустических параметров НЧИ



Рис. 3: Электрическая принципиальная схема включения кабеля связи и нагрузки

3. МОДЕЛЬ КАБЕЛЯ И КОРРЕКТИРОВКА ЕГО ВЛИЯНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В предположении линейности и отсутствия утечек в кабеле при погружении в воду можно считать его линейным четырёхполюсником [4], используя $abcd$ -матрицу (А-параметры) для пересчёта комплексных амплитуд напряжений и токов с выхода на вход:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_0(t) \\ \hat{i}_0(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ c(\omega) & d(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u}_1(t) \\ \hat{i}_1(t) \end{pmatrix},$$

где $\hat{u}_0(t)$ и $\hat{i}_0(t)$ — комплексные амплитуды напряжения и тока на выходе системы возбуждения, $\hat{u}_1(t)$ и $\hat{i}_1(t)$ — комплексные амплитуды напряжения и тока на излучателе (рис. 3). Взаимность (обусловленная пассивностью) и симметрия входа и выхода линейного четырёхполюсника накладывают дополнительные условия $ad - bc = 1$ и $a = d$, что сокращает количество неизвестных в $abcd$ -матрице:

$$\begin{pmatrix} \hat{u}_0(t) \\ \hat{i}_0(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(\omega) & b(\omega) \\ b^{-1}(\omega) & a(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{u}_1(t) \\ \hat{i}_1(t) \end{pmatrix}, \quad (1)$$

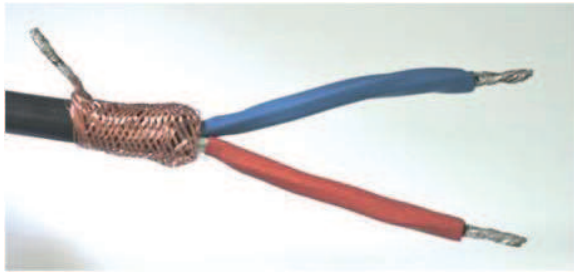


Рис. 4: Кабель КГВЭВ 10×0.5 с параллельным соединением нескольких токопроводящих жил (суммарное сечение каждого токопровода — 1.5 мм²)

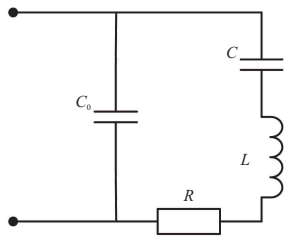


Рис. 5: Электрическая эквивалентная схема НЧИ с пьезоэлектрическим активным элементом для резонансной (рабочей) полосы частот

При произвольной нагрузке Z четырёхполюсника из решения системы уравнений 1 относительно a и b при известных комплексных амплитудах напряжений и токов на входе и выходе возможно определение всех параметров A -матрицы четырёхполюсника для соответствующей частоты [10].

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТРИЦЫ ЧЕТЫРЁХПОЛЮСНИКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения параметров $abcd$ -матрицы четырёхполюсника во всём диапазоне частот по результатам измерений при помощи ЛЧМ-сигнала необходимо перевести оцифрованные эпюры напряжения и тока на входе и выходе кабеля в комплексные сигналы добавлением образа преобразования Гильберта в качестве мнимой части. Зависимость частоты от времени при этом известна (определяется методикой измерения; в данной работе — по закону ЛЧМ), либо может быть восстановлена на основе комплексных сигналов путём численного дифференцирования фазы. Зависимые от времени параметры a и b матрицы четырёхполюсника

находятся из системы уравнений 1, после чего объединением временных зависимостей частоты и параметров матрицы четырёхполюсника записываются табличные зависимости $a(\omega)$ и $b(\omega)$. Такая модель позволяет во всём диапазоне частот произвести пересчёт комплексных амплитуд с входа кабеля 1–2 (выхода усилителя) на выход кабеля 3–4 (вход нагрузки) путём обращения соотношения 1. В силу симметрии кабеля, результат этого обращения записывается в виде

$$\begin{pmatrix} \hat{i}_1(t) \\ \hat{i}_1(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(\omega) & -b(\omega) \\ -b^{-1}(\omega) & a(\omega) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_0(t) \\ \hat{i}_0(t) \end{pmatrix}.$$

Проведение измерений и обработка результатов с использованием такой методики учитывает первичные параметры линии связи для нагрузки с любым импедансом Z [11]. Следует отметить, что для проведения измерений тока и напряжения системы возбуждения на входе и выходе четырёхполюсника 1 с целью определения A -матрицы и параметров кабеля достаточно использовать электрические эквиваленты НЧИ [9, 11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика может использоваться в широком спектре приложений при проведении измерений в радиотехнике, электроакустике и электротехнике для любых нагрузок в диапазоне ЗЧ, УЗЧ и ВЧ [12]. В рамках модели импеданс нагрузки может меняться между измерениями, что позволяет использовать методику измерений для различных нагрузок [1, 11, 13]. Линейность, отсутствие утечки, пассивность (взаимность), электрическая симметрия кабеля как четырёхполюсника и пренебрежение длиной линии связи по сравнению с длиной распространяющейся волны зачастую допускает замену кабеля эквивалентной ёмкостью (реже — индуктивностью), хотя необходимость пересчёта входных токов и напряжений на кабеле к выходным сохраняется и в этих предельных случаях.

Авторы выражают благодарность заведующему отделом акустики океана Д.А.Касьянову, заведующему лабораторией прикладной гидроакустики Б.Н.Боголюбову и научному сотруднику центра гидроакустики В.А.Фарфелю за внимание к работе, помощь в подготовке, организации и проведении испытаний, а так же обсуждению результатов. Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект 0035-2019-0019).

[1] Богородский В.В., Зубарев Л.А., Корепин Е.А., Якушев В.И. Подводные электроакустические преобразователи. Судостроение. JL., 1983.

[2] Sherman C.H., Butler J.L. Transducers and arrays for underwater sound. New York: Springer, 2007.

[3] Боголюбов Б.Н., Кирсанов А.В., Леонов И.И., Смир-

- нов С. А., Фарфель В. А. // Гидроакустика. 2015. **23**, № 3. С. 20.
- [4] Рыжаков С. М. Анализ распределённых электрических цепей в частотной области. — Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 1998.
- [5] Андреев М. Я., Боголюбов Б. Н., Ключин В. В., Рубанов И. Л. // Датчики и системы. 2010. № 12. С. 51.
- [6] Mosca F., Matte G., Shimura T. // J. Acoust. Soc. Am. 2013. **133**, N 1. P. EL61.
- [7] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Смирнов С. А. Продольно-изгибный гидроакустический преобразователь. Патент RU 2681268. Бюл. № 7.
- [8] Бритенков А. К., Боголюбов Б. Н., Дерябин М. С., Фарфель В. А. // Труды МАИ. 2019. № 105. С. 1.
- [9] Боголюбов Б. Н., Фарфель В. А., Смирнов С. Ю., Круглов Н. Ю., Кушнерёв Д. Н. // Радиотехника, 2019. **6**, № 5. С. 129.
- [10] Рыжаков С. М. Анализ четырёхполюсников в частотной области. Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 1992.
- [11] Huang W., Chen D., Baker E. M., Zhou J., Hsieh H., Lee F. C. // IEEE Trans. Ind. Electron. 2007. **54**, 6. P. 3197.
- [12] Фурдуев В. В. Акустические основы вещания. М.: Книга по требованию, 2012.
- [13] Смаришев М. Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны. Л.: Судостроение, 1984.

Influence of feeder cable parameters upon accuracy in measurements of characteristics of powerful low-frequency underwater electroacoustic transducers

A. K. Britenkov^{1,2,a}, O. I. Kanakov^{2,b}

¹Center for Hydroacoustics, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences
Nizhny Novgorod 603950, Russia

²Radiophysics Faculty, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod.
Nizhny Novgorod 603950, Russia

E-mail: ^abritenkov@ipfran.ru, ^bokanakov@rf.unn.ru

Providing required values of electro-acoustic parameters of low-frequency hydroacoustic transducers calls for precise measurement of their characteristics during tests. Using a long cable to connect an electric excitation system to a transducer without taking into account the electric characteristics of the cable leads on the one hand to measurement accuracy reduction, and on the other to non-optimal matching between the excitation system and the low-frequency transducer. This results in overall performance loss of the sound radiation system. Experimental studies of how a 1000 m long cable influences the results of measuring transducer electro-acoustic characteristics and its equivalent circuit parameters showed that resonance frequency and bandwidth measurement errors are insignificant in the frequency range up to 1 kHz, however the values of voltage and current at the excitation system output differ considerably from their values at the transducer input. When the cable influence is neglected, efficiency and sensitivity of the transducer are found to be underestimated in relation to their real values. The present study contains recommendations on the techniques of measurement and experimental data processing to compensate for the influence of the feeder cable on the measurement results. These recommendations are applicable to various metrological tasks of hydro- and electroacoustics, radio and electrical engineering, for arbitrary electrical loads in the audio and ultrasonic frequency range.

PACS: 47.35.Rs, 89.20.Bb, 89.20.Kk

Keywords: underwater electroacoustic transducer, piezoelectric transducer, electro-acoustic characteristics, long transmission line, linear four-pole, telegrapher's equations, electrical impedance, electrical equivalent, radio engineering, hydro-acoustics.

Received 14 November 2019.

Сведения об авторах

1. Бритенков Александр Константинович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (831) 416-47-64, e-mail: jkd@yandex.ru.

2. Канаков Олег Игоревич — доктор физ.-мат. наук, профессор; тел.: (831) 465-62-42, e-mail: okanakov@rf.unn.ru.