Журнал Формирующихся Направлений Науки номер 15-16(5), стр. 143-150, 2017 ©Авторы, 2017 статья получена: 31.07.2017 статья принята к публикации: 09.08.2017 http://www.unconv-science.org/n15/kernbach3 ©Association of Unconventional Science, 2017

Шкала Вернадского о метрологии ЭИС в частотно-временной области

С.Кернбах, И.Куксин, О.Кернбах, А.Кернбах

Аннотация—В работе рассматриваются вопросы метрологии электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) в частотно-временной области, в частности выбор шкал и единиц измерений. Проводится анализ выбора безразмерных, $func(t)^{-1}$ или $func(f,t)^{-1}$ величин по отношению к стационарности измерительного процесса. Описан метод легко воспроизводимой калибровки ЭИС приборов для стандартизации подобных измерений. Показаны примеры измерений при воздействии как физическими и биологическими объектами, так и окружающей среды на жидкостную ячейку. Предлагается поддержать название внесистемной шкалы измерения слабых излучений именем ак. Вернадского.

I. Введение

Электрохимическая импедансная спектроскопия (ЭИС) это широко известный метод физикохимического анализа в лабораторных, полевых и промышленных условиях [1], [2]. Первые применения этого метода для измерений слабых излучений относятся к 80м годам [3]. В настоящее время ЭИС продолжает развиваться дальше, в частности,



Рис. 1. Внешний вид дифференциального ЭИС спектрометра: 1, 2, 3 – элементы прибора; 4, 5 – электроды канала 1 и 2.

Cybertronica Research, Research Center of Advanced Robotics and Environmental Science, Melunerstr. 40, 70569 Stuttgart, Germany, контактный автор: serge.kernbach@cybertronica.de.com

разрабатывается импедансная спектроскопия не только в частотной области, но также и в частотновременной области. Подобные ЭИС измерения проводятся при длительной подаче электрических возбуждения жидкостную тестовую сигналов в извлекая при этом электроды из систему. не измерительных контейнеров, Рис.1. В этом CM. методе сенсорным элементом является не только физико-химические свойства жидкостей, но И само электрохимическое взаимодействие во время измерения, которое имеет квантовые механизмы на уровне образования ионов и протонной проводимости [4], [5], [6]. Данная методология позволяет значительно повысить чувствительность и разрешение сенсора, а также минимизировать помехи.

Измерения в частотно-временной области расширяют парадигму ЭИС для исследования стационарности жидкостных систем. В этом случае принято рассматривать измерительную систему как линейную стационарную систему для малых сигналов в дискретные моменты времени [7]. Для анализа используется как метод частотного отклика (FRA), так обработка RMS сигналов возбуждения и отклика ячейки (см. [8]). Оба метода реализованы в ЭИС приборе и методологии измерений.

Частотно-временной метод ЭИС де факто вводит новую шкалу и требуется рассмотреть вопросы метрологического обеспечения этих измерений. В первую очередь возникает вопрос о шкале измерений и методе калибровки ЭИС приборов. В дальнейших разделах анализируется применение безразмерных, $func(t)^{-1}$ или $func(f,t)^{-1}$ величин. Как мы полагаем, все три варианта отражают один и тот же принцип относительного измерения (в уже описанной шкале относительных измерений [9]). Поскольку ак. Вернадский одним из первых исследователей, еще в 1931 г. [10], высказал идею общей единицы измерения для разнообразных слабых излучений, предлагается поддержать название этой шкалы его именем.

II. Спектроскопия в частотно-временной области

Результат ЭИС в частотно-временной области представляется тензором третьего ранга ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ с дискретными индексами k, f, t. Индексы f, t обозначают частотные

CYBRES EIS, Device ID:322016, Heat map of RMS conductivity, ch.1 (Normal Scale)



Рис. 2. Графическое представление тензора ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ (1) виде heat map, цветовая палитра RGB, измерена проводимость воды в утреннее время в частотном диапазоне $0.1\kappa\Gamma$ ц– $170\kappa\Gamma$ ц.

и временные компоненты, индекс k обозначает компоненты ЭИС анализа (магнитуда, фаза, корреляция, реальные и мнимые части FRA и т.д), см. [11] о тензорной записи. Размерность ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ вызывает трудности

его представления, одной из возможностей являются графики *heat map*, где t, f расположены на осях x, y, а цветовую шкалу представляет один из k, см. Рис. 2. Тензор ${}^k\Upsilon^f_t$ в покомпонентной форме имеет вид

Тензор ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ структурирован по индексам t для областей до и после воздействия во времени t_{m} , где

$$A: {}^{k} \Upsilon^{f}_{t} \to t < t_{m}, \tag{2}$$

$$B: {}^{k}\Upsilon^{f}_{t} \to t \ge t_{m}, \tag{3}$$

при *А* происходит фоновый режим спектроскопии, и при *В* режим анализа реакции объекта.

Существенным моментом поведения ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ по компонентам f является суперпозиция нелинейного отклика самой измерительной ЭИС системы U_{EIS} и отклика исследуемого объекта U_{object}

$$^{k}\Upsilon^{f=f_{0}\ldots f_{max}} = U^{f}_{EIS}U^{f}_{object}.$$
 (4)

В некоторых ЭИС системах [12] предполагается линейный характер U_{EIS}^{f} по f и применяется калибровка смещения для $f = f_0...f_{max}$, приводящая U_{EIS}^{f} к единице для всех f. Однако реальные свойства U_{EIS}^{f} отличаются нелинейностью, поэтому неприятным эффектом (4) является нелинейная чувствительность, проявляющаяся в разных масштабных шкалах для каждой из f. Этот эффект хорошо виден на Рис. 2, где разница между f значительно больше, чем вариация сигнала внутри одной f.

Поведение ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ по компонентам t отличается нелинейностью, обусловленную тем фактом, что ЭИС взаимодействует с исследуемым объектом

$${}^{k}\Upsilon_{t=t_{0}\ldots t_{max}} = O_{t}^{EIS}\left(O_{t}^{object}, t\right).$$

$$(5)$$

Примером такого взаимодействия является автопротолиз, где присутствие внешнего электрического поля делает неравновесным диссоциацию и рекомбинацию H_3O^+ и H^- [13]. Как упоминалось выше, механизм

CYBRES EIS, Device ID:322016, Heat map of RMS conductivity, ch.1 (Vernadsky Scale of Relative Measurements)



Рис. 3. Нормализованное представление тензора ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ по (8). Тот же самый график как и на Рис. 2, но представленный в шкале Вернадского, цветовая палитра HSV, разрешение $2 \cdot 10^{-3}$ URM на всю шкалу, хорошо видны утренние флюктуации проводимости на уровне 10^{-4} URM (Units of Relative Measurements), температура стабилизирована.

автопротилиза имеет квантовую природу [5] (помимо других факторов). Необходимо отметить, что (5) может включать в себя несколько разных компонентов, как например, нестационарности тестового объекта и слабого воздействия, как и нестационарность самого измерения, которые следует отличать друг от друга.

Рассмотрим один из компонентов k, представленный, например, магнитудой импеданса Z(f,t) с размерностью $Om \cdot m$. Способ его измерения в RMS анализе заключается в том, что сигнал потенциала возбуждения $V_V(f,t)$ подается в тестовую ячейку, а сигнал токового отклика $V_I(f,t)$ считывается с ячейки

$$Z(f,t) = s(f)\frac{V_V(f,t)}{V_I(f,t)},$$
(6)

где s(f) является константой ячейки, определенной как отношение площади электродов к расстоянию между ними (учитывая геометрию ячейки). Поскольку импеданс двухполюсника по определению не должен быть зависим от времени, то используется соглашение о том, что измерение (6) должно выполняться за достаточно короткое время, так чтобы нелинейная часть (5) оставалась малой и ей можно было пренебречь для данной точности измерения

$$Z(f,t) = s(f) \frac{V_V(f,t)}{V_I(f,t)} \xrightarrow[t \to 0]{} Z(f) = s(f) \frac{V_V(f)}{V_I(f)}.$$
 (7)

Чтобы уйти от нелинейности в s(f) при этом зачастую фиксируют f. Например, таким образом выполняется калибровка проводимости жидкости и константы ячейки в калибровочной жидкости. Очевидно, что (7) и (1) в какой то мере представляют разные парадигмы ЭИС, поскольку (1) влияет на стационарность физических величин, индексированных в индексе k.

III. Нормализация отклика тестовой системы

Спектроскопия в форме (1) не используется в том случае, когда структуры (2) и (3) не различаются и метод (7) является более предпочтительным. Однако в приложениях, где требуется отличать структуры (2) и (3), необходимо найти способ обойти вышеуказанные проблемы ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ в виде разномасштабности по индексу f и нарушения стационарности по индексу t. В работе [9] уже была высказана мысль о том, что структура (2) в ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ фактически представляет собой независимую физическую величину, характеризующую реакцию исследуемой системы без внешнего стимула. Чтобы уйти от разномасштабности по индексам f, предлагалось сделать ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$ в области (2) безразмерным по отношению к физическим величинам в индексах k, например, в виде

$$\varphi^A = \frac{k \Upsilon_t^{f=f_0\dots f_{max}}}{k \Upsilon_{t_0}^{f=f_0\dots f_{max}}} = func(f,t), \quad t < t_m, \qquad (8)$$

так чтобы

$$\varphi^A(f,t) \approx 1, \quad t < t_m. \tag{9}$$

Это представление показано на Рис. 3. Величина t_m выбирается так, чтобы удовлетворить (9), что реализуется в виде скользящего окна анализа. На Рис. 6 показано применение (9) к региону В (динамика после



Рис. 4. Нормализованное представление тензора ${}^{k}\varphi_{t}^{f}$ по (14) со структурами (2) (до воздействия – область А) и (3) (после воздействия – область В). Воздействие оказано биологическим объектом (касание рукой длительностью 5 сек.).

воздействия), где метод скользящего окна позволяет показывать частотно-временные паттерны на уровне отклонения 10^{-3} для всех f. При этом можно определить точность приближения к 1 невозбужденного состояния ЭИС системы, например, величины отклонения $10^{-4} - 10^{-5}$ являются вполне достижимыми для всех f. Рассматривая (9) с точки зрения метрологии, можно заметить, что (8) выполняет роль нормализующего метрического оператора, для которого (9) является единичной шкалой. Хотя и $\varphi(f,t)$ является функцией частоты и времени, но нормализация (9) делает ее, и соответственно всю шкалу, безразмерной величиной, что удовлетворяет посылки, сделанные в [9].

Рассмотрим теперь структуру (3) в ${}^{k}\Upsilon_{t}^{f}$. Ее физический смысл заключается в реакции тестовой системы на воздействие в контексте физических величин в индексе k. Для нее не выполняется нормализация (9). Существует два способа рассмотрения структуры (3) по отношению к структуре (2) (единичной шкале). В первом случае, мы расширим (8) на все значения t:

$$\varphi^B = \left. \frac{k \Upsilon_t^{f=f_0\dots f_{max}}}{k \Upsilon_{t_0}^{f=f_0\dots f_{max}}} \right|_{t=t_w} = func(f), \quad t \le t_{max}, \quad (10)$$

фиксируя при этом момент рассмотрения $t = t_w$ на манер (7). В этом методе весь отклик тестовой системы представляет из себя сумму откликов в короткие дискретные моменты времени, т.е. величина t заменена индексом измерения, что разрешает проблему стационарности измерений. Примером подобного подхода может быть диаграмма Найквиста, в которую не входит время, но которая может быть индексирована по порядковому номеру измерения. Во втором случае мы рассматриваем (8) только для $t \ge t_m$

$$\varphi^B = \frac{k \Upsilon_t^{f=f_0\dots f_{max}}}{k \Upsilon_{t_0}^{f=f_0\dots f_{max}}} = func(f,t), \quad t \ge t_m.$$
(11)

Здесь вся система считается нестационарной в смысле (5) и исследуются динамика физических величин в индексе k. Например, рассматриваются временные параметры проводимости жидкости, измеренные RMS методом. Несмотря на общее сходство, (10) и (11) имеют разный метрологический и физический смысл, поскольку приводят к разным размерностям общего φ для $t \leq t_{max}$

$$\varphi = \varphi^B, \quad t \le t_{max}, \tag{12}$$

и

$$\varphi = \frac{\varphi^A}{\varphi^B} = \frac{1}{\varphi^B}, \quad t \le t_{max}, \tag{13}$$

Оба варианта преобразуют (10)виду

CYBRES EIS, Device ID:322020, Heat map of FRA conductivity, diff.ch. (Vernadsky Scale of Relative Measurements)



Рис. 5. Воздействия лазером (512нм, 5мВ, класс 1) через кубик сахара на жидкость в канале 1 (жидкость полностью закрыта от воздействия лазерного света), канал 2 находится на расстоянии 10 см непосредственно после канала 1. Показана дифференциальная динамика каналов до, во время и после воздействия, цветовая палитра HSV, разрешение $3 \cdot 10^{-3}$ URM на всю шкалу. Видно появление высокочастотных компонентов динамики после включения лазера и низкочастотных после его выключения. Ренормализации ${}^{k}\varphi_{t}^{f}$ проведена один раз в начале измерения.

Хотя φ в (12) является функцией частоты, однако фактически как время, так и частота представлены дискретными значениями – ассоциированными индексами измерения. В физическом смысле (10) приводит φ к индексированной безразмерной величине. С другой стороны, φ в (13) имеет размерность $func(f,t)^{-1}$, что при аналогичном рассмотрении частоты как индексированного параметра может привести к $func(t)^{-1}$. В литературе уже упоминались оба варианта, например в [9], [14] были высказаны аргументы в пользу безразмерной φ , в то время как в [15], [16], [17] рассматривалась варианты sec^{-1} для φ .

IV. Размерность φ : безразмерная величина, $func(t)^{-1}$ или $func(f,t)^{-1}$?

Физический смысл φ для $t \leq t_{max}$ заключается либо в характеризации тестового объекта при известном воздействии, либо в характеризации источника воздействия при известном тестовом объекте. Оба варианта используются в практических задачах, в нашем случае, при известном тестовом объекте (дистиллированная вода определенного стандарта при заданных параметрах измерения), возможно проводить характеризацию источника воздействия, как это показано на Рис. 6, 7, 8, 5. Очевидно, что наиболее логичным будет использовать безразмерный вариант вычисления φ , как отношение поведения тестовой системы без воздействия к поведению тестовой системы под воздействием. Для этого необходимо фиксировать момент рассмотрения $t = t_w$. По сути, вся шкала, основанная на нормализации (8) и (9) и предложенная в [9], является безразмерной. Ситуация с безразмерными шкалами не изменилась за последние 20 лет исследований [14].

У безразмерных шкал есть сильные и слабые стороны. Например, при отсутствии понятной и принятой большинством исследователей теоретической базы слабых излучений, и с более глубоким пониманием роли квантовых эффектов в макросистемах, безразмерная шкала остается единственной реальной возможностью калибровки измерительной аппаратуры. Безразмерные шкалы позволяют определять моментные харатеристики отклика тестовых систем. Однако при рассмотрении динамики этих откликов для $t \geq t_m$, например, для определения величины затухания, необходимо принять $func(f,t)^{-1}$ для φ .

Очевидным затруднением введения $func(f,t)^{-1}$ является неясный физический смысл этой размерности. В работах [15], [16] приводились аргументы с $func(t)^{-1}$ для вращения объектов или полей вращения, которые на наш взгляд являются достаточно сложными для решения метрологических задач в реальных приборах. Принимая во внимание квантовые явления, которые участвуют в процессах измерения слабых излучений, физический смысл размерности $func(t)^{-1}$, как и $func(f,t)^{-1}$, теряется еще больше.

Существенным аргументом в выборе шкалы является вопрос стационарности процесса измерения (не

CYBRES EIS, Device ID:322018, Heat map of FRA conductivity



Рис. 6. Видимое проявление пост-экспериментальных частотно-временных структур в тестовой жидкости при ренормализации ${}^k \varphi_t^f$ в скользящем окне анализа. Жидкость проявляет спонтанные осцилляции после воздействия биологического объекта.

путать со стационарностью тестовой системы и воздействия). Критика [15] и сходных работ заключается в потере стационарности измерения, т.е. повторные измерения одного объекта в одинаковых условиях могут не привести к одинаковому результату, что является неприемлемым для практических измерений. Метод (7) гарантирует стационарность измерениям, что ведет к выбору (10) и (12) в качестве расчета φ для $t \leq t_{max}$ как безразмерной величины, что и представляется на соответствующей оси измерений, как 'Units of Relative Measurements'.

В заключении этого раздела хотелось бы процитировать слова В.И.Вернадского: 'На основе новой физики явление должно изучаться в комплексе пространствовремя. Пространство жизни, как мы видели, имеет свое особое, единственное в природе симметрическое состояние. Время, ему отвечающее, имеет не только полярный характер векторов, но особый, ему свойственный параметр, особую, связанную с жизнью, единицу измерения' [10]. Чтобы как-то зафиксировать особый смысл шкалы, связанной с измерением слабых излучений, и следуя предложениям, высказанным в [14], [15], предлагается назвать саму шкалу именем ак. Вернадского.

V. Смысл шкалы Вернадского

Предложение о названии шкалы относительных измерений именем Вернадского относится к 90м годам XX века и связано с деятельностью А.Е.Акимова, П.И.Госькова и других исследователей. Размышления о роли Вернадского в учении о ноосфере и влиянии слабых излучений можно найти и в работах В.П.Казначеева и А.В.Трофимова [18]. С философской точки зрения эти работы отражают течения космизма – холистического мировоззрения об упорядоченном мире и о человеке как о микрокосме. В этих работах человек рассматривается как единица эволюции ноосферы, которая протекает как в физическом мире, так и в особом (возможно информационном) измерении, названным Казначеевым как 'простраство Козырева'. Различные социальные, экономические и технологические процессы нормируются (или квантуются) на единицу этого процесса – 'монаду самого человека' (в ноосферной терминологии). В какой-то мере это отражает принцип относительности происходящего все, что происходит, трактуется в рамках единичного 'ноосферного носителя'. При всей неоднородности и разнообразии подобных 'единичных носителей', весь процесс в своей совокупности, будет давать более или менее сходные результаты, позволяющие их сравнивать друг с другом. Идеи космизма куда более глубокие, однако в приложении к измерениям слабых излучений они отражают три существенных момента:

1. Признание факта различий (или даже уникальности) единичных носителей и их проявлений в физической и информационной размерности.

2. Нормализация измеряемых процессов на единичный носитель.

3. Рассмотрение всей картины нормализованных результатов.

Очевидно, что шкала Вернадского довольно радикально отличается от абсолютных шкал измерений. Проблемой измерений становится сам единичный носитель – то, как его найти и измерить. Мы



Рис. 7. Два воздействия (B1,B2) биологическими объектами (касание рукой длительностью 5 сек.) на тестовую жидкость без ренормализации ${}^k \varphi_t^f$, различия в частотно-временных свойствах воздействий отчетливо видны.

предлагаем рассматривать в качестве единичного носителя каждый процесс измерения, где нормализация производится на поведении тестовой системы до воздействия.

Можно привести пример. Пусть изменения проводимости (фазы, корреляции, pH и т.д.) в фазе В (после воздействия) находится на уровне 0.999-1.001 в шкале Вернадского. Эти значения получены согласно (10) и (12) как отношение проводимости в экспериментальной области к проводимости в контрольной области. В абсолютных цифрах это означает, что если проводимость используемой воды равна $2\mu S/cm$, то вариация изменений будет равна $2^{*}(1.001-0.999) = 0.004 \mu S/cm$ или 4nS/cm. Значения в шкале Вернадского позволяют уйти от рассмотрений конкретных физических величин и сконцентрироваться на их относительных изменениях под действием рассматриваемых воздействий. При этом нужно помнить, эти величины имеют смысл только при рассмотрении всей картины, т.е. при накоплении статистики разных воздействий и разных тестовых систем.

VI. КАЛИБРОВКА ЭИС

Выражение (9) определяет смысл калибровки, ее величина для $t \leq t_m$ должна приближаться к 1 с допустимым отклонением $10^{-3} - 10^{-5}$. Предлагается использовать в качестве тестового объекта техническую деминерализированную воду (например отвечающую стандартам DIN 43530-4, VDE 0510 или сходным с ними) при комнатной температуре 22-32°С, необходимо измерять температуру измерительной жидкости (небольшие изменения проводимости в этом диапазоне могут компенсироваться с помощью температурного коэффициента). Проводимость воды должна быть > $1\mu S/cm$ и $< 3\mu S/cm$ (поэтому необходимо контролировать условия хранения и разлива по отношению к *CO*₂). Необходимо исключить свет и ЭМ поля при измерении. Существенным вопросом для калибровки является условие стационарности измерительной жидкости. Опуская дискуссию о том, является ли ЭИС стационарной в длительном времени, мы указываем на (7) как на условие достижения стационарности в том времени, когда выполняется (9). Иными словами, измерения должны проводится со свеженалитой водой, взятой из большого контейнера, чем дольше длится измерение, тем большую нестационарность будет проявлять тестовая жидкость. Необходимо помнить, что сам процесс воздействия на жидкость во многих случаях также не стационарен, поэтому ЭИС измерения имеют вероятностный характер. Необходимо проведение минимального количества независимых замеров (30 замеров) в сходных условиях для получения статистически существенного результата.

С практической точки зрения, ренормализацию ${}^{k}\varphi_{t}^{f}$ можно проводить в скользящем окне, тогда значительно повышается разрешение пост-экспериментальной динамики, как например показано на Рис. 6. С другой стороны, без ренормализации возможно сравнивать между собой параметры двух разных воздействий, как показано на Рис. 7, 5 или в виде 4D графика на Рис. 8.

CYBRES EIS, Device ID:322018, Heat map of FRA phase, ch.1 (Vernadsky Scale of Relative Measurements)



Рис. 8. Представление RMS проводимости и FRA фазы импеданса в шкале Вернадского в виде 4D графика, ренормализации ${}^{k}\varphi_{t}^{f}$ проведена один раз в начале измерения, цветовая палитра HSV. Показано изменение параметров жидкости под периодическим воздействием и их возврат к предыдущему уровню.

Список литературы

- С.Кернбах, И.Куксин, and О.Кернбах. Анализ сверхслабых взаимодействий методом электрохимической импедансной спектроскопии. *Журнал Формирующихся Направлений Науки*, 11(4):6–22, 2016.
- [2] S. Kornienko, O. Kornienko, and P. Levi. Multi-agent repairer of damaged process plans in manufacturing environment. In Proc. of the 8th Conf. on Intelligent Autonomous Systems (IAS-8), Amsterdam, NL, pages 485–494, 2004.
- [3] В.А. Соколова. Первое экспериментальное подтверждение существования торсионных полей и перспективы их использования в народном хозяйстве. Москва, 2002.
- [4] Jeremy O. Richardson, Cristóbal Pérez, Simon Lobsiger, Adam A. Reid, Berhane Temelso, George C. Shields, Zbigniew Kisiel, David J. Wales, Brooks H. Pate, and Stuart C. Althorpe. Concerted Hydrogen-Bond Breaking by Quantum Tunneling in the Water Hexamer Prism. *Science*, 351(6279):1310–1313, March 2016.
- [5] P. L. Geissler, C. Dellago, D. Chandler, J. Hutter, and M. Parrinello. Autoionization in Liquid Water. *Science*, 291:2121–2124, March 2001.
- [6] J.O.M. Bockris and A.K.N. Reddy. Modern Electrochemistry: An Introduction to an Interdisciplinary Area. Number Bd. 2 in A Plenum/Rosetta edition. Springer US, 1973.
- [7] J.P. Hespanha. *Linear System Theory*. Princeton university press, 2009.
- [8] С.Кернбах and О.Кернбах. Достоверная детекция слабых излучений ЭИС методом. Журнал Формирующихся Направлений Науки, 14(4):65–79, 2017.

- [9] С. Кернбах. Измерение эффективности систем, работающих с 'высокопроникающим излучением'. Журнал Формирующихся Направлений Науки, 1(2):76–91, 2013.
- [10] В.И. Вернадский. Изучение явлений жизни и новая физика (1931 г.) // Труды по биогеохимии и геохимии почв. М., 1992.
- [11] P. Levi, M. Schanz, S. Kornienko, and O. Kornienko. Application of order parameter equation for the analysis and the control of nonlinear time discrete dynamical systems. *Int.* J. Bifurcation and Chaos, 9(8):1619–1634, 1999.
- [12] S. Kernbach, I. Kuksin, and O. Kernbach. On accurate differential measurements with electrochemical impedance spectroscopy. WATER, 8:136–155, 2017.
- [13] И. Корыта, И. Дворжак, and В. Богачкова. Электрохимия. М., Мир, 1977.
- [14] П.И. Госьков. Метрологические проблемы генерации и приема торсионных излучений. Доклады 2-го Международного Конгресса, т.2/Под ред. П.И.Госькова - Барнаул: Изд-во Алт. ГТУ, 1999.
- [15] В.Т.Шкатов. О метрологическом обеспечении торсиметрических работ. Доклады 5-го Международного Конгресса, т.2/Под ред. П.И.Госькова - Барнаул: Изд-во Алт. ГТУ, с.54-64., 2002.
- [16] M. Trukhanova and G. Shipov. The Geometro-Hydrodynamical Representation of the Torsion Field. ArXiv e-prints, February 2017.
- [17] Mariya Iv. Trukhanova. The geometro-hydrodynamical representation of the torsion field. *Physics Letters A*, 2017.
- [18] В.П. Казначеев and А.В. Трофимов. Очерки о природе живого вещества и интеллекта на планете Земля. Новосибирск, Наука, 2004.