

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 621.3.011.712

Д. А. Гринюк, Д. С. Карпович, Н. М. Олиферович,
И. Г. Сухорукова, И. О. Оробей, М. В. Чепурко
Белорусский государственный технологический университет

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА СДВИГОВОМ ПОТОКЕ С ПЕРЕМЕННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ СИГНАЛОМ

В статье с использованием результатов предыдущей работы расширяется анализ схемы замещения измерительного преобразователя электрокинетического потенциала на область переменных значений. Поскольку работа измерительных преобразователей основана на контактном методе измерения тока и напряжения в водном растворе с помощью электродной системы, следует учитывать электрохимические процессы, которые происходят в электродной системе. Делается вывод, что именно электродная система во многом определяет динамические характеристики измерительного канала. Для отражения динамически свойств принят типовой слаботочный вариант схемы замещения электродной системы.

Для рассмотренного варианта измерительного преобразователя могут наблюдаться сложные распределения движения заряженных частиц вследствие наличия одновременно двух источников энергии. Токи утечки между ними могут способствовать искажению измерительных потенциалов при пересчете измерительных потенциалов в электрокинетический потенциал. Сделан вывод, что токи утечки могут повлиять на граничные частоты рабочего диапазона измерительного преобразователя. Для измерительного преобразователя, который будет работать на низких частотах, предложен вариант схемы замещения для низких и инфранизких частот.

Проложенные конструкции измерительных преобразователей характеризуются сложной геометрией участка протекания токов утечек. Для варианта подвижного элемента преобразователя в виде цилиндра с сечения параллельно оси цилиндра получена формула, которая связывает параметры измерительной ячейки с эквивалентным сопротивлением в схеме замещения.

Ключевые слова: схема замещения, электрокинетический потенциал, переменный ток течения.

Для цитирования: Гринюк Д. А., Карпович Д. С., Олиферович Н. М., Сухорукова И. Г., Оробей И. О., Чепурко М. В. Схема замещения электрокинетического преобразователя на сдвиговом потоке с переменным измерительным сигналом // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2024. № 1 (278). С. 43–51.

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-7.

D. A. Hryniuk, D. S. Karpovich, N. M. Oliferovich,
I. G. Suhorukova, I. O. Orobei, M. V. Chepurko
Belarusian State Technological University

SUBSTITUTION CIRCUIT OF ELECTROKINETIC CONVERTER ON SHEAR FLOW WITH AN ALTERNATIVE MEASUREMENT SIGNAL

In the article, using the results of previous work, the analysis of the substitution circuit of the electrokinetic potential measuring transducer is expanded to the range of variable values. Since the operation of measuring transducers is based on the contact method of measuring current and voltage in an aqueous solution using an electrode system, the electrochemical processes that occur in the electrode system should be taken into account. It is concluded that it is the electrode system that largely determines the dynamic characteristics of the measuring channel. To reflect the dynamic properties, a typical low-current substitution circuit of the electrode system is adopted.

For the considered version of the measuring transducer, complex distributions of motion of charged particles can be observed due to the simultaneous presence of two energy sources. Leakage currents between them can contribute to distortion of the measuring potentials when converting the measuring potentials into electrokinetic potential. It is concluded that leakage currents can affect the limiting frequencies of the operating range of the measuring transducer. For a measuring transducer that will operate at low frequencies, an substitution circuit option for low and infra-low frequencies is proposed

The laid structures of measuring transducers are characterized by the complex geometry of the area where leakage currents flow. For the version of the moving element of the converter in the form of a cylinder with a cross section parallel to the cylinder axis, a formula is obtained that relates the parameters of the measuring cell with the equivalent resistance in the equivalent circuit.

Keywords: substitution circuit, electrokinetic potential, alternating current flow.

For citation: Hryniuk D. A., Karpovich D. S., Oliferovich N. M., Suhorukova I. G., Orobei I. O., Chepurko M. V. Substitution circuit of electrokinetic converter on shear flow with an alternative measurement signal. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematic. Informatics*, 2024, no. 1 (278), pp. 43–51 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-6141-2024-278-7.

Введение. Схемы замещения являются элементом исследования электрокинетических явлений в многофазных микро- и наносистемах [1–3], которые активно используются для современного химического и биологического анализа. Вопросы схем замещения всегда являются актуальными при анализе систем, в которых происходят преобразования энергии в электрическую из других видов [4–7]. В связи с развитием методов анализа с помощью математического моделирования происходит дальнейшее развитие данного направления. Продолжением этого вопроса является получение схемы замещения для построения измерительных преобразователей [8–13]. В предыдущей работе [14] произведена попытка построения схемы замещения при возникновении электрокинетических явлений в сдвиговом потоке. Однако наиболее актуально изучение схем замещения для измерительных преобразователей с переменным сигналом. В [15–18] было показано, что измерительный преобразователь электрокинетического потенциала целесообразно строить путем формирования переменного измерительного потенциала течения.

Кроме оценки преобразования эффекта электрокинетических явлений в электрический сигнал, весьма существенна проблема необходимости учитывать свойства электродной системы для измерения потенциала (тока) течения или генерации

электрического воздействия для переменного электроосмоса. При постоянных значениях электрических параметров проблема обусловлена в основном поляризацией электродов и относительно легко может быть учтена алгоритмом работы и подбором материалов электродов. При переменном измерительном сигнале или воздействии могут сильно проявляться емкостные и индуктивные эффекты электродных систем [3, 9, 11, 13, 19].

Учет наличия переменного сигнала. Определим коэффициент преобразования момента вращения в электрическое напряжение $\underline{\Delta U}$ по переменному сигналу

$$\underline{\Delta N} = \sum_{k=0}^{\infty} \Delta N_k e^{j\omega k t}. \quad (1)$$

В этом случае необходимо учесть шунтирующее влияние междуэлектродной емкости $C_{E,C}$, емкости проводов C_L и входной емкости предварительного усилителя C_A . Эти емкости, включенные параллельно нагрузочному сопротивлению, увеличивают обратные токи утечки. В эквивалентную электрическую цепь преобразующего элемента по сравнению со случаем постоянного течения жидкости добавляются дополнительные элементы $C_{E,P}$ и $C_{E,C}$ (рис. 1), причем

$$C_{E,P} = C_L + C_A. \quad (2)$$

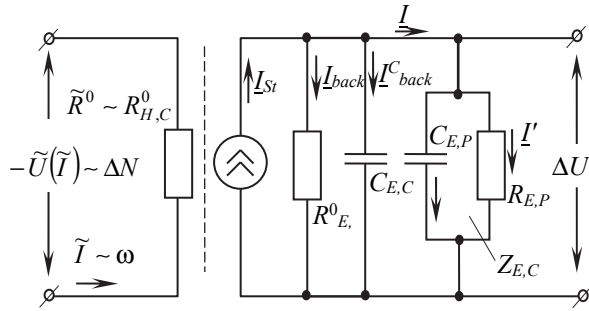


Рис. 1. Простейшая эквивалентная электрическая цепь преобразующего элемента в случае переменного тока течения жидкости

Как было показано в исследованиях [14], величина тока формируется одновременно наличием сдвига ΔN и падения напряжения в капилляре ΔU :

$$I = S\Delta U - \frac{\Delta N}{R_{E,C}^0}. \quad (2a)$$

Выражение для тока преобразуется к виду

$$\underline{I} = \underline{I}_{back}^c + \underline{I}^c + \underline{I}', \quad (3)$$

где $\underline{I}_{back}^c, \underline{I}_{back}, \underline{I}'$ – обратные токи утечки, вызванные потерями цепи.

В свою очередь они могут быть определены как:

$$\underline{I}_{back}^c = \Delta U j\omega C_{E,C}; \quad (4a)$$

$$\underline{I}^c = \Delta U j\omega C_{E,P}; \quad (4б)$$

$$\underline{I}' = \Delta U / R_{E,P}. \quad (4в)$$

Уравнения (2а), (3) и (4а–4в) образуют замкнутую систему. Подставив значения токов из (3), (4а–4в) в (2а) с заменой $I, \Delta N, \Delta U$ комплексными изображениями $\underline{I}, \underline{\Delta N}, \underline{\Delta U}$ при $R_{E,C}^0 = R_{E,C}^\infty = R_{E,C}$, получим:

$$\underline{\Delta U} = \frac{SR_{E,P}R_{E,C}\underline{\Delta N}e^{j\omega t}}{R_{E,P} + R_{E,C} + j\omega(C_{E,C} + C_{E,P})R_{E,P}R_{E,C}}. \quad (5)$$

Если $\underline{\Delta U}$ представить в виде

$$\underline{\Delta U} = \sum_{k=0}^{\infty} \underline{\Delta U}_k e^{j(k\omega t + \Psi_k)}, \quad (6)$$

то коэффициент преобразования сдвига в напряжение по первой гармонике

$$\frac{\underline{\Delta U}}{\underline{\Delta N}} = \frac{\Delta U e^{j\Psi}}{\Delta N}. \quad (7)$$

Выделяя модуль и аргумент комплексного выражения правой части (7), получаем абсолютный коэффициент преобразования напряжения сдвига в электрическое напряжение при любом нагрузочном сопротивлении:

$$\frac{\Delta U}{\Delta N} = \frac{SR_{E,P}R_{E,C}}{\sqrt{(R_{E,P} + R_{E,C})^2 + \omega^2(C_{E,C} + C_{E,P})^2 R_{E,P}R_{E,C}}}. \quad (8)$$

и выражение для сдвига фаз Ψ между $\underline{\Delta U}$ и $\underline{\Delta N}$ при $S > 0$

$$\Psi = -\pi - \arctg\left(\frac{\omega(C_{E,C} + C_{E,P})R_{E,P}R_{E,C}}{R_{E,P} + R_{E,C}}\right). \quad (9)$$

В потенциальном режиме ($R_{E,C} \ll R_{E,P}$) с электродов снимается максимальное электрическое напряжение. При гармонических сигналах $S_{\Delta U} = \Delta U / \Delta P$. Из (8) и (9) следует выражение для чувствительности ЭКПР по напряжению

$$S_{\Delta U} = \frac{SR_{E,C}}{\sqrt{1 + (f/f_{H,C})^2}}; \quad (10)$$

$$\Psi = -\pi - \arctg\left(\frac{f}{f_{H,C}}\right), \quad (11)$$

где

$$f_{H,C} = \frac{1}{2\pi(C_{E,C} + C_{E,P})R_{E,C}}. \quad (12)$$

Коэффициент преобразования напряжения сдвига на щелевом капилляре для потенциального режима $S_{\Delta U}$ из-за влияния межэлектродной емкости, электрической емкости проводов и входной емкости электронного усилителя начинает уменьшаться с увеличением частоты при частотах, соизмеримых с $f_{H,C}$ (верхней частотой, при которой происходит спад $S_{\Delta U}$ на уровень $\sqrt{2}$ из-за емкостных утечек). Амплитудная переходная характеристика электрокинетической системы представляет собой функцию

$$\frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{H,C})^2}},$$

а частотная погрешность преобразования – функцию [19]

$$\delta^{St} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_{H,C})^2}}. \quad (13)$$

Формулу (10) для коэффициента преобразования с учетом (13) можно записать в виде

$$S_{\Delta U} = SR_{E,C} (1 - \delta^{St}). \quad (14)$$

В потенциальном режиме в области низких частот амплитудная переходная характеристика

электрокинетической системы имеет плоский параллельный оси абсцисс участок начиная с $f=0,1$. На этом участке $\delta^{St} \ll 1$ и

$$S_{\Delta U} = SR_{E,C}. \quad (15)$$

В соотношениях (10), (14) и (15) $S_{\Delta U}$, так же как и S , представляет собой абсолютное значение коэффициента преобразования.

В токовом режиме (когда $R_{E,P} \ll R_{E,C}$) шунтирующие емкости не влияют на коэффициент преобразования сдвига в электрический ток

$$\underline{S}_I = \frac{I}{\Delta N}.$$

При переменном течении по синусоидальному закону последнее соотношение имеет вид

$$\underline{S}_I = S. \quad (16)$$

В общем случае в электрокинетических преобразователях (ЭКПр) предполагается наличие двигателя с регулируемой частотой вращения передающего элемента (редуктора) и подвижного элемента. Движение жидкости в первичных преобразователях можно рассматривать как движение твердого тела. Для разработанного преобразователя в процессе измерения момент сопротивления и частота вращения постоянны и не влияют на информативный сигнал. Кроме того, номинальный момент значительно превосходит момент сопротивления, и рабочий диапазон частоты находится в пределах 0,25–5,00 Гц. Поэтому для ЭКПр с подвижным элементом, имеющим в сечении эллипс, влияние динамических свойств механической части на электрокинетическое преобразование несущественно [18].

В случае формирования на электродах негармонического сигнала необходим учет влияния диффузии заряженных ионов на ионный ток, что несколько усложняет схему замещения.

Перенос вещества к измерительным электродам и от них осуществляется по трем основным механизмам:

- диффузией I_D за счет разности концентраций вещества вблизи электродов и в объеме раствора;
- миграцией I_V ионов под действием электрического поля;
- конвекцией I_C , т. е. потоком жидкости, возникающим под механическим воздействием или при градиенте плотности жидкости в поле гравитационных сил.

При низких частотах электрический ток в ЭКПр переносится как путем миграции ионов в электрическом поле, так и путем их диффузии. При измерении чаще всего отсутствует избыток индифферентного электролита, поэтому миграция и диффузия являются единым токообразующим процессом. Для качественной оценки

влияния диффузии на ионный ток в эквивалентную цепь ЭКПр вводят последовательно соединенные электрические сопротивления $Z_{M,E}$, ответственные за миграцию ионов в электрическом поле, и электрическое сопротивление диффузии Z_D . Такое представление связано с тем, что при прохождении ионного тока между электродами создается электрическое напряжение, которое складывается из омических $\Delta U_{M,E}$ и диффузных ΔU_D потерь. Из-за изменения формы капилляра при прохождении подвижным элементом зоны измерения $\Delta U_{M,E}$ существенно меняется. Поскольку ΔU_D обусловлено накоплением диффундирующих избыточных униполярных заряженных ионов [21] и является интегральной функцией от ионного тока I , отстающей от I по фазе, в токовом режиме сопротивление

$$Z_D = R_D + jX_D$$

является функцией угла поворота ротора. Схема замещения, учитывающая изложенные соображения, приведена на рис. 2.

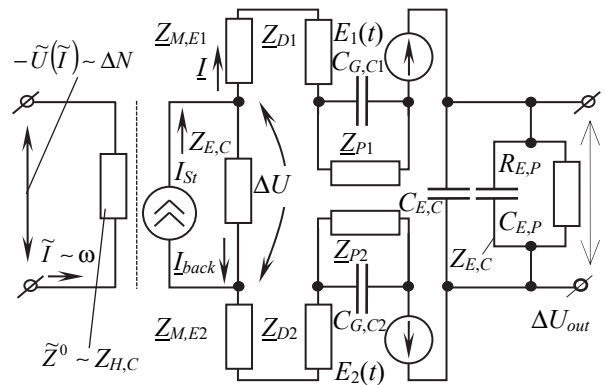


Рис. 2. Эквивалентная электрическая цепь преобразующего элемента в случае переменного тока течения жидкости при измерении по методу потенциала течения

В потенциальном режиме, когда нагрузочное сопротивление много больше, чем $Z_{E,C}$, $Z_{H,C}$, $Z_D(\omega)$, $Z_P(\omega)$, $1/\omega C_{E,P}$, последние элементы могут быть исключены из цепи (рис. 3). В токовом режиме, когда $R_{E,P}$ много меньше, чем $Z_{E,C}$, $1/\omega C_{E,P}$, $1/\omega C_{E,C}$, эти элементы (рис. 4) могут влиять на переходную характеристику ЭКП. В цепи на рис. 4 гальванические потенциалы $E_1(t)$, $E_2(t)$, обуславливающие возникновение потенциала асимметрии электродов, по теореме об эквивалентном генераторе заменены источниками тока $I_{E1}(t)$, $I_{E2}(t)$, причем

$$I_{E1} = \frac{1 + j\omega C_{G,C1} Z_{P1}}{Z_{P1}} E_1(t); \quad (17)$$

$$I_{E2} = \frac{1 + j\omega C_{G,C2} Z_{P2}}{Z_{P2}} E_2(t). \quad (18)$$

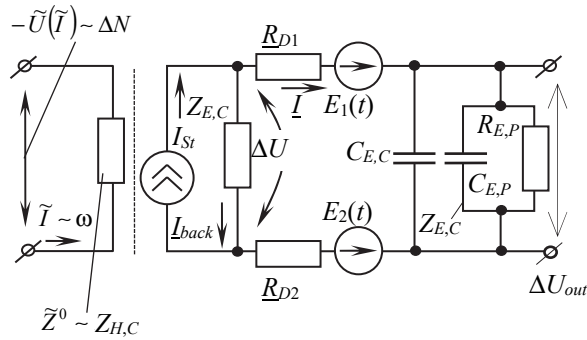


Рис. 3. Эквивалентная электрическая цепь преобразующего элемента по переменному сигналу при измерении методом потенциала течения для низких и инфранизких частот

В процессе измерения электрокинетического потенциала методом тока течения необходимо обеспечить выполнение условия измерения тока течения:

$$DD = \text{Re}(Z_{M,E1} + Z_{M,E2} + Z_{D1} + Z_{D2} + Z_{P1} + Z_{P2} + R_{E,P}) \ll \text{Re}(Z_{E,C}) \quad (19)$$

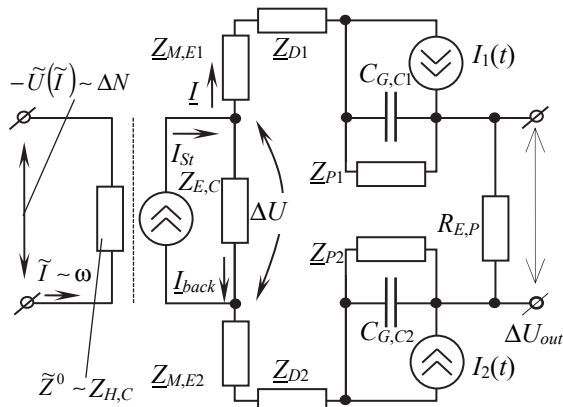


Рис. 4. Эквивалентная электрическая цепь преобразующего элемента в случае переменного тока течения жидкости при измерении по методу тока течения

При исследовании реальных сред все сопротивления, кроме $R_{E,C}$, будут изменяться в процессе эксплуатации в основном в сторону увеличения. Наибольшей способностью к увеличению своего сопротивления на низких частотах обладают сопротивления Z_P вследствие загрязнения поверхности электродов. Фирмы, выпускающие приборы SCD, встраивают периодическую ультразвуковую очистку электродов и дополнительную калибровку прибора в процессе эксплуатации.

Поскольку различные дисперсные среды по-разному выводят поверхность электродов из допустимого для измерений состояния, то можно рекомендовать несколько алгоритмов оценки степени загрязнения электродов. Один из методов

оценки осуществляется периодическим включением в цепь измерения последовательного резистора $R_{E,P}^*$ с сопротивлением в N раз большим, чем $R_{E,P}$. При увеличении сигнала в $N + 1$ раз состояние электродов можно считать удовлетворительным. $R_{E,P}^*$ необходимо выбирать из предположения, что

$$\frac{R_{E,P}^* + \max(DD)}{\max(Z_{E,P})} > S_{\Delta I}, \quad (20)$$

где $S_{\Delta I}$ – чувствительность схемы измерения; $\max(DD)$ – максимально допустимое сопротивление DD ; $\max(Z_{E,P})$ – максимальное возможное внутреннее сопротивление источника тока течения.

Другой метод оценки осуществляется периодическим кратковременным измерением сопротивления с помощью включения в цепь измерительного сопротивления источника переменного электрического сигнала.

Емкости электродов $C_{G,C1}$ и $C_{G,C2}$ имеют порядок десятков микрофард на квадратный сантиметр. В реальных средах они могут изменяться в широких пределах под воздействием минеральных и поверхностно-активных веществ. Межэлектродная емкость $C_{E,C}$ характеризует конденсатор, состоящий из электродов ЭКПр, между которыми находится диэлектрик в виде слоя жидкости. $C_{E,C}$ с достаточной для практики точностью можно определить по формуле

$$C_{E,C} = \frac{kS_0\epsilon}{c}, \quad (21)$$

где S_0 – эффективная площадь электрода; k – коэффициент, определяемый положением ротора (максимален на рис. 5, а, минимален на рис. 5, б).

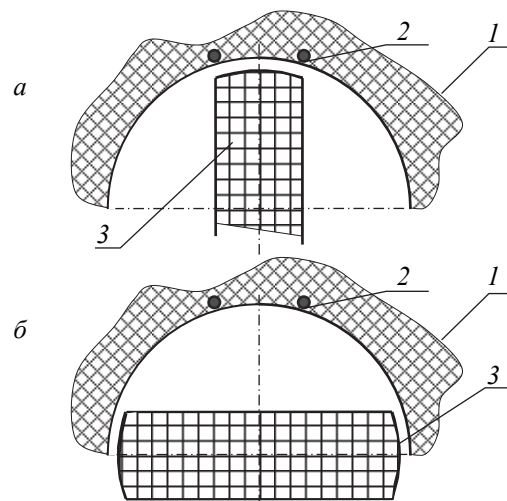


Рис. 5. Влияние расположения подвижного элемента на электродную систему: а – максимальное влияние; б – минимальное; 1 – корпус; 2 – электрод; 3 – подвижной элемент

Сопротивление $Z_{E,C}$ можно условно разделить на две части, характеризующие разные потоки: 1) обратноосмотический поток, проходящий по щелевому капилляру (точки A и B на рис. 6); 2) поток между двумя соседними капиллярами (точки A и C на рис. 6). Влияние I_{back2} на процесс измерения сказывается при сравнимости сопротивлений между точками A, B и A, C , т. е.:

$$\frac{1}{Z_{E,C}} = \frac{1}{Z_{E,C1}} + \frac{1}{2R_{E,C2} + Z_{E,C2}}, \quad (22)$$

где $Z_{E,C1}, Z_{E,C2}$ – сопротивления между точками A и B, C и D соответственно; $R_{E,C2}$ – сопротивление между точками A и C , вычисляемое интегрированием по объему элементарных проводников между этими точками:

$$R_{E,C2} = \int_V dr = 2 \int_0^{x_1} \frac{dx}{\lambda A_0}$$

или

$$R_{E,C2} = \int_0^{x_1} \frac{1}{\lambda H (\sqrt{R^2 - x^2} - c)} dx, \quad (23)$$

где V – объем жидкости между точками A и C ; dr – сопротивление элементарного объема жидкости; A_0 – поперечное сечение проводника шириной dx ; H – высота преобразователя; c, R, x_1, h – геометрические размеры преобразователя (рис. 7).

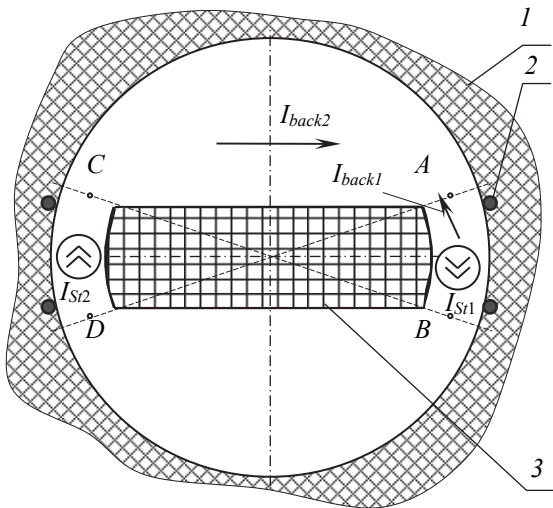


Рис. 6. Модель электрических процессов в щелевом капилляре: 1 – корпус; 2 – электрод; 3 – подвижной элемент

Координату x_1 можно определить как

$$x_1 = \left(R - \frac{h}{2}\right) \cos \alpha = \left(R - \frac{h}{2}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{c}{2(R-h)}\right)^2}. \quad (24)$$

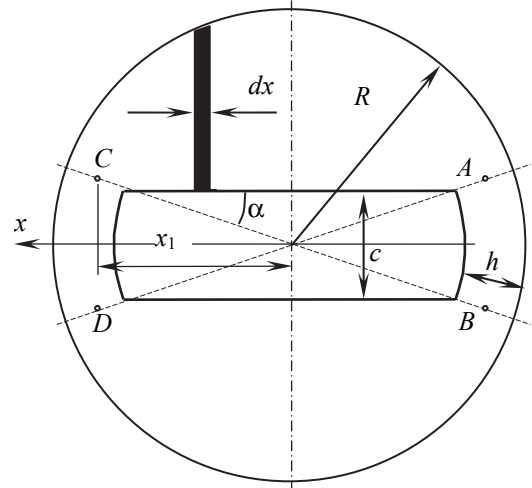


Рис. 7. Модель определения электрического сопротивления: 1 – корпус; 2 – электрод; 3 – подвижной элемент

В результате интегрирования получаем выражение:

$$R_{E,C2} = \frac{4 \left(\frac{\Lambda}{2\Psi} \ln \left(\Theta - \frac{\Psi}{\Theta} + \Psi \right) - \frac{t}{2} \right)}{H}, \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} \Lambda &= \frac{c}{2R}; \\ \Theta &= \operatorname{tg} \left(\frac{t}{2} \right) (1 - \Lambda); \\ t &= \arcsin \left(\frac{x_1}{R} \right); \\ \Psi &= \sqrt{1 - \Lambda^2}. \end{aligned}$$

Вклад поверхностной проводимости в $R_{E,C2}$ необходимо учитывать при ширине ротора, сравнимой со значением $2R$, а также для жидкостей с малой объемной, но с высокой поверхностной проводимостью и широким ДЭС, т. е.

$$Z_{E,C} = Z_{E,C1} + 2(R_{E,C2} + R_{E,C2}^0), \quad (26)$$

где

$$R_{E,C2}^0 = 2H\lambda_s \left[\sqrt{(R-h)^2 - \frac{c^2}{4}} + R(\pi - 2\alpha) \right];$$

$$\alpha = \arccos \left[\sqrt{1 - \left(\frac{c}{2(R-h)} \right)^2} \right]$$

или

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{c}{2(R-h)} \right).$$

Уровень развития теории поверхностных явлений не позволяет определить ζ -потенциал или поверхностный заряд σ на основании свойств жидкой и твердой фаз с учетом структурных факторов пористого тела. Поэтому наиболее реальный путь расчета состоит в измерении основных параметров, характеризующих ЭКП, на модельных элементах и средах и введении этих параметров в расчетные формулы для преобразователей. Такой подход дает возможность на основании небольшого числа электрокинетических измерений проводить расчет различных вариантов ЭКПр. В приближении, которое используется при получении расчетных коэффициентов преобразователя, основными параметрами являются кинетические коэффициенты в уравне-

нии переноса S , $R_{H,C}^0$, $R_{E,C}^0$ (S , $R_{H,C}$, $R_{E,C}$ при $\eta \gg 1/4$).

В некоторых работах отмечается, что для периодических процессов немаловажными являются оценка числа Рейнольдса [20], а также частотная зависимость электрокинетических явлений [13].

Заключение. Полученные решения по построению схем замещения показывают высокую зависимость качества полезного сигнала с электрокинетического преобразователя из-за электродной системы и геометрических параметров измерительного преобразователя. Более определенно можно будет утверждать после экспериментальной проверки построенного теоретического обоснования.

Список литературы

1. Ajdari A. Steady flows in networks of microfluidic channels: building on the analogy with electrical circuits // *C. R. Phys.* 2004. Vol. 5. P. 539–546.
2. Wu J. Interactions of electrical fields with fluids: laboratory-on-a-chip applications // *IET Nanobiotechnol.* 2008. Vol. 2 (1). P. 14–27.
3. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes. I. Experimental measurements / Green N. G. [et al.] // *Phys. Rev. E.* 2000. Vol. 61, issue 4. P. 4011–4018.
4. Osterle J. F. Electrokinetic Energy Conversion // *Journal of Applied Mechanics.* 1964. Vol. 31 (2). P. 161–164.
5. Morrison F. A., Osterle J. F. Electrokinetic Energy Conversion in Ultrafine Capillaries // *The Journal of Chemical Physics.* 1965. Vol. 43, issue 6. P. 2111–2115.
6. Chang C.-C., Yang R.-J. Electrokinetic energy conversion in micrometer-length nanofluidic channels // *Microfluid. Nanofluidics.* 2010. Vol. 9. P. 225–241.
7. Energy from streaming current and potential / W. Olthuis [et al.] // *Sensors and Actuators B: Chemical.* 2005. Vol. 111–112. P. 385–389.
8. Streaming potential/current measurement system for investigation of liquids confined in extended-nanospace / K. Morikawa [et al.] // *Lab Chip* 10. 2010. P. 871–875.
9. Saha P., Zenyuk I. V. Electrokinetic Streaming Current Method to Probe Polycrystalline Gold Electrode-Electrolyte Interface Under Applied Potentials // *J. Phys. Chem.* 2021. Vol. 168, issue 4. P. 19493–19505.
10. Streaming potential. Streaming potential and electroviscous effects inperiodical pressure-driven microchannel flow / L. Gong [et al.] // *Physics of Fluids.* 2008. Vol. 20, issue 46. P. 063603-1–063603-7.
11. Khademi M., Barz D. Structure of the Electrical Double Layer Revisited: Electrode Capacitance in Aqueous Solutions // *Langmuir.* 2020. Vol. 36, issue 16. P. 4250–4260.
12. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena / A. Delgado [et al.] // *Journal of Colloid and Interface Science.* 2007. Vol. 309, issue 2. P. 194–224.
13. Frequency dependent streaming potentials / P. M. Reppert [et al.] // *J. Colloid Interface Sci.* 2001. Vol. 234, issue 1. P. 194–203.
14. Схема замещения электрокинетического преобразователя на сдвиговом потоке / Д. А. Гринюк [и др.] // *Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика.* 2023. № 1 (266). С. 46–53.
15. Гринюк Д. А., Кузьмицкий И. Ф., Оробей И. О. Первичный преобразователь для измерения электрокинетических характеристик // *Приборы и техника эксперимента.* 1998. № 3. С. 124–127.
16. Преобразователи электрокинетического потенциала гидродисперсных систем / Д. А. Гринюк [и др.] // *Известия ТулГУ. Технические науки.* Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 106–110.
17. Electrokinetic Converter Using An Unsteady Shift: A Quantitative Model / D. Hryniuk [et al.] // *Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences (eStream).* Vilnius, Lithuania, 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/eStream.2019.8732159.
18. 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.

19. Лидоренко Н. С., Ильин Б. И., Зайденман И. А. Введение в молекулярную электронику. М.: Энергоатомиздат, 1984. 320 с.
20. Дамаскин Б. Б., Петрий О. А. Введение в электрохимическую электрокинетическую / под общ. ред. А. Н. Фрункина. М.: Высшая школа, 1975. 416 с.

References

1. Ajdari A. Steady flows in networks of microfluidic channels: building on the analogy with electrical circuits. *C. R. Phys*, 2004, vol. 5, pp. 539–546.
2. Wu J. Interactions of electrical fields with fluids: laboratory-on-a-chip applications. *IET Nanobiotechnol*, 2008, vol. 2 (1), pp. 14–27.
3. Green N. G., Ramos A., González A., Morgan H., Castellanos A. Fluid flow induced by nonuniform ac electric fields in electrolytes on microelectrodes. I. Experimental measurements. *Phys. Rev. E.*, 2000. vol. 61, issue 4, pp. 4011–4018.
4. Osterle J. F. Electrokinetic Energy Conversion. *Journal of Applied Mechanics*, 1964, vol. 31 (2), pp. 161–164.
5. Morrison F. A., Osterle J. F. Electrokinetic Energy Conversion in Ultrafine Capillaries. *The Journal of Chemical Physics*, 1965, vol. 43, issue 6, pp. 2111–2115.
6. Chang C.-C., Yang R.-J. Electrokinetic energy conversion in micrometer-length nanofluidic channels. *Microfluid. Nanofluidics*, 2010, vol. 9, pp. 225–241.
7. Olthuis W., Schippers B., Eijkel J., van den Berg A. Energy from streaming current and potential. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, vol. 111–112, pp. 385–389.
8. Morikawa K., Mawatari K., Kato M., Tsukahara T., Kitamori T. Streaming potential/current measurement system for investigation of liquids confined in extended-nanospace. *Lab Chip* 10, 2010, pp. 871–875.
9. Saha P., Zenyuk I. V. Electrokinetic Streaming Current Method to Probe Polycrystalline Gold Electrode-Electrolyte Interface Under Applied Potentials. *J. Phys. Chem.*, 2021, vol. 168, issue 4, pp. 19493–19505.
10. Gong L., Wu J., Wang L., Cao K. Streaming potential. Streaming potential and electroviscous effects inperiodical pressure-driven microchannel flow. *Physics of Fluids*, 2008, vol. 20, issue 46, pp. 063603-1–063603-7
11. Khademi M., Barz D. Structure of the Electrical Double Layer Revisited: Electrode Capacitance in Aqueous Solutions. *Langmuir*, 2020, vol. 36, issue 16, pp. 4250–4260.
12. Delgado A., González-Caballero F., Hunter R., Koopal L., Lyklema J. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, vol. 309, issue 2, pp. 194–224.
13. Reppert P. M., Morgan F. D., Lesmes D. P. and Jouniaux L.. Frequency dependent streaming potentials. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2001, vol. 234, issue 1, pp. 194–203.
14. 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. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, issue 3, Physics and Mathematic. Informatics, 2023, no. 1 (266), pp. 46–53 (In Russian).
15. 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).
16. 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).
17. 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.
18. 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).
19. Lidorenko N. S., Il'in B. I., Zajdenman I. A. *Vvedeniye v molekulyarnuyu elektroniku [Introduction to Molecular Electronics]*. Moscow, *Vysshaya shkola Publ.*, 1978. 448 p. (In Russian).
20. Damaskin B. B. Petriy O. A. *Vvedeniye v elektrokhimicheskuyu elektrokinetiku [Introduction to electrochemical electrokinetics]*. Ed. by A. N. Frunkin. Moscow, *Vysshaya shkola Publ.*, 1975. 416 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

Карпович Дмитрий Семенович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: karpovich@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

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.

Чепурко Матвей Вячеславович – студент. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: matvey.chepurko@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

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

Oliferovich Nadezhda Mikhailovna – 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

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

Chepurko Matvey Vyacheslavovich – student. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matvey.chepurko@gmail.com

Поступила после доработки 15.11.2023