

УДК 539.19 + 532.5.032

© Б. П. Шарфарец, 2019

ОБ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЯХ В ЭЛЕКТРООСМОТИЧЕСКОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ НОВОГО ТИПА

В работе рассматривается баланс энергии в электроакустическом преобразователе нового типа, приводятся выражения мощности для мгновенных и средних за период колебаний значений токов проводимости и смещения. Показывается, что единственным источником энергии в рассматриваемом электроакустическом преобразовании является ток проводимости с отличной от нуля средней мощностью. Делается достаточно тривиальный вывод об обязательном наличии ионов в рабочей жидкости электроакустического преобразователя. Показывается, что усредненная мощность тока смещения в указанном преобразователе близка или равна нулю. Это происходит либо вследствие выполнения условий применимости уравнений электрогидродинамики, либо из-за разности фаз колебаний плотности тока смещения и вектора электрической напряженности, либо по обеим причинам одновременно. Полученные результаты могут быть востребованы при проектировании излучателей нового типа

Кл. сл.: электроосмотический акустический преобразователь, удельная электропроводность среды, электрогидродинамическая система уравнений, мощность тока проводимости, мощность тока смещения

ВВЕДЕНИЕ

В ряде предыдущих работ автора [1–3 и др.] рассматривалась теория электроосмотического акустического преобразователя нового типа. Одним из важных вопросов при его проектировании является рассмотрение баланса энергии в нем, расчет его активной и реактивной мощностей. Этому вопросу посвящена настоящая работа.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной задачей настоящей работы является определение мгновенной и усредненной за период гармонического колебания мощностей токов проводимости и смещения, возникающих при реализации процесса электроосмотического акустического преобразования нового типа. Решение этой проблемы позволит оптимизировать конструкцию электроакустического преобразователя.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

В отличие от стационарного электроосмоса, при работе электроосмотического акустического преобразователя прикладывается также и переменное электрическое поле \mathbf{E} . В этом случае кроме тока проводимости \mathbf{j} присутствует и ток смещения $\mathbf{j}_{\text{см}}$. Согласно [4, с. 499], [5, с. 332, уравнение (81.6)], ток смещения определяется выраже-

нием (СИ)

$$\mathbf{j}_{\text{см}} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (1)$$

а ток проводимости — выражением [4, с. 501]

$$\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}, \quad (2)$$

где σ — удельная электропроводность среды.

Для изотропной неферромагнитной и несегнетоэлектрической среды справедливо следующее материальное уравнение (СИ) электромагнитного поля [4, с. 501] (в частности, согласно [6, с. 143], это справедливо для жидкостей)

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}. \quad (3)$$

Здесь ε_0 — диэлектрическая постоянная; ε — относительная диэлектрическая проницаемость. Подставляя в (1) выражение (3), получаем

$$\mathbf{j}_{\text{см}} = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (4)$$

Пусть $\mathbf{E} = (0, 0, E_z)$, где поле E_z гармонически изменяется во времени $E_z = \bar{E} e^{-i\omega t}$, амплитуда $\bar{E} = \text{const}$, ω — круговая частота колебаний. Перейдем к разности потенциалов между электродами акустического преобразователя $U = \bar{U} e^{-i\omega t}$, где $\bar{U} = \bar{E} l = \text{const}$, l — расстояние между электродами. Как видно из (2) и (4), вектор плотности тока

проводимости \mathbf{j} при гармоническом характере поля и действительной удельной электропроводности σ синфазен вектору \mathbf{E} электрической напряженности. Напротив, вектор плотности тока смещения $\mathbf{j}_{\text{см}}$ при временной зависимости колебаний $e^{-i\omega t}$ опережает по фазе вектор \mathbf{E} на угол $\pi/2$.

Замечание 1. В жидкостях плотность тока проводимости \mathbf{j} может существенно отличаться по виду от выражения (2). Так, например, в [7] приведены следующие выражения для вектора плотности тока

$$\mathbf{j} = \sum_{i=1}^N \mathbf{j}_i = \sum_{i=1}^N (\rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei} + \rho_{ei} \mathbf{v}) = \mathbf{j}' + \rho_e \mathbf{v}, \quad (5)$$

$$\mathbf{j}' = \sum_{i=1}^N (\rho_{ei} u_i \mathbf{E} - D_i \nabla \rho_{ei}) = \sigma \mathbf{E} - \sum_{i=1}^N D_i \nabla \rho_{ei}, \quad (6)$$

где ρ_{ei} — плотность заряда i -го иона; ρ_e — совокупная плотность заряда в жидкости; $\sigma_i = \rho_{ei} u_i$

и $\sigma = \sum_{i=1}^N \rho_{ei} u_i$ — парциальная и полная удельные

проводимости соответственно; D_i — коэффициент диффузии и u_i — подвижность i -го иона; \mathbf{v} — вектор скорости течения жидкости. Как видно из этих выражений, фаза колебаний векторов \mathbf{j} и \mathbf{E} может не совпадать хотя бы по причине не синфазного колебания вектора скорости миграции

$\mathbf{E} \cdot \sum_{i=1}^N (\rho_{ei} u_i)$ и вектора скорости течения жидкости \mathbf{v} .

Замечание 2. В общем случае материальное уравнение (4) может быть сложнее, например величина ε может быть тензорной или комплексной, однако в случае рассмотрения явлений, являющихся предметом изучения в рамках электрогидродинамики, появляется естественное ограничение, состоящее в необходимости пренебрежения током смещения [8].

Пусть далее I и $I_{\text{см}}$ — соответственно амплитуды суммарных токов проводимости и смещения, протекающих между электродами. Найдем соответствующие мгновенные мощности P и $P_{\text{см}}$ переменных токов проводимости и смещения.

Мгновенная мощность переменного тока определяется выражением [5, с. 548]

$$P(t) = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \delta + \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos(2\omega t - \delta).$$

Здесь U_0 и I_0 — соответственно амплитудные

значения напряжения и тока; δ — разность фаз между током и напряжением. Средняя мощность за время периода колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega}$ определяется

выражением $\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$ и равна

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \delta.$$

Согласно приведенным выше рассуждениям разность фаз δ между током проводимости и напряжением может быть в общем случае отлична от нуля ($\delta \neq 0$) либо равной нулю ($\delta = 0$). Плотность тока смещения $\mathbf{j}_{\text{см}}$, согласно Замечанию 2, принимается либо пренебрежимо малой, либо, согласно (4), при действительной величине ε ($\text{Im} \varepsilon = 0$) между током смещения и напряжением разность фаз равна $\delta_{\text{см}} = \pi/2$.

Отсюда окончательно получаем для средней мощности, выделяемой током проводимости за период колебаний T

$$\bar{P} = \frac{1}{2} \bar{U} I \cos \delta,$$

и током смещения при $\text{Im} \varepsilon = 0$

$$\bar{P}_{\text{см}} = \frac{1}{2} \bar{U} I_{\text{см}} \cos \frac{\pi}{2} \equiv 0.$$

Отметим, кроме того, что условие

$$\bar{P}_{\text{см}} \approx 0$$

должно быть соблюдено еще и как необходимое условие применимости системы уравнений электрогидродинамики. В противном случае применение этой системы к рассматриваемым процессам неправомерно [7].

Таким образом, рассмотрены мощности токов проводимости и смещения при гармоническом характере переменного электрического поля \mathbf{E} . При постоянном внешнем поле $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 = \text{const}$ присутствует отличный от нуля ток проводимости \mathbf{j}_0 , а ток смещения $\mathbf{j}_{0\text{см}}$ либо отсутствует, согласно (4), либо при возникновении пульсационных гармонических колебаний вследствие турбулентного характера движения жидкости при $\mathbf{E}_0 \geq \mathbf{E}_{0\text{кр}}$, где $\mathbf{E}_{0\text{кр}}$ — критическое значение величины напряженности стационарного электрического поля, чрезвычайно мал, согласно Замечанию 2.

Единственным источником энергии в электроакустическом преобразовании является энергия

внешнего электрического поля. В силу близкой в общем случае или равной нулю средней мощности тока смещения единственным проявлением ее в рассматриваемом процессе является отличная от нуля мощность тока проводимости в жидкости. Это в свою очередь означает *обязательное наличие ионов в рабочей жидкости* электроакустического преобразователя. В электроосмотическом процессе, который и является механизмом электроакустического преобразования, для возникновения осмотического течения основополагающую роль играет наличие двойного электрического слоя, в диффузной части которого обязательно присутствуют ионы, что и вызывает ток проводимости (ионной в данном случае).

ВЫВОДЫ

В работе рассматривается баланс энергии в электроакустическом преобразователе нового типа, приведены выражения для мгновенных и средних за период колебаний мощностей токов проводимости и смещения. Показано, что единственным источником энергии в рассматриваемом электроакустическом преобразовании является ток проводимости с его всегда отличной от нуля средней мощностью. Из чего следует достаточно тривиальный вывод об обязательном наличии ионов в рабочей жидкости электроакустического преобразователя. Кроме того, показано, что усредненная мощность энергии тока смещения в указанном преобразователе близка или равна нулю. Полученные результаты могут быть востребованы при проектировании излучателей нового типа.

Работа выполнена в ИАП РАН в рамках Государственного задания 075-00780-19-02 по теме № 0074-2019-0013 Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сергеев В.А., Шарфарец Б.П.* Об одном новом методе электро-акустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Ч. I. Гидро-

динамический аспект // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 2. С. 25–35.

URL: <http://iairas.ru/mag/2018/full2/Art4.pdf>

2. *Сергеев В.А., Шарфарец Б.П.* Об одном новом методе электроакустического преобразования. Теория, основанная на электрокинетических явлениях. Ч. II. Акустический аспект // Научное приборостроение. 2018. Т. 28, № 2. С. 36–44.

URL: <http://iairas.ru/mag/2018/full2/Art5.pdf>

3. *Курочкин В.Е., Сергеев В.А., Шарфарец Б.П., Гуляев Ю.В.* Теоретическое обоснование нового метода электроакустического преобразования. Линейное приближение // Доклады АН. 2018. Т. 483, № 3. С. 260–264.

4. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. М.: Наука, 1968. 940 с.

5. *Сивухин Д.В.* Общий курс физики. Учеб. пособие для вузов, в 5 т. Т. 3. Электричество. М.: Физматлит, изд-во МФТИ, 2004. 656 с.

6. *Bruus H.* Theoretical microfluidics. Oxford University Press, 2008. 346 p.

7. *Шарфарец Б.П.* Система уравнений электрогидродинамики применительно к электроосмотическим процессам // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 1. С. 135–142.

URL: <http://iairas.ru/mag/2019/full1/Art20.pdf>

8. *Шарфарец Б.П.* Система уравнений электрогидродинамики применительно к электроосмотическим процессам // Научное приборостроение. 2019. Т. 29, № 1. С. 135–142.

URL: <http://iairas.ru/mag/2019/full1/Art20.pdf>

**Институт аналитического приборостроения РАН,
Санкт-Петербург**

Контакты: *Шарфарец Борис Пинкусович,*
sharb@mail.ru

Материал поступил в редакцию 8.07.2019

ABOUT ACTIVE AND REACTIVE POWERS IN ELECTROSMOTIC CONVERTER OF A NEW TYPE

B. P. Sharfarets

Institute for Analytical Instrumentation of RAS, Saint Petersburg, Russia

The paper considers the energy balance in an electroacoustic converter of a new type, gives expressions of power for instantaneous and average for the period oscillations of the values of conduction and displacement currents. It is shown that the only source of energy in the electroacoustic conversion under consideration is the conduction current with a non-zero average power. A rather trivial conclusion is made about the obligatory presence of ions in the working fluid of an electroacoustic transducer. It is shown that the average power of the conduction current in the specified converter is close to or equal to zero. This happens either due to the fulfillment of the conditions of applicability of the electrohydrodynamic equations, or due to the phase difference between the oscillations of the displacement current density and the electric vector, or for both reasons at the same time. The obtained results can be claimed in the design of emitters of a new type.

Keywords: electroosmotic acoustic transducer, electrical conductivity, electrohydrodynamic system of equations, power conduction, bias current power

REFERENCES

1. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. A theory based on electrokinetic phenomena. Part I. The hydrodynamic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 25–35. DOI: 10.18358/np-28-2-i2535 (In Russ.).
2. Sergeev V.A., Sharfarets B.P. [About one new method of electroacoustic transformation. A theory based on electrokinetic phenomena. Part II. The acoustic aspect]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 2, pp. 36–44. DOI: 10.18358/np-28-2-i3644 (In Russ.).
3. Kurochkin V.E., Sergeev V.A., Sharfarets B.P., Gulyayev Yu. V. [Theoretical argumentation of the new method of electro-acoustic conversion. Linear Approximation]. *Doklady Akademii nauk* [Reports of Academy of sciences], 2018, vol. 483, no. 3, pp. 260–264. (In Russ.).
4. Yavorskij B.M., Detlaf A.A. *Spravochnik po fizike dlya inzhenerov i studentov vuzov* [Handbook of physics for engineers and university students]. Moscow, Nauka Publ., 1968. 940 p.
5. Sivuhin D.V. *Obshchij kurs fiziki. Ucheb. posobie dlya vuzov. T. 3. Elektrichestvo* [General course of physics. Manual for universities. In 5 vols. Vol. 3. Electricity]. Moscow, Fizmatlit Publ., MFTI press, 2004. 656 p.
6. Bruus H. *Theoretical microfluidics*. Oxford University Press, 2008. 346 p.
7. Sharfarets B.P. [System electrohydrodynamics equations applied to electroosmotic processes]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2019, vol. 29, no. 1, pp. 135–142. DOI: 10.18358/np-29-1-i135142 (In Russ.).
8. Sharfarets B.P. [Application of the system of electrohydrodynamics equations for mathematical modeling of a new method of electro-acoustic transformation]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2018, vol. 28, no. 4, pp. 127–134. DOI: 10.18358/np-28-4-i127134 (In Russ.).

Contacts: *Sharfarets Boris Pinkusovich*,
sharb@mail.ru

Article received the editorial board on 8.07.2019