

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ DEVICES AND METHODS OF MEASURING

УДК 621.316.723.2

doi:10.21685/2307-5538-2021-4-5

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАНАЛА ИЗМЕРЕНИЯ ИМПЕДАНСА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ В ПРОЦЕССЕ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

П. Е. Голубков¹, Е. А. Печерская², О. В. Карпанин³,
Ю. А. Вареник⁴, В. С. Александров⁵, Г. В. Козлов⁶

^{1,2,3,4,5,6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹golpavpnz@yandex.ru, ²pea1@list.ru, ³karpanino@mail.ru,

⁴yurik_ru@mail.ru, ⁵vsalexrus@gmail.com, ⁶gvk17@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования. Для обеспечения гарантированной точности измерений активного и реактивного сопротивлений оксидных слоев в работе решена актуальная задача разработки и метрологического анализа измерительного преобразователя импеданса синтезируемых покрытий. Целью работы является получение аналитических выражений для функции преобразования и погрешностей канала измерения импеданса. *Материалы и методы.* Рассмотрено применение метода микродугового оксидирования применительно к модификации поверхности изделий из вентильных металлов и сплавов. Для достижения поставленной цели использованы методы функционального метрологического анализа, теоретической метрологии, электротехники. *Результаты.* Разработана структура измерительного преобразователя импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита. Получено аналитическое описание комплексной проводимости гальванической ячейки. Выполнен функциональный и метрологический анализ измерительных каналов разработанного измерительного преобразователя, что позволило определить метрологические характеристики и оценить величину основной инструментальной погрешности. *Выводы.* Благодаря возможности измерения импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита разработанный измерительный преобразователь может применяться не только для неразрушающего контроля процесса микродугового оксидирования на производстве, но и в научных исследованиях. Полученные в ходе метрологического анализа выражения для расчета функций преобразования и погрешностей измерительных каналов преобразователя позволяют гарантировать высокую точность измерения.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки, метрологический анализ, функция преобразования, погрешность измерения

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-00425.

Для цитирования: Голубков П. Е., Печерская Е. А., Карпанин О. В., Вареник Ю. А., Александров В. С., Козлов Г. В. Метрологический анализ канала измерения импеданса гальванической ячейки в процессе микродугового оксидирования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 41–50. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-5

METROLOGICAL ANALYSIS OF THE CHANNEL FOR MEASURING THE IMPEDANCE OF A GALVANIC CELL IN THE PROCESS MICRO-ARC OXIDATION

P.E. Golubkov¹, E.A. Pecherskaya², O.V. Karpanin³,
Yu.A. Varenik⁴, V.S. Aleksandrov⁵, G.V. Kozlov⁶

^{1,2,3,4,5,6} Penza State University, Penza, Russia

¹golpavpnz@yandex.ru, ²pea1@list.ru, ³karpanino@mail.ru,
⁴yurik_ru@mail.ru, ⁵vsalexrus@gmail.com, ⁶gvk17@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is a measuring converter of the impedance of a galvanic cell in the process of micro-arc oxidation. To ensure guaranteed accuracy of measurements of the active and reactive resistances of oxide layers, the actual problem of developing and metrological analysis of the impedance measuring converter of synthesized coatings is solved. The aim of the work is to obtain analytical expressions for the conversion function and errors of the impedance measurement channel. *Materials and methods.* The application of the micro-arc oxidation method is considered in relation to the modification of the surface of products made of valve metals and alloys. To achieve this goal, the methods of functional metrological analysis, theoretical metrology, and electrical engineering were used. *Results.* The structure of the measuring converter of the impedance of the galvanic cell and the conductivity of the electrolyte is developed. An analytical description of the complex conductivity of a galvanic cell is obtained. A functional and metrological analysis of the measuring channels of the developed measuring converter was performed, which made it possible to determine the metrological characteristics and estimate the value of the main instrumental error. *Conclusions.* Due to the possibility of measuring the impedance of the galvanic cell and the conductivity of the electrolyte, the developed measuring converter can be used not only for non-destructive testing of the MDO process in production, but also in scientific research. The expressions obtained during the metrological analysis for calculating the conversion functions and errors of the measuring channels of the converter allow us to guarantee high measurement accuracy.

Keywords: micro-arc oxidation, galvanic cell impedance converter, metrological analysis, conversion function, measurement error

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the RFBR, project No. 19-08-00425.

For citation: Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Karpanin O.V., Varenik Yu.A., Aleksandrov V.S., Kozlov G.V. Metrological analysis of the channel for measuring the impedance of a galvanic cell in the process micro-arc oxidation. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):41–50. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-5

Введение

Микродуговое окислирование (МДО) является одним из наиболее востребованных способов поверхностной плазменно-электролитической обработки изделий из вентильных металлов и сплавов. Высокие эксплуатационные характеристики получаемых оксидных слоев, сопоставимые со свойствами корундовой керамики, экологичность и безопасность процесса синтеза покрытий дают технологии МДО значительное преимущество перед анодированием, в том числе твердым [1], и позволяют говорить о возможном применении МДО-покрытий во многих отраслях промышленности, в том числе автомобильной, авиационной, ракетно-космической и оборонной, а также в медицине [2–6].

В настоящее время технология МДО находится на стадии становления: появляются новые режимы обработки, расширяется номенклатура обрабатываемых материалов [7], углубляются теоретические представления, лежащие в основе механизмов роста оксидных слоев. Как следствие, на производстве возникают сложности, проявляющиеся в неповторяемости свойств получаемых покрытий, вызванные недостаточной изученностью процесса МДО и несовершенством технологического оборудования. Анализ литературных данных показывает [8], что большинство существующих установок МДО не предполагает измерение свойств синтезируемых покрытий во время их формирования (оно производится только на готовых образцах), что ограничивает возможности управления, так как неизвестны значения текущих характеристик объекта исследования, например, толщины покрытия. Исключение составляют

установки [9–11], реализующие косвенное измерение толщины и пористости покрытия на основе определения параметров эквивалентной электрической схемы гальванической ячейки и/или анализа переходных процессов при подаче высоковольтных прямоугольных импульсов заданной частоты и скважности, однако данные устройства имеют низкую точность (относительная погрешность измерения параметров эквивалентной схемы либо толщины и пористости покрытия составляет от 3 до 10 %), что говорит о необходимости разработки высокоточных средств косвенного измерения параметров оксидных слоев в процессе МДО. В частности, перспективным является измерение импедансных спектров гальванической ячейки, которое позволяет определить не только электрофизические параметры покрытия, но и получить информацию о физико-химических процессах, происходящих в системе «анод-покрытие-катод». Данная статья посвящена разработке структуры измерительного преобразователя импеданса гальванической ячейки МДО и обеспечению его гарантированной точности.

Материалы и методика

Разработка структуры измерительного преобразователя импеданса, а также вывод аналитической модели измеряемой величины (комплексной проводимости гальванической ячейки) осуществлялись с помощью методов теоретической электротехники. Функциональный и метрологический анализ измерительных каналов разработанного измерительного преобразователя выполнялся по методике, изложенной в работе [12].

Результаты

Измерительный преобразователь импеданса (рис. 1) состоит из генератора, измерительной цепи, повторителя на операционном усилителе и АЦП. Особенностью конструкции является наличие усилителя тока в составе генератора, что позволяет исследовать низкоомные образцы (в верхней границе частотного диапазона реактивное сопротивление гальванической ячейки составляет сотни Ом), а также возможность переключения объектов измерения и образцовых мер, что позволяет измерять не только импеданс МДО-покрытия, но и проводимость электролита. Измерительной цепью является делитель напряжения, в верхнем плече которого находится исследуемый образец, а в нижнем – образцовая мера импеданса. Исследуемым образцом может быть гальваническая ячейка либо два дополнительных электрода, погруженных в электролит. Образцовая мера может быть внутренней и внешней и представляет собой RC-цепь; структура внутренней образцовой меры показана на рис. 2; структура внешней образцовой меры может быть любой.

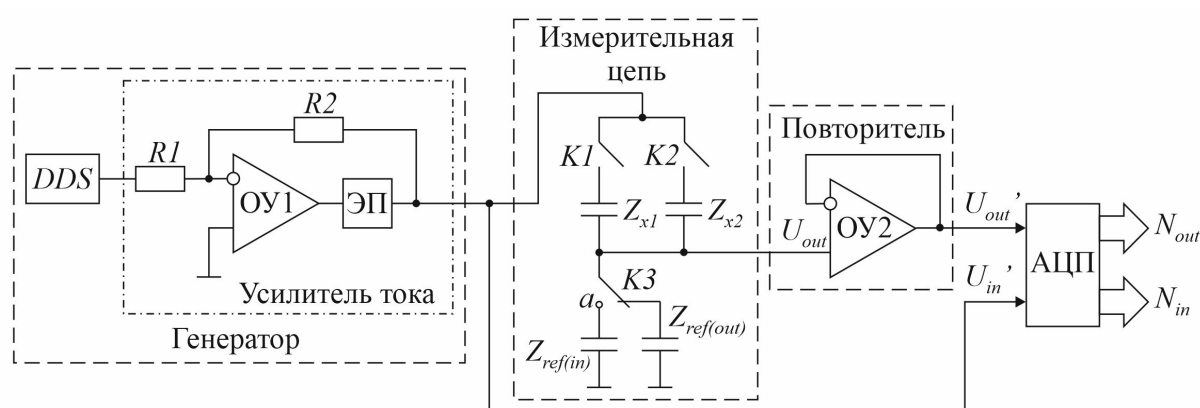
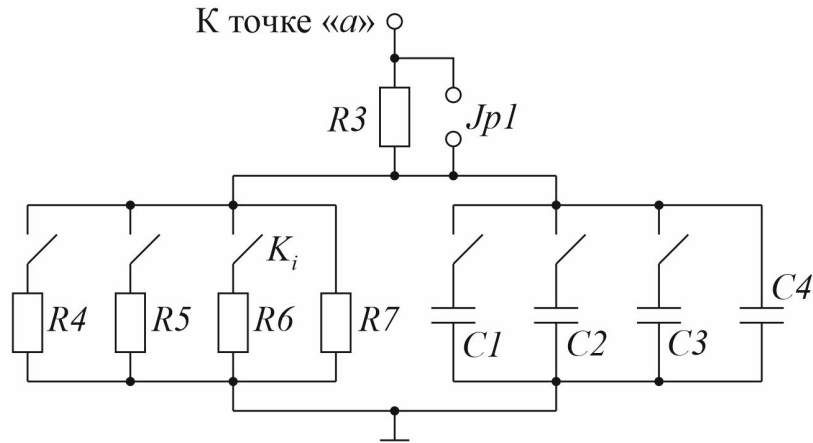


Рис. 1. Структура измерительного преобразователя импеданса

Для измерения импеданса разработан многочастотный модернизированный метод амперметра-вольтметра. Входной измерительный синусоидальный сигнал подается с генератора на измерительную цепь и на АЦП; выходной сигнал измерительной цепи после повторителя поступает на другой канал АЦП. Повторитель с высоким входным сопротивлением обеспечивает снижение погрешности согласования.

Рис. 2. Структура внутренней образцовой меры импеданса $Z_{ref(in)}$

Рассмотрим упрощенную схему измерительного преобразователя (рис. 3).

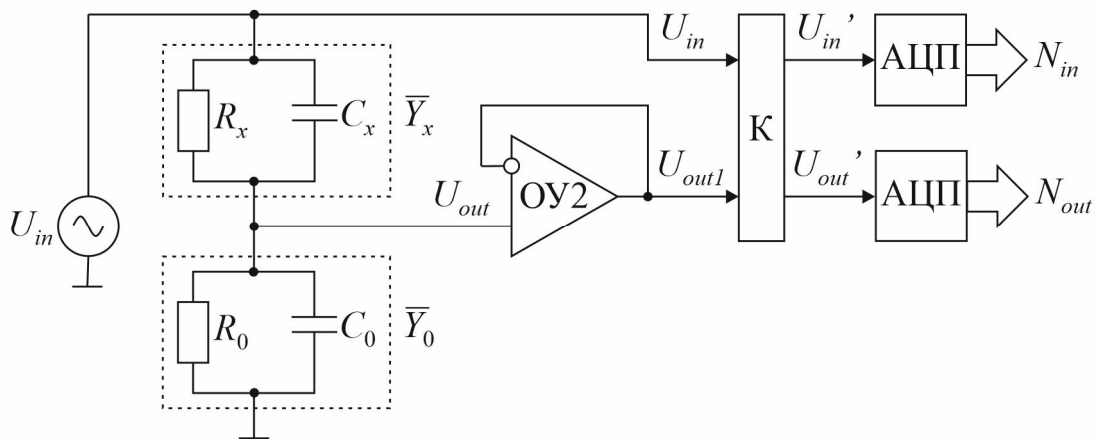


Рис. 3. Функция преобразования измерительного преобразователя импеданса:
 К – коммутатор (мультиплексор) АЦП

Воспользовавшись формулой делителя напряжения, получим аналитическую функциональную модель измеряемой величины в виде

$$\bar{Y}_x = \bar{Y}_0 \frac{\bar{U}_{out}}{U_{in} - \bar{U}_{out}} = \bar{Y}_0 \bar{K}, \quad (1)$$

где \bar{Y}_x и \bar{Y}_0 – комплексная проводимость исследуемого образца и образцовой меры; \bar{U}_{in} и \bar{U}_{out} – входное и выходное напряжение измерительного преобразователя; \bar{K} – комплексный коэффициент (чувствительность):

$$\bar{K} = \text{Re}(\bar{K}) + j \cdot \text{Im}(\bar{K}), \quad (2)$$

$$\text{Re}(\bar{K}) = \frac{U_{in} U_{out} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - U_{out}^2}{U_{in}^2 + U_{out}^2 - 2U_{in} U_{out} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (3)$$

$$\text{Im}(\bar{K}) = \frac{U_{in} U_{out} \sin(\varphi_2 - \varphi_1)}{U_{in}^2 + U_{out}^2 - 2U_{in} U_{out} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (4)$$

где $\text{Re}(\bar{K})$ и $\text{Im}(\bar{K})$ – действительная и мнимая часть коэффициента \bar{K} ; j – мнимая единица; U_{in} , φ_1 , U_{out} , φ_2 – модуль и аргумент входного и выходного напряжения соответственно. Под-

ставив (2) в (1), получим выражение для комплексной проводимости исследуемого образца в виде

$$Y_x = \operatorname{Re}(Y_x) + j \cdot \operatorname{Im}(Y_x) = [G_0 \operatorname{Re}(K) - B_0 \operatorname{Im}(K)] + j[G_0 \operatorname{Im}(K) + B_0 \operatorname{Re}(K)], \quad (5)$$

где G_0 и B_0 – активная и реактивная проводимость образцовой меры.

Структурная метрологическая модель измерительных каналов входного и выходного напряжения измерительного преобразователя импеданса показана на рис. 4,а и б, соответственно.

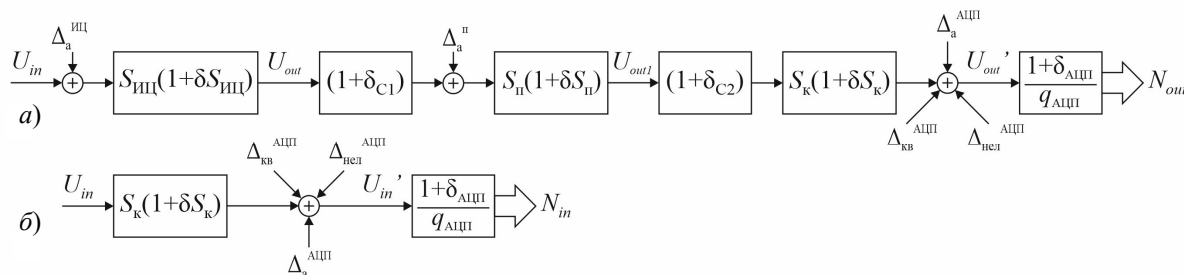


Рис. 4. Структурная метрологическая модель измерительного преобразователя импеданса: $S_{ИЦ}$, $S_{п}$, $S_{к}$, $\delta S_{ИЦ}$, $\delta S_{п}$, $\delta S_{к}$, $\Delta_a^{ИЦ}$, $\Delta_a^п$ – чувствительность измерительной цепи, повторителя и коммутатора, их мультипликативные и аддитивные погрешности; δ_{C1} , δ_{C2} – относительные погрешности согласования измерительной цепи с повторителем и повторителя с коммутатором; $q_{АЦП}$ и $\delta_{АЦП}$ – номинальная ступень квантования АЦП и ее относительная погрешность; $\Delta_a^{АЦП}$, $\Delta_{нел}^{АЦП}$, $\Delta_{кв}^{АЦП}$ – аддитивная, погрешность нелинейности и квантования АЦП соответственно

Полученные на основе данной модели функции преобразования входного и выходного напряжения, приведенные ко входу АЦП, соответственно имеют вид

$$U_{in}' = N_{in} q_{АЦП} = U_{in} S_{к}, \quad (6)$$

$$U_{out}' = N_{out} q_{АЦП} = U_{in} S_{ИЦ} S_{п} S_{к}, \quad (7)$$

где U_{in} – входное напряжение; U_{in}' и U_{out}' – выходное напряжение измерительных каналов; N_{in} и N_{out} – код АЦП, соответствующий входному и выходному напряжению; $q_{АЦП}$ – номинальная ступень квантования АЦП; $S_{ИЦ}$, $S_{п}$, $S_{к}$ – чувствительность измерительной цепи, повторителя и коммутатора соответственно.

Оценим погрешности измерительных каналов. Для измерительного канала выходного напряжения сумма приведенных ко входу мультипликативных погрешностей $\delta_{мул}^{U_{out}}$ равна

$$\delta_{мул}^{U_{out}} = \sqrt{(\delta S_{ИЦ} \cdot A_1)^2 + (\delta_{C1} \cdot A_1)^2 + (\delta S_{п} \cdot A_2)^2 + (\delta_{C2} \cdot A_3)^2 + (\delta S_{к} \cdot A_3)^2 + (\delta_{АЦП} U_{in}')^2}, \quad (8)$$

$$A_1 = U_{in} S_{ИЦ} S_{п} S_{к}, \quad (9)$$

$$A_2 = U_{in} S_{п} S_{к}, \quad (10)$$

$$A_3 = U_{in} S_{к}, \quad (11)$$

где $A_1 - A_3$ – весовые коэффициенты; $\delta S_{ИЦ}$, $\delta S_{п}$, $\delta S_{к}$ – погрешности чувствительности измерительной цепи, повторителя и коммутатора соответственно; δ_{C1} , δ_{C2} – погрешности согласования измерительной цепи с повторителем и повторителя с коммутатором соответственно; $\delta_{АЦП}$ – относительная погрешность номинальной ступени квантования АЦП.

Сумма приведенных ко входу аддитивных погрешностей $\Delta_a^{U_{out}}$ равна

$$\Delta_a^{U_{out}} = \sqrt{(\Delta_a^{ИЦ} S_{ИЦ} S_{п} S_{к})^2 + \left(\frac{\Delta_a^п S_{п} S_{к}}{S_{ИЦ}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_a^{АЦП}}{S_{ИЦ} S_{п} S_{к}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{кв}^{АЦП}}{S_{ИЦ} S_{п} S_{к}}\right)^2}, \quad (12)$$

где $\Delta_a^{ИЦ}$, $\Delta_a^п$ – аддитивные погрешности измерительной цепи и повторителя; $\Delta_a^{АЦП}$, $\Delta_{кв}^{АЦП}$ – аддитивная погрешность и погрешность квантования АЦП.

Приведенная ко входу погрешность нелинейности $\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{out}}}$ имеет вид

$$\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{out}}} = \frac{\Delta_{\text{нел}}^{\text{АЦП}}}{S_{\text{ИЦ}} S_{\text{П}} S_{\text{К}}}, \quad (13)$$

где $\Delta_{\text{нел}}^{\text{АЦП}}$ – погрешность нелинейности АЦП.

Аналогично для измерительного канала входного напряжения получим:

Сумма приведенных ко входу мультипликативных погрешностей

$$\delta_{\text{мул}}^{U_{\text{in}}} = \delta S_{\text{К}} U_{\text{in}} + \delta_{\text{АЦП}} U_{\text{in}}. \quad (14)$$

То же для аддитивных погрешностей:

$$\Delta_a^{U_{\text{in}}} = \frac{\Delta_a^{\text{АЦП}}}{S_{\text{К}}} + \frac{\Delta_{\text{КВ}}^{\text{АЦП}}}{S_{\text{К}}}. \quad (15)$$

Приведенная ко входу погрешность нелинейности:

$$\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{in}}} = \frac{\Delta_{\text{нел}}^{\text{АЦП}}}{S_{\text{К}}}. \quad (16)$$

Выражения для основной погрешности, приведенной ко входу измерительных каналов входного $\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{in}}}$ и выходного напряжения $\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{out}}}$, соответственно имеют вид

$$\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{in}}} = \sqrt{(\Delta_a^{U_{\text{in}}})^2 + (\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{in}}})^2 + (\delta_{\text{мул}}^{U_{\text{in}}})^2}, \quad (17)$$

$$\Delta_{\text{и}}^{U_{\text{out}}} = \sqrt{(\Delta_a^{U_{\text{out}}})^2 + (\Delta_{\text{нел}}^{U_{\text{out}}})^2 + (\delta_{\text{мул}}^{U_{\text{out}}})^2}. \quad (18)$$

Погрешность согласования измерительной цепи с последующими звеньями описывается выражением

$$\delta S_{12}^Z = -\frac{Z_{\text{ref}}}{Z_{\text{ref}} + Z_{\text{inZ}}}, \quad (19)$$

где Z_{inZ} – входной импеданс повторителя:

$$Z_{\text{inZ}} = \left(\frac{1}{R_{\text{in}}} + \frac{1}{R_d + R_{\text{out}}} + j\omega C_{\text{in}} \right)^{-1}; \quad (20)$$

Z_{ref} – импеданс образцовой меры. Для двухэлементной RC-цепи Z_{ref} равен

$$Z_{\text{ref}} = \left[(R_{\text{ref}})^{-1} + j\omega C_{\text{ref}} \right]^{-1}. \quad (21)$$

В выражениях (20), (21) R_d , R_{in} , C_{in} и R_{out} – дифференциальное и синфазное входное сопротивление, входная емкость и выходное сопротивление операционного усилителя соответственно; R_{ref} и C_{ref} – номиналы компонентов образцовой меры.

Зависимость погрешности согласования от частоты измерительного сигнала показана на рис. 5. Видно, что при увеличении частоты погрешность согласования уменьшается, и на частотах выше 3 кГц стремится к нулю. Это объясняется тем, что образцовая мера, как и исследуемый образец, моделируется параллельной RC-цепью, реактивное сопротивление которой уменьшается с ростом частоты.

Зависимость погрешности согласования от величин R_{ref} и C_{ref} представлена на рис. 6. Форма кривых на рис. 6 зависит от соотношения активного и реактивного сопротивления образцовой меры. Для номинальных значений R_{ref} и C_{ref} , представленных на графике, реактивной составляющей в выражении (21) почти всегда можно пренебречь (за исключением случая, когда $R_{\text{ref}} = 10$ кОм и $C_{\text{ref}} = 0,1$ мкФ, когда активное и реактивное сопротивление сопоставимы),

как и импедансом Z_{ref} в знаменателе (19). Поэтому погрешность согласования уменьшается при увеличении сопротивления образцовой меры (рис. 6,а). Вид зависимости погрешности согласования от емкости C_{ref} объясняется аналогичным образом, за исключением того, что реактивным сопротивлением пренебрегать нельзя. Гораздо более важным является тот факт, что погрешность согласования составляет ничтожно малую величину по сравнению с требуемой инструментальной погрешностью измерительного преобразователя (0,5 %) благодаря наличию повторителя с высоким входным сопротивлением ($R_{in} = 10^{12}$ Ом).

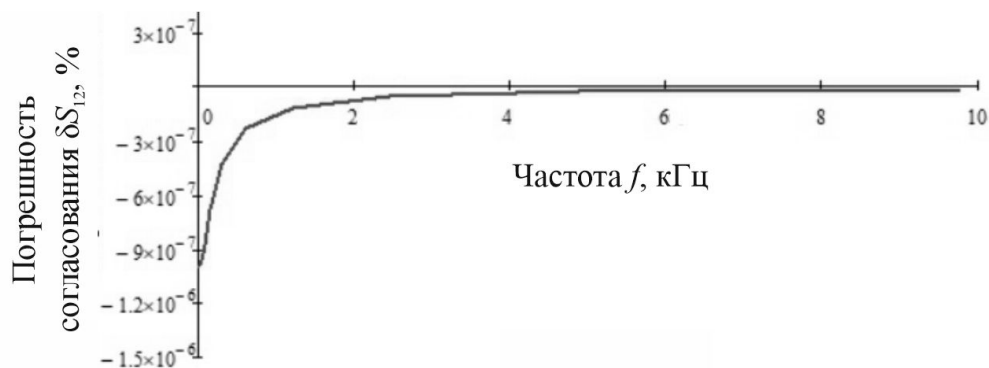


Рис. 5. Зависимость погрешности согласования от частоты измерительного сигнала

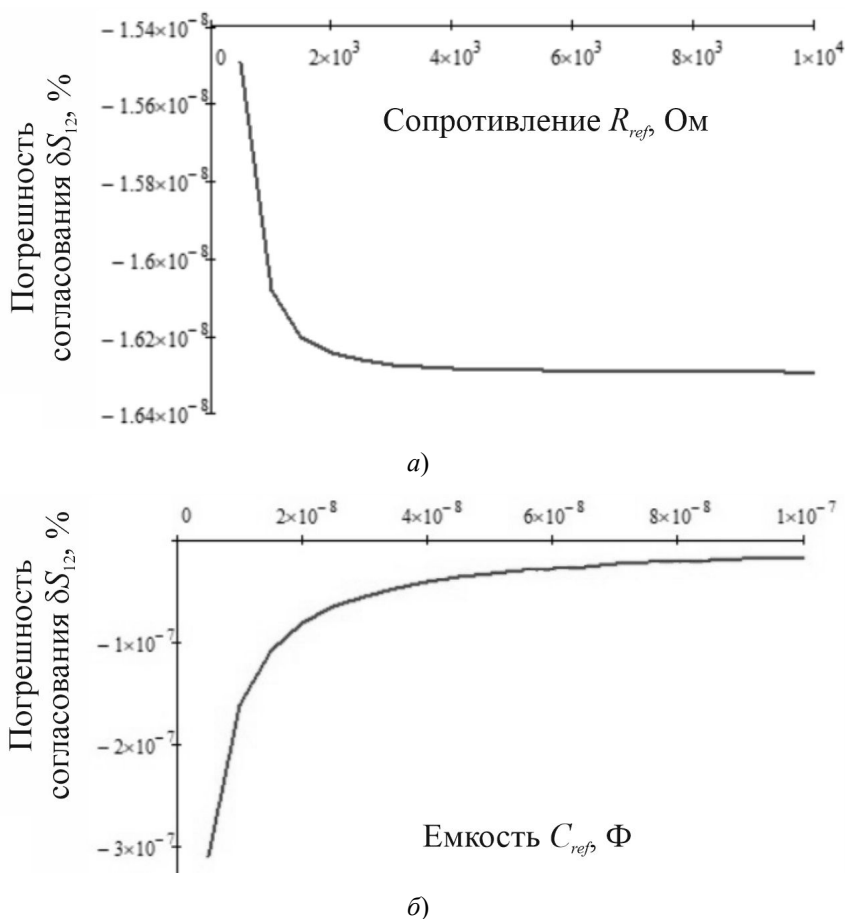


Рис. 6. Зависимость погрешности согласования от сопротивления (а) и емкости (б) образцовой меры

Проведенные метрологические испытания показали, что основная погрешность измерения импеданса с помощью разработанного измерительного преобразователя не превышает 0,5 %. Методика проведения метрологических испытаний будет изложена в следующих публикациях.

Заключение

Разработанный измерительный преобразователь позволяет измерять не только частотные зависимости импеданса гальванической ячейки, но и проводимости электролита, что открывает широкие возможности не только для контроля характеристик МДО покрытия, но и для исследования физико-химических явлений, сопровождающих рост оксидного слоя. Полученные в результате метрологического анализа выражения для расчета функций преобразования и погрешностей измерительных каналов преобразователя позволяют гарантировать высокую точность измерения импеданса гальванической ячейки и повысить достоверность получаемой измерительной информации.

Список литературы

1. Тихоненко В. В., Шкилько А. М. Метод микродугового оксидирования // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 2, № 13. С. 13–18.
2. Скрябин М. Л. Практические результаты поверхностного упрочнения днища поршня методом микродугового оксидирования // Ползуновский вестник. 2018. № 1. С. 153–157.
3. Кошуро В. А., Фомин А. А., Родионов И. В., Фомина М. А. Влияние микродугового оксидирования на структуру и твердость алюмооксидных покрытий, сформированных на титане плазменным напылением // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. Т. 54, № 5. С. 499–504.
4. Штокал А. О., Говорун Т. А., Баженова О. П., Шаталов В. К. Перспективы использования способов микродугового оксидирования поверхностей при создании теплозащитного экрана космического аппарата для исследования Солнца // Коррозия: материалы, защита. 2020. № 1. С. 28–34.
5. Воробьев И. С. Исследование противоосколочных свойств пористого литого алюминия, упрочненного методом микродугового оксидирования // Вопросы оборонной техники. Сер. 16, Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 9-10. С. 98–106
6. Голубков П. Е., Крайнова К. Ю., Сафронов М. И. [и др.]. Применение в изделиях медицинской техники покрытий, полученных методом микродугового оксидирования // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК-2019) : материалы VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (13 марта 2019 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. С. 184–186.
7. Cheng Y., Zhu Zh., Zhang Q. [et al.]. Plasma electrolytic oxidation of brass // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 385. P. 125366.
8. Голубков П. Е., Печерская Е. А., Зинченко Т. О. Анализ модификаций технологических установок микродугового оксидирования // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК-2020) : материалы VII Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (18 марта 2020 г.). Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 267–270.
9. Мамаев А. И., Мамаева В. А., Борицов В. Н., Дорофеева Т. И. Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие. Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. 360 с.
10. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices // Life Science Journal. 2014. Vol. 11 (1s). P. 263–268.
11. Парфенов Е. В., Фаррахов Р. Г., Мукаева В. Р. [и др.]. Автоматизированная технологическая установка для исследования электролитно-плазменных процессов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20, № 4. С. 23–31.
12. Шлыков Г. П. Теория измерений: уравнения, модели, оценивание точности : учеб. пособие. Пенза : Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2008. 100 с.

References

1. Tikhonenko V.V., Shkil'ko A.M. Method of microarc oxidation. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy = Eastern European Journal of Advanced Technologies*. 2012;2(13):13–18. (In Russ.)
2. Skryabin M.L. Practical results of surface hardening of the piston bottom by microarc oxidation method. *Polzunovskiy vestnik = Polzunovsky vestnik*. 2018;(1):153–157. (In Russ.)
3. Koshuro V.A., Fomin A.A., Rodionov I.V., Fomina M.A. The effect of microarc oxidation on the structure and hardness of aluminum oxide coatings formed on titanium by plasma spraying. *Fizikokhimiya poverkhnosti i zashchita materialov = Physicochemistry of the surface and protection of materials*. 2018;54(5):499–504. (In Russ.)
4. Shtokal A.O., Govorun T.A., Bazhenova O.P., Shatalov V.K. Prospects of using methods of microarc oxidation of surfaces when creating a heat shield of a spacecraft for solar exploration. *Korroziya: materialy, zashchita = Corrosion: materials, protection*. 2020;(1):28–34. (In Russ.)

5. Vorob'ev I.S. Investigation of the anti-shattering properties of porous cast aluminum hardened by micro-arc oxidation. *Voprosy oboronnoy tekhniki. Ser. 16, Tekhnicheskie sredstva protivodeystviya terrorizmu = Issues of defense technology. Ser. 16, Technical means of countering terrorism.* 2018;(9-10):98–106. (In Russ.)
6. Golubkov P.E., Kraynova K.Yu., Safronov M.I. [et al.]. Application of coatings obtained by microarc oxidation in medical equipment products. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK-2019): materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (13 marta 2019 g.) = Information technologies in science and education. Problems and Prospects (VMNPC-2019) : materials of the VI Vsros. inter-university. Scientific and practical conference (March 13, 2019).* Penza: Izd-vo PGU, 2019:184–186. (In Russ.)
7. Cheng Y., Zhu Zh., Zhang Q. [et al.]. Plasma electrolytic oxidation of brass. *Surface and Coatings Technology.* 2020;385:125366.
8. Golubkov P.E., Pecherskaya E.A., Zinchenko T.O. Analysis of modifications of technological installations of microarc oxidation. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK-2020): materialy VII Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (18 marta 2020 g.) = Information technologies in science and education. Problems and Prospects (VMNPC-2020) : materials of the VII Vsros. inter-university. nauch.-pract. Conf. (18 March 2020).* Penza: Izd-vo PGU, 2020:267–270. (In Russ.)
9. Mamaev A.I., Mamaeva V.A., Borikov V.N., Dorofeeva T.I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskikh neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie = Formation of nanostructured inorganic non-metallic coatings by the localization of high-energy fluxes at the interface of phases : textbook.* Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010:360. (In Russ.)
10. Bolshenko A.V., Pavlenko A.V., Puzin V.S., Panenko I.N. Power Supplies for Microarc Oxidation Devices. *Life Science Journal.* 2014;11(1s):263–268.
11. Parfenov E.V., Farrakhov R.G., Mukaeva V.R. [et al.]. Automated process unit for the study of electrolytic-plasma processes. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University.* 2016;20(4):23–31. (In Russ.)
12. Shlykov G.P. *Teoriya izmereniy: uravneniya, modeli, otsenivanie tochnosti: ucheb. posobie = Measurement theory: equations, models, accuracy estimation : textbook.* Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2008:100. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Павел Евгеньевич Голубков

инженер кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpavpnz@yandex.ru

Pavel E. Golubkov

Engineer of the sub-department of information and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Екатерина Анатольевна Печерская

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: peal@list.ru

Ekaterina A. Pecherskaya

Doctor of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of information and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Олег Валентинович Карпанин

старший преподаватель кафедры информационно-измерительной техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: karpanino@mail.ru

Oleg V. Karpanin

Senior lecturer of the sub-department of information and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Юрий Александрович Вареник

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurik_ru@mail.ru

Yuriy A. Varenik

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of information and measuring
equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владимир Сергеевич Александров

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vsalexrus@gmail.com

Vladimir S. Alexandrov

Student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Геннадий Васильевич Козлов

доктор технических наук, профессор,
директор Политехнического института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: gvk17@yandex.ru

Gennady V. Kozlov

Doctor of technical sciences, professor,
director of the polytechnic institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 21.08.2021

Поступила после рецензирования/Revised 28.08.2021

Принята к публикации/Accepted 29.09.2021