

# ИНФОРМАТИКА И ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ COMPUTER SCIENCE AND ENGINEERING SCIENCES

---

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ MODELLING OF PROCESSES AND MANAGEMENT IN TECHNICAL SYSTEMS

---

УДК 621.3.012.8

Д. А. Гринюк, Н. М. Олиферович, И. Г. Сухорукова,  
А. Л. Егорова, И. О. Оробей, П. О. Карпук  
Белорусский государственный технологический университет

### СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА СДВИГОВОМ ПОТОКЕ

В статье делается попытка построения схемы замещения измерительного преобразователя электрокинетического потенциала, принцип работы которого основан на сдвиговом потоке. Для получения использован подход, который основан на феноменологической линейной термодинамической теории необратимых процессов с использованием кинетических уравнений переноса. Поскольку полезный сигнал измерительного преобразователя предусматривает использование переменного измерительного сигнала, то схема замещения позволит оптимизировать параметры работы измерительного канала. Особенностью рассмотренного измерительного преобразователя является сочетание двух неэлектрических явлений как одновременное движение жидкости под действием внешнего давления и вращения элементов преобразователей. Связав потоки массы и электрического заряда, получаем выражения для построения и анализа схем замещения разработанного электрокинетического преобразователя.

Проведен анализ для различных режимов работы электрокинетического преобразователя и получены основные соотношения. В частности, отдельно выделены потенциальный режим, токовый режим, режим максимального КПД и режим максимальной выходной электрической мощности. На основании теоретических предпосылок предложен ряд вариантов построения схем замещения и расчетные формулы для определения их параметров. Результаты работы предусматривают дальнейшую доработку для учета не только статических, но и динамических параметров схемы замещения.

**Ключевые слова:** схема замещения, электрокинетические потенциал, электрокинетические явления.

**Для цитирования:** Гринюк Д. А., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Егорова А. Л., Оробей И. О., Карпук П. О. Схема замещения электрокинетического преобразователя на сдвиговом потоке // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2023. № 1 (266). С. 46–53. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-266-1-9.

**D. A. Hryniuk, N. M. Oliferovich, I. G. Suhorukova, A. L. Egorova, I. O. Orobei, P. O. Karpuk**  
 Belarusian State Technological University

**SUBSTITUTION CIRCUIT OF ELECTROKINETIC CONVERTER ON SHEAR FLOW**

The article attempts to construct an equivalent circuit for measuring the electrokinetic potential transducer, the principle of operation of which is based on a shear flow. To obtain, an approach was used that is based on the phenomenological linear thermodynamic theory of irreversible processes using kinetic transport equations. Since the useful signal of the measuring transducer involves the use of a variable measuring signal, the equivalent circuit will allow optimizing the operation parameters of the measuring channel. A feature of the considered measuring transducer is the combination of two non-electrical phenomena as the simultaneous movement of a liquid under the action of external pressure and rotation of the transducer elements. By relating the flows of mass and electric charge, we obtain expressions for constructing and analyzing the equivalent circuits of the developed electrokinetic converter.

An analysis was carried out for various modes of operation of the electrokinetic converter and the main ratios were obtained. In particular, the potential mode, the current mode, the mode of maximum efficiency and the mode of maximum output electric power are singled out separately. On the basis of theoretical prerequisites, a number of options for constructing equivalent circuits and calculation formulas for calculating their parameters are proposed. The results of the work provide for further refinement to take into account not only static, but also dynamic parameters of the equivalent circuit.

**Keywords:** Equivalent circuit, electrokinetic potential, electrokinetic phenomena.

**For citation:** Hryniuk D. A., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Egorova A. L., A., Orobei I. O., Karpuk P. O. Substitution circuit of electrokinetic converter on shear flow. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2023, no. 1 (266), pp. 46–53. DOI: 10.52065/2520-6141-2023-266-1-9 (In Russian).

**Введение.** В предыдущих работах [1–3] был представлен ряд конструкций электрокинетических преобразователей (ЭКПр) по использованию сдвигового движения. Там же можно ознакомиться с основными принципами их работы. В источниках [4, 5] получена теоретическая зависимость для интерпретации результатов измерения.

Принцип действия разработанного базового первичного преобразователя представлен на рис. 1.

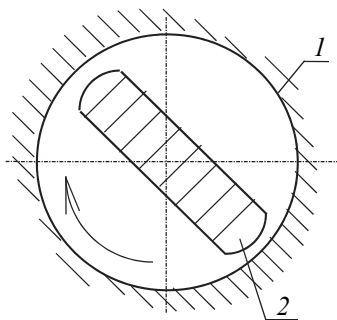


Рис. 1. Принцип создания ЭКПр:  
 1 – неподвижная поверхность; 2 – ротор

Приборы, в основе которых лежит метод переменного потенциала течения, из-за высоких внутренних сопротивлений имеют небольшую выходную электрическую мощность и требуют согласования с регистрирующей электронной аппаратурой.

Пороговая чувствительность электрокинетического преобразования определяется коэффициентом преобразования механического сигнала в электрический собственными электрическими шумами преобразователя и шумами согласующего усилителя. Необходимо отметить, что электродные системы в жидкости при больших внутренних сопротивлениях источника подвержены сильным наводкам.

Функционально при электрокинетическом преобразовании можно выделить две взаимосвязанные системы: механическую и электрическую [5].

В электрическом представлении предлагаемые устройства являются источниками энергии и могут быть представлены в виде реальных источников тока или ЭДС. Существенной особенностью при анализе электрических схем замещения и измерения разработанных ЭКПр является зависимость внутреннего сопротивления электрокинетического генератора от изменения проводимости исследуемой среды и от угла поворота подвижного элемента. Внутреннее сопротивление генератора колеблется в широких пределах, которые зависят от соотношения между шириной капилляра и максимальным расстоянием от текущей поверхности подвижного элемента до внутренней поверхности стакана. При этом из-за влияния поверхностной проводимости имеют место нелинейные эффекты.

Для первичного преобразователя с подвижным элементом, сечение которого представляет

собой усеченную окружность, сигнал можно аппроксимировать трапециидальной формой. Период сигнала  $T$  определяется частотой вращения подвижного элемента  $f_M$ , количеством пар электродов  $n_1$  и количеством образованных капилляров  $n_2$  следующим образом:

$$T = \frac{1}{n_1 n_2 f_M}. \quad (1)$$

Нижний предел частоты сигнала  $f_n$  определяется упругими и инерционными свойствами среды, верхний предел ограничивается частотой, при которой среда теряет несжимаемость [6], и частотными свойствами электродов:

$$f_n \ll \frac{c}{a}, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света;  $a$  – максимальное расстояние между двумя точками, находящимися в жидкости.

**Разработка схемы замещения.** При расчете параметров ЭКПр чаще всего основываются на феноменологической линейной термодинамической теории необратимых процессов с использованием кинетических уравнений переноса, связывающих потоки массы и электрического заряда [7, 8]:

$$q = a_{11}\Delta P + a_{12}\Delta U; \quad (3)$$

$$I = a_{21}\Delta U + a_{22}\Delta P. \quad (4)$$

При этом выполняется равенство перекрестных коэффициентов:

$$a_{12} = a_{21}. \quad (5)$$

Соотношения (3)–(5) для исследуемого преобразования отличаются от уравнений, задаваемых классической теорией, что является следствием иной причины возникновения тока и потенциала. Учитывая соотношения взаимности и то, что разность потенциалов является следствием напряжения сдвига, уравнения (3) и (4) можно представить в виде

$$q = b_{11}\Delta N + b_{12}\Delta U \Leftrightarrow q = -\frac{\Delta N}{R_{H,C}^0} + \Delta S\Delta U; \quad (6)$$

$$I = b_{21}\Delta U + b_{22}\Delta N \Leftrightarrow I = S\Delta U - \frac{\Delta N}{R_{E,C}^0}. \quad (7)$$

Знаки перед слагаемыми выбираются так, чтобы  $S$  была отрицательна, а  $R_{E,C}^0$  и  $R_{H,C}^0$  – положительны, когда в капилляре осуществляется конвективный перенос положительных ионов, а положительное направление электрического потенциала и скорости жидкости направлено по потоку [5].

Таким образом, при одновременном вращении ротора и действии электрического напряжения на электродах скорость жидкости и электрический ток зависят от  $\Delta N$  и  $\Delta U$  согласно (6) и (7). Из-за обратимости электрокинетических явлений (ЭКЯ) ток, текущий через нагруженное сопротивление жидкости  $R_{E,P}$ , определяется как

$$I = \frac{\Delta U}{R_{E,P}}. \quad (8)$$

Из (6)–(8) видно, что гидравлическое сопротивление вращению подвижного элемента  $R_{H,C}^0$  и коэффициент преобразования сдвигового движения жидкости  $S$  в электрический ток (чувствительность электрокинетического преобразования по току) при отсутствии электрического напряжения в капилляре (или, что эквивалентно, при  $R_{E,P} = 0$ ) выражаются в виде

$$R_{H,C}^0 = -\left. \frac{\Delta N}{q} \right|_{R_{E,P}=0}; \quad (9)$$

$$S = \left. \frac{I}{\Delta N} \right|_{R_{E,P}=0}. \quad (10)$$

Наличие напряжения  $\Delta U$  на щелевом капилляре создает вращающий момент на подвижном элементе. По аналогии с электроосмотическим насосом [8] такой преобразователь можно назвать электроосмотическим двигателем ( $\Delta U$  преобразуется в механический момент вращения  $\Delta N$ ). В этом случае получаем

$$\Delta N = qR_{H,P}, \quad (11)$$

где  $R_{H,P}$  – гидравлическая нагрузка (сопротивление) вращению.

Из (6), (7) и (11) следует, что электрическое сопротивление капилляра  $R_{E,C}^0$  и коэффициент преобразования  $S$  электрического напряжения в движение ротора (при отсутствии момента сопротивления на валу последнего или при  $R_{H,P} = 0$ ) выражаются в виде

$$R_{E,C}^0 = -\left. \frac{\Delta U}{I} \right|_{R_{H,P}=0}; \quad (12)$$

$$S = \left. \frac{q}{\Delta U} \right|_{R_{H,P}=0}. \quad (13)$$

Правые части (10) и (13) равны в силу соотношения взаимности.

Электрическое сопротивление  $R_{E,C}^0$  зависит от электрокинетических свойств капилляра. Электрический ионный ток, текущий через капилляр под действием приложенного к электродам напряжения, увеличивается благодаря электроосмотическому течению жидкости (13).

Электрическое сопротивление преобразующего капилляра без течения жидкости ( $R_{H,P} = \infty, q = 0$ )

$$R_{E,C}^{\infty} = \frac{grad(u)}{I} \Big|_{R_{H,P}=0}. \quad (14)$$

Это сопротивление зависит от ЭКП в меньшей степени, чем  $R_{E,C}^0$ . Исключая из (6), (7)  $\Delta N$  при  $q = 0$  и учитывая (14), находим

$$R_{E,C}^0 = \frac{R_{E,C}^{\infty}}{1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^{\infty}}. \quad (15)$$

Уравнения (6), (7) образуют замкнутую систему относительно  $I, U, N$  и позволяют при заданном  $\Delta N$  и известных  $S, R_{H,C}^0, R_{E,C}^{\infty}, R_{E,P}$  (или  $S, R_{E,C}^0, R_{H,C}^{\infty}, R_{E,P}$ ) определить все выходные характеристики электрокинетического преобразования механической величины в электрическую. Исключая из этой системы  $q$  и учитывая (11), (15), находим выражение для коэффициентов преобразования момента вращения в электрическое напряжение  $\Delta U / \Delta N$ , электрический ток  $I / \Delta N$  и электрическую мощность

$$\frac{W^E}{\Delta N^2} = I \frac{\Delta U}{\Delta N^2}; \quad (16)$$

$$\frac{\Delta U}{\Delta N} = \frac{SR_{E,P} R_{E,C}^0}{R_{E,C}^0 + R_{E,P}};$$

$$\frac{\Delta I}{\Delta N} = \frac{SR_{E,C}^0}{R_{E,C}^0 + R_{E,P}}; \quad (17)$$

$$\frac{W}{\Delta N^2} = \frac{SR_{E,P} (R_{E,C}^0)^2}{(R_{E,C}^0 + R_{E,P})^2}. \quad (18)$$

Выражение для гидравлического сопротивления преобразующего капилляра

$$R_{H,C} = -\frac{\Delta N}{q} \quad (19)$$

при произвольном нагрузочном электрическом сопротивлении имеет вид

$$R_{H,C} = R_{H,C}^0 \left( 1 + \frac{S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^{\infty} R_{E,P}}{R_{E,C}^{\infty} + R_{E,P}} \right). \quad (20)$$

Выражение для электрического сопротивления  $R_{E,M}$  при произвольном нагрузочном гидравлическом сопротивлении  $R_{E,P}$

$$R_{E,C} = -\frac{\Delta U}{I} \quad (21)$$

представляется как

$$R_{E,C} = \frac{R_{E,C}^{\infty}}{1 + S^2 (R_{H,C}^0)^2 \frac{R_{E,C}^{\infty}}{R_{H,C}^0 + R_{H,P}}}. \quad (22)$$

Из (7) следует, что электрокинетический преобразующий элемент является генератором электрического тока, его простейшие схемы замещения показаны на рис. 2 и 3. Обозначения элементов цепей находятся в соответствии с представлением уравнений (6), (7):

$$\left. \begin{aligned} q &= q^0 - q_{back}, \\ I &= I_{St} - I_{back}^0, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где  $q_{back}$  – объемная скорость обратного электроосмотического потока,  $q_{back} = S\Delta U$ ;  $q_0$  – объемная скорость жидкости через капилляр при  $\Delta U = 0$ ;  $q_0 = \Delta N R_{H,C}^0$ ;  $I_{St} = S\Delta N$ ;  $I_{back}^0$  – обратный электрокинетический ток, текущий через капилляр под действием напряжения,  $I_{back}^0 = \Delta U R_{E,C}^0$ . Величины  $-\Delta U, I, R^0, R, I^0, I_{back}$  являются электрическими аналогами механических величин  $\Delta N, q, R_{H,C}^0, R_{H,C}, q^0, q_{back}$ .

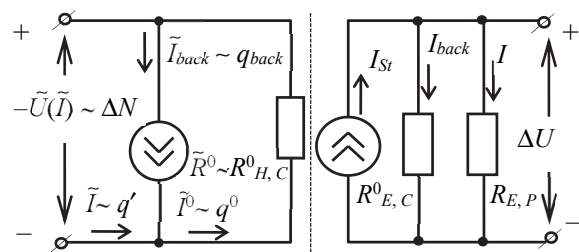


Рис. 2. Эквивалентная электрическая цепь преобразующего элемента согласно кинетическим уравнениям переноса

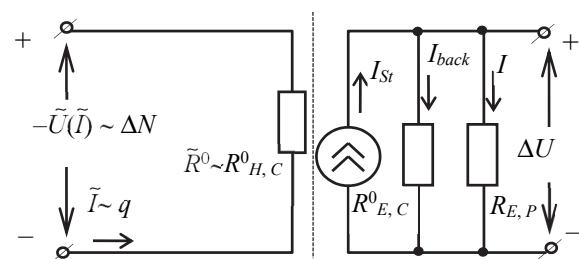


Рис. 3. Простейшая эквивалентная электрическая цепь преобразующего элемента в случае постоянного течения жидкости

Пунктирной линией разделены электрический аналог движения жидкости в капилляре и эквивалентная электрическая цепь ЭКПр как генератора тока. Цепь на рис. 4 отличается от цепи на рис. 2 тем, что в последней параллельно соединенные  $R_{H,C}^0$  и электроосмотический двигатель заменены эквивалентным электрическим сопротивлением  $R_{H,C}$  (рис. 5).

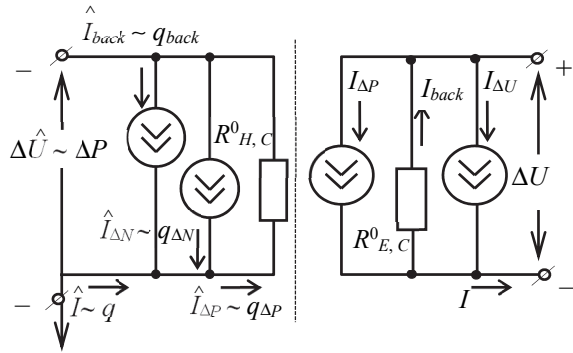


Рис. 4. Схема замещения электрокинетического преобразователя

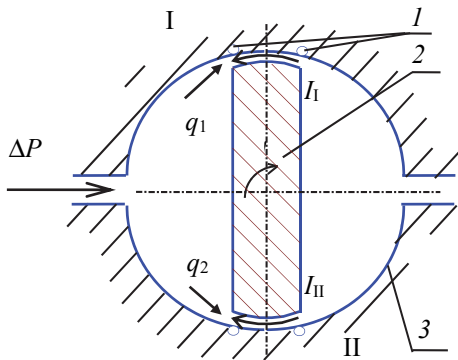


Рис. 5. Геометрия модели преобразователя:  
1 – электроды; 2 – подвижной элемент;  
3 – корпус

Важной характеристикой, от которой зависит нижний порог чувствительности ЭКПр, является КПД преобразования  $\eta_V$ , определяемый как отношение снимаемой с электродов электрической мощности  $W_E = I\Delta U$  к механической мощности  $W = -q\Delta N$ , затрачиваемой на сдвиг жидкости:

$$\eta_V = -\frac{I\Delta U}{q\Delta N}. \quad (24)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части (24) на  $\Delta N$  и подставив в нее значения  $\Delta U/\Delta N$ ,  $I/\Delta N$ ,  $R_{H,C}$  из (16), (17), (20), получим:

$$\eta_V = \frac{S^2 R_{H,C} (R_{E,C}^\infty)^2 R_{H,C}^0 (R_{E,C}^\infty + R_{E,P})^{-1}}{(R_{E,C}^\infty + R_{E,P} + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty R_{E,P})}. \quad (25)$$

В зависимости от  $R_{E,C}$  возможны различные режимы работы ЭКПр [5].

**Потенциальный режим.** С электродов снимается максимальное напряжение, и коэффициент преобразования  $\Delta P$  в электрическое напряжение (чувствительность ЭКПр по напряжению)  $S_{\Delta U}$  максимален по абсолютной величине. Из (16), (17) видно, что этот режим реализуется в случае

$$R_{E,C}^\infty \ll R_{E,P}. \quad (26)$$

При этом  $I \ll I_{St}$ , а снимаемое напряжение примерно равно  $\Delta U_{St}$ :

$$S_{\Delta U} = \frac{\Delta U}{\Delta N} \Big|_{R_{E,P}=\infty} = \frac{\Delta U_{St}}{\Delta N}; \quad (27)$$

$$S_{\Delta U} = SR_{E,C}^0 = \frac{SR_{E,C}^\infty}{1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty}. \quad (28)$$

Гидравлическое сопротивление вращению  $R_{H,C}$ , как следует из (20), (26), принимает максимальное значение, приблизительно равное

$$R_{H,C}^\infty = -\frac{\Delta N}{q} \Big|_{R_{E,P}=\infty}, \quad (29)$$

где  $R_{H,C}^\infty$  – гидравлическое сопротивление вращению в капилляре при разомкнутых электродах, когда  $I = 0$  (соответственно при  $R_{E,P} = \infty$ ).

Согласно (20) и (26),

$$R_{H,C}^\infty = R_{H,C}^0 (1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty). \quad (30)$$

**Токовый режим.** С электродов снимается максимальный ток. Коэффициент преобразования момента вращения в электрический ток (чувствительность ЭКПр по току)  $S_I$  по абсолютной величине имеет максимальное значение. Из (17) следует, что токовый режим реализуется в случае

$$R_{E,C}^\infty \gg R_{E,P}, \quad (31)$$

т. е. при измерении  $\zeta$ -потенциала по методу тока течения.  $S_I$  примерно равен значению тока течения, отнесенного к единице напряжения:

$$S_I = \frac{I}{\Delta N} \Big|_{R_{E,P}=0} = \frac{I_{St}}{\Delta N}; \quad (32)$$

$$S_I = S. \quad (33)$$

**Режим максимального КПД.** Значение  $R_{E,P}$  в этом режиме можно определить по экстремуму функции (25), приравняв производную  $d\eta_V/dR_{E,P}$  к нулю. Максимально возможный КПД и значение  $R_{E,P}^n$  при таком КПД:

$$\eta = \frac{\sqrt{1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty} - 1}{\sqrt{1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty} + 1}; \quad (34)$$

$$R_{E,P}^n = \frac{R_{E,C}^\infty}{\sqrt{1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty}}. \quad (35)$$

**Режим максимальной выходной электрической мощности.** Экстремум (18) по  $R_{E,P}$  показывает, что коэффициент преобразования квадрата  $\Delta N$  в электрическую мощность  $W^E$  принимает максимальное значение  $S_W$  при  $R_{E,P} = R_{E,C}^0$ :

$$S_W = \frac{S^2 R_{E,C}^\infty}{4(1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty)} = S^2 \frac{R_{E,C}^0}{4}. \quad (36)$$

При условии

$$S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty \ll 1 \quad (37)$$

выражения (15), (23), (25) (34), (35) переходят в простые соотношения:

$$\begin{cases} R_{H,C}^0 = R_{H,C}^\infty = R_{H,C}, \\ R_{E,C}^0 = R_{E,C}^\infty = R_{E,C}, \\ R_{E,P}^\eta = R_{E,C}; \end{cases} \quad (38)$$

$$\eta = \frac{S^2 R_{H,C} R_{E,C}}{4}. \quad (39)$$

Последние два соотношения выполняются в случае

$$4\eta \ll 1. \quad (40)$$

Неравенство (40) является критерием необходимости учета обратного электроосмотического вращения, создаваемого на электродах напряжением. Это явление, как и электроосмотическое давление [9–11], следует понимать как разновидность электрокинетического торможения. Оно может характеризоваться отношением  $q^\infty / q^0$ ; где  $q^\infty$  – объемная скорость жидкости через щелевой капилляр, вызванная потенциалом течения при действии обратноосмотического вращения. Если предположить, что электрокинетическое торможение при  $\Delta U = 0$  ( $R_{E,P} = 0$ ) отсутствует, то, как следует из определения  $q^0$ ,  $q^\infty$  и (40),

$$\frac{q^0}{q^\infty} = \frac{R_{H,C}^\infty}{R_{H,C}^0} = 1 + S^2 R_{H,C}^0 R_{E,C}^\infty. \quad (41)$$

Из (34) и (41) получаем зависимость максимального КПД от  $q^0 / q^\infty$ :

$$\eta_0 = \frac{1 - \sqrt{q^0 / q^\infty}}{1 + \sqrt{q^0 / q^\infty}}. \quad (42)$$

Значение  $\eta_0$  монотонно возрастает с увеличением электрокинетического торможения. В электрическую энергию преобразуется только та часть механической, которая идет на преодоление сил генерированного электрического поля. При отсутствии обратного осмоса вся энергия потока рабочей жидкости переходит в тепловую энергию вязкого трения и, согласно (34),  $\eta_0 \rightarrow 0$ . В противном случае (возможном лишь гипотетически)  $\eta_0 \rightarrow 1$ . При этом обратный электроосмос останавливает движение жидкости через капилляр, а выходная электрическая мощность,

согласно (28), стремится к нулю. Максимально достижимый КПД ЭКПр при сдвиговом потоке из-за сложностей реализации будет меньше значения КПД, достигаемого при мембранном преобразовании (не более 1%) [12]. Следовательно, для предложенных ЭКПр практически выполняются соотношения (37)–(39).

В случае одновременного электрокинетического преобразования давления и вращения феноменологические уравнения можно записать в виде

$$q = a_{11} \Delta P + a'_{11} \Delta N + a_{12} \Delta U; \quad (43)$$

$$I = a_{21} \Delta P + a'_{21} \Delta N + a_{22} \Delta U. \quad (44)$$

На основе системы уравнений из [4] уравнения (43), (44) могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} q &= -S' \Delta N + \frac{\Delta P}{R_{H,C}^0} - S \Delta U = \\ &= q_{\Delta N} + q_{\Delta P} - q_{back}; \end{aligned} \quad (45)$$

$$\begin{aligned} I &= -S'' \Delta N - S \Delta P + \frac{\Delta U}{R_{E,C}^0} = \\ &= I_{\Delta N} + I_{\Delta P} - I_{back}, \end{aligned}$$

где

$$R_{H,C}^0 = \frac{\eta c}{2h^2};$$

$S, S', S''$  – коэффициенты преобразования,

$$S = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 h (\zeta_1 + \zeta_2) (1 - (G_1 + G_2))}{c \eta};$$

$$S' = \frac{3\eta}{2h^3};$$

$$S'' = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\zeta_1 - \zeta_2) (1 - (G_1 + G_2))}{c \eta};$$

$$R_{E,C}^0 = \frac{cL}{2h\lambda(1 - (G_1 + G_2))};$$

$q_{\Delta N}, q_{\Delta P}$  – объемные скорости жидкости при  $\Delta P = 0, \Delta U = 0$  и  $\Delta N = 0, \Delta U = 0$  соответственно;  $I_{\Delta N}$  и  $I_{\Delta P}$  – электрокинетический ток при замкнутых электродах при наличии  $\Delta N$  или  $\Delta P$ . Схема замещения на основе системы уравнений (45) показана на рис. 4.

В ЭКПр с двумя щелевыми капиллярами (рис. 5) воздействие на систему сдвига и  $\Delta P$  для каждого из капилляров будет разнонаправленным. Это можно использовать для получения

дополнительной информации о электрокинетических свойствах исследуемой системы. При измерении методом тока течения с учетом малости обратного электроосмотического потока ( $(a_{22} + b_{22})\Delta U \rightarrow 0$ ) уравнение (44) может быть записано для первой ( $I_I$ ) и второй ( $I_{II}$ ) пар электродов:

$$I_I = I_{\Delta P} + I_{\Delta N}; \quad (46)$$

$$I_{II} = I_{\Delta P} - I_{\Delta N}, \quad (47)$$

где  $I_{\Delta P} = a_{21}\Delta P$ ;  $I_{\Delta N} = a_{21}'\Delta N$ .

После соответствующего преобразования можно получить

$$a_{21} = I_I + \frac{I_{II}}{2\Delta P}; \quad (48)$$

$$a_{21}' = I_I - \frac{I_{II}}{2\Delta N}. \quad (49)$$

**Заключение.** Феноменологический подход к электрокинетическим процессам в преобразователе на эффекте сдвига позволил получить схемы замещения ЭКПр для токового и потенциального режимов по постоянному и переменному сигналам.

Схема замещения измерительного преобразователя дает возможность осуществить анализ взаимодействия физических процессов в ЭКПр с измерительной схемой. Наличие перепада давления между входным и выходным патрубками может приводить к различию сигналов на измерительных электродах на противоположных сторонах преобразователя.

### Список литературы

1. Гринюк Д. А., Кузьмицкий И. Ф., Оробей И. О. Первичный преобразователь для измерения электрокинетических характеристик // Приборы и техника эксперимента. 1998. № 3. С. 124–127.
2. Преобразователи электрокинетического потенциала гидродисперсных систем / Д. А. Гринюк [и др.] // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 106–110.
3. Electrokinetic Converter using AN Unsteady Shift: A Quantitative Model / D. Hryniuk [at al.] // Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream). Vilnius, Lithuania, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2019.8732159.
4. Математическая модель формирования измерительного сигнала в электрокинетическом преобразователе переменного сдвига / Д. А. Гринюк [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2019. № 2 (224). С. 58–65.
5. Лидоренко Н. С., Ильин Б. И., Зайденман И. А. Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
6. Лепендин Л. Ф. Акустика. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
7. Электрохимические преобразователи первичной информации / В. С. Боровков [и др.]. М.: Машиностроение, 1969. 199 с.
8. Остерле Д. Электрокинетическое преобразование энергии // Прикладная механика, 1964. № 2. С. 3–6.
9. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. СПб.: Химия, 1995. 400 с.
10. Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potential / S. Levine [at al.] // Journal of colloid and interface science. 1975. Vol. 52, no. 1. P. 136–149.
11. Чураев Н. В., Дерягин Б. В. К теории электрокинетических явлений в тонких слоях растворов электролитов // ДАН СССР. 1966, 169. № 2. С. 716–721.
12. Касим-Заде М. С., Халилов Р. Ф., Балашов А. Н. Электрокинетические преобразователи информации. М.: Энергия, 1973. 136 с.

### References

1. Hryniuk D. A., Kuzmitsky I. F., Orobei I. O. Primary transducer for measuring electrokinetic characteristics. *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 1998, no. 3, pp. 124–127 (In Russian).
2. Hryniuk D. A., Bogoslav N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O., Orobei O. I. Converters of the electrokinetic potential of hydrodispersed systems. *Izvestiya TulGU* [Izvestiya TulGU], 2011, no. 3, pp. 106–110 (In Russian).
3. Hryniuk D., Orobei I., Oliferovich N., Suhorukova I. Electrokinetic Converter using AN Unsteady Shift: A Quantitative Model. *Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream): Open Conference*. Vilnius, 2019, pp. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2019.8732159.
4. Hryniuk D. A., Oliferovich N. M., Orobei I. O., Suhorukova I. G. Mathematical model of formation of measuring signal in electrokinetic converter of variable shift. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2019, no. 2 (224), pp. 58–65 (In Russian).
5. Lidorenko N. S., Il'in B. I., Zajdenman I. A. *Vvedeniye v molekulyarnuyu elektroniku* [Introduction to Molecular Electronics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1978. 448 p. (In Russian).

6. Lependin L. F. *Akustika* [Acoustics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1984. 320 p.
7. Borovkov V. S., Grafov B. M., Dobrynin E. M. et al. *Elektrokhimicheskiye preobrazovately pervichnoy informatsii* [Electrochemical converters of primary information]. Moscow, Engineering Publ., 1969. 199 p. (In Russian).
8. Osterle D. Electrokinetic energy conversion. *Prikladnaya mekhanika* [Applied mechanics], 1964, no. 2, pp. 3–6 (In Russian).
9. Fridrihsberg D. A. *Kurs kolloidnoy khimii* [Colloid chemistry course]. St. Petersburg, Khimiya Publ., 1995. 400 p. (In Russian).
10. Levine S., Marriot J., Neale G., Epstein N. Theory of electrokinetic flow in fine cylindrical capillaries at high zeta-potential. *Journal of colloid and interface science*, 1975, vol. 52, no. 1, pp. 136–149.
11. Churaev N. V., Deryagin B. V. On the theory of electrokinetic phenomena in thin layers of electrolyte solutions. *DAN SSSR* [Reports of the Academy of Sciences of the USSR], 1996, vol. 169, no. 2, pp. 716–721 (In Russian).
12. Kasim-Zade M. S., Halilov R. F., Balashov A. N. *Elektrokineticheskiye preobrazovately informatsii* [Electrokinetic information converters]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 136 p. (In Russian).

### Информация об авторах

**Гринюк Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

**Олиферович Надежда Михайловна** – ассистент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: oliferovich@belstu.by

**Сухорукова Ирина Геннадьевна** – старший преподаватель кафедры программной инженерии. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina\_x@rambler.ru

**Егорова Анна Леонидовна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: a\_l\_egorova@mail.ru

**Оробей Игорь Олегович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.

**Карпук Павел Олегович** – студент. Белорусский государственный технологический университет. E-mail: pavel228321@gmail.com

### Information about the authors

**Hryniuk Dzmitry Anatol'yevich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

**Oliferovich Nadezhda Mikhaylovna** – Assistant Lecturer, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: oliferovich@belstu.by

**Suhorukova Irina Gennad'yevna** – Senior Lecturer, the Department of Software Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina\_x@rambler.ru

**Egorova Anna Leonidovna** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a\_l\_egorova@mail.ru

**Orobei Igor Olegovich** – PhD (Engineering), Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

**Karpuk Pavel Olegovich** – Student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pavel228321@gmail.com

Поступила после доработки 03.02.2023