

УДК 621.316.723.2  
doi:10.21685/2307-5538-2021-4-6

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИМПЕДАНСА ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

П. Е. Голубков<sup>1</sup>, Е. А. Печерская<sup>2</sup>, О. А. Мельников<sup>3</sup>,  
О. В. Карпанин<sup>4</sup>, В. С. Александров<sup>5</sup>, Ю. А. Вареник<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Пензенский государственный университет, Пенза, Россия  
<sup>1</sup> golpavpnz@yandex.ru, <sup>2</sup> pea1@list.ru, <sup>3</sup> oleg-068@mail.ru,  
<sup>4</sup> karpanino@mail.ru, <sup>5</sup> vsalexrus@gmail.com, <sup>6</sup> yurik\_ru@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Метод микродугового оксидирования позволяет получить защитные покрытия на изделиях из металлов вентильной группы, применяемых в различных отраслях. Для синтеза покрытий с заданными свойствами требуется выполнение измерений их электрофизических параметров с гарантированной точностью. Объектом исследования выступает измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита в процессе микродугового оксидирования. Цель исследования – достижение требуемых характеристик точности измерительного преобразователя импеданса путем разработки методики и проведения метрологических испытаний. *Материалы и методы.* Метрологические испытания измерительного преобразователя проводились экспериментально с использованием автоматизированной установки микродугового оксидирования «МДОлаб», а также высокоточного LCR-метра WK6430B методом замещения. В силу особенностей программного обеспечения установки «МДОлаб» измеряемый импеданс пересчитывался в сопротивление и емкость эквивалентной параллельной RC-цепи. Для эксперимента изготовлены образцовые меры импеданса, получены выражения для расчета их сопротивления и емкости. Разработана методика метрологических испытаний, которая предполагает введение поправочного коэффициента для исключения систематической погрешности измерительного преобразователя. *Результаты.* В результате применения предложенной методики метрологических испытаний систематическая погрешность измерения сопротивления и емкости была минимизирована и составила не более 0,02 %; основная относительная погрешность измерения сопротивления и емкости составила не более 0,5 %, что соответствует заявленным требованиям. *Выводы.* Предложенная методика метрологических испытаний позволяет достичь требуемой точности измерения импеданса гальванической ячейки, что говорит о ее эффективности. Разработанный измерительный преобразователь может быть использован для исследования и контроля процесса микродугового оксидирования и электрофизических параметров синтезируемых покрытий.

**Ключевые слова:** микродуговое оксидирование, измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки, методика метрологических испытаний, повышение точности

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

**Для цитирования:** Голубков П. Е., Печерская Е. А., Мельников О. А., Карпанин О. В., Александров В. С., Вареник Ю. А. Метрологические испытания измерительного преобразователя импеданса гальванической ячейки микродугового оксидирования // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 4. С. 51–59. doi:10.21685/2307-5538-2021-4-6

## METROLOGICAL TESTS OF A MICRO-ARC OXIDATION GALVANIC CELL IMPEDANCE

P.E. Golubkov<sup>1</sup>, E.A. Pecherskaya<sup>2</sup>, O.A. Mel'nikov<sup>3</sup>,  
O.V. Karpanin<sup>4</sup>, V.S. Aleksandrov<sup>5</sup>, Yu.A. Varenik<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Penza State University, Penza, Russia  
<sup>1</sup> golpavpnz@yandex.ru, <sup>2</sup> pea1@list.ru, <sup>3</sup> oleg-068@mail.ru,  
<sup>4</sup> karpanino@mail.ru, <sup>5</sup> vsalexrus@gmail.com, <sup>6</sup> yurik\_ru@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The method of micro-arc oxidation allows to obtain protective coatings on products made of metals of the valve group used in various industries. For the synthesis of coatings with specified properties, it is necessary to perform measurements of their electrophysical parameters with guaranteed accuracy. The object of the study is a measuring converter of the impedance of a galvanic cell and the conductivity of an electrolyte in the process of microarc oxidation. The purpose of the study: to achieve the required accuracy characteristics of the impedance measuring converter by developing a methodology and conducting metrological tests. *Materials and methods.* Metrological tests of the measuring converter were carried out experimentally using an automated micro-arc oxidation unit «MDOlab», as well as a high-precision LCR meter WK6430B by substitution method. Due to the features of the MDOLab installation software, the measured impedance was converted into the resistance and capacitance of an equivalent parallel RC circuit. For the experiment, model impedance measures were made, expressions for calculating their resistance and capacitance were obtained. A method of metrological tests has been developed, which involves the introduction of a correction factor to eliminate the systematic error of the measuring converter. *Results.* As a result of the application of the proposed methodology of metrological tests, the systematic error in measuring resistance and capacitance was minimized and amounted to no more than 0.02 %; the main relative error in measuring resistance and capacitance was no more than 0.5 %, which meets the stated requirements. *Conclusions.* The proposed method of metrological tests allows achieving the required accuracy of measuring the impedance of a galvanic cell, which indicates its effectiveness. The developed measuring converter can be used to study and control the process of micro-arc oxidation and the electrophysical parameters of the synthesized coatings.

**Keywords:** micro-arc oxidation, galvanic cell impedance measuring converter, metrological testing methodology, accuracy improvement

**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., Mel'nikov O.A., Karpanin O.V., Aleksandrov V.S., Varenik Yu.A. Metrological tests of a micro-arc oxidation galvanic cell impedance. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2021;(4):51–59. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2021-4-6

### Введение

Автоматизация технологических процессов как один из важнейших элементов современного производства невозможна без измерения и контроля различных физических величин, характеризующих состояние готового изделия или условия его формирования. Однако для новых технологий, к которым относится микродуговое оксидирование (МДО), довольно сложно разработать средства измерений, удовлетворяющие всем предъявляемым требованиям. Например, в настоящее время для исследования свойств (толщины, микротвердости, пористости и т.п.) покрытий, формируемых МДО, используют готовые синтезированные образцы [1, 2], что не позволяет изучить фундаментальные закономерности физических явлений, сопровождающих рост оксидного слоя. Для решения данной проблемы разрабатывается исследовательское и технологическое оборудование; известны, например программно-аппаратные комплексы МДО [3, 4], созданные научными коллективами А. И. Мамаева и А. В. Большенко, которые позволяют определить толщину и пористость МДО-покрытий на основе эквивалентной электрической схемы гальванической ячейки, анализа кривых поляризации напряжения и тока и токовой характеристики переходного процесса. Также довольно интересен метод импедансной спектроскопии, позволяющий не только измерить электрофизические параметры МДО-покрытий, но и исследовать физико-химические аспекты их синтеза. Например, разработанная в работе [5] автоматизированная установка электролитно-плазменной обработки использует данный метод для определения толщины МДО-покрытий по импедансным спектрам с помощью нейронных сетей. Недостатком рассмотренных устройств является низкая точность.

Авторами разработан измерительный преобразователь импеданса гальванической ячейки и проводимости электролита в процессе МДО и проведен его функциональный и метрологический анализ. В данной работе рассмотрена методика метрологических испытаний данного преобразователя, которая позволит подтвердить его высокую точность.

### Материалы и методика

Метрологические испытания измерительного преобразователя проводились экспериментально с помощью разработанной авторами лабораторной установки «МДОлаб» (рис. 1) [6], которая позволяет получать МДО-покрытия и реализует предложенный метод измерения

импеданса. В силу особенностей программного обеспечения импеданс исследуемого образца на выходе измерительного преобразователя представляется в виде сопротивления и емкости эквивалентной параллельной  $RC$ -цепи, поэтому в ходе метрологических испытаний контролировалась точность измерения сопротивления и емкости по двум образцовым мерам, структура которых показана на рис. 2. Образцовая мера № 2 имеет сложную структуру: два параллельных звена  $R_{p1}-C_{p1}$  и  $R_{p2}-C_{p2}$  имитируют импеданс барьерного и пористого слоев покрытия, а резистор  $R_{p3}$  – активное сопротивление электролита. Такая структура в отличие, например, от лестничной схемы [7] более наглядна и удобна для анализа, так как имеет две четко различимые постоянные времени.

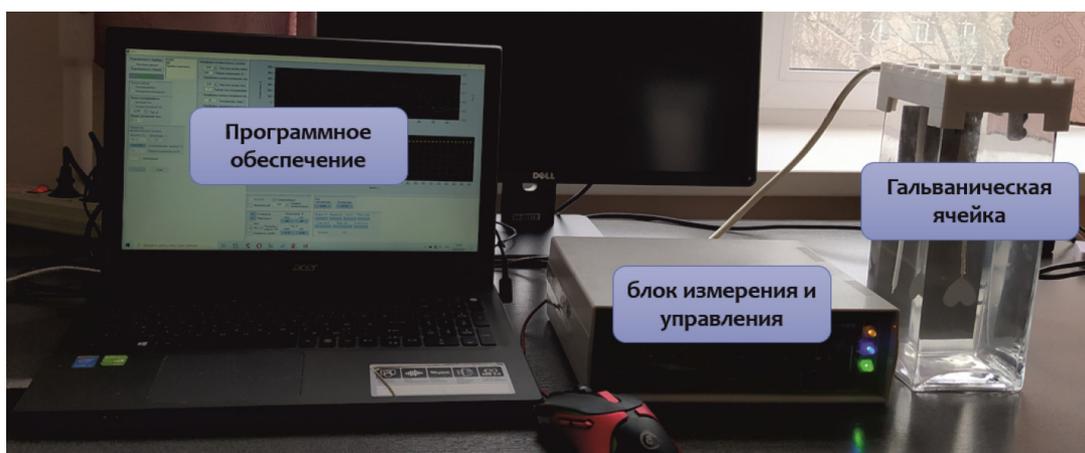


Рис. 1. Установка «МДОлаб»

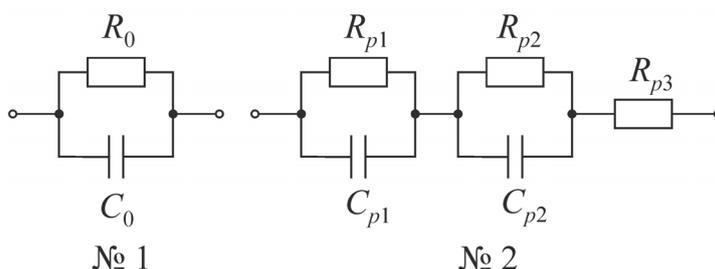


Рис. 2. Структура образцовых мер импеданса:  $R_0$ ,  $C_0$  – сопротивление и емкость покрытия;  $R_{p1}$ ,  $C_{p1}$ ,  $R_{p2}$ ,  $C_{p2}$  – сопротивление и емкость барьерного и пористого слоев покрытия;  $R_{p3}$  – сопротивление электролита

Метрологические испытания измерительного преобразователя проводились методом замещения, при котором вместо гальванической ячейки подключали образцовую меру с известным импедансом, по следующей методике:

1. Измерить точные значения номиналов компонентов образцовых мер высокоточным  $LCR$ -метром  $WK6430B$  (основная погрешность не превышает 0,02 %).

2. Для образцовой меры № 2: выполнить пересчет номиналов компонентов в сопротивление и емкость параллельной  $RC$ -цепи методом преобразования эквивалентных электрических схем (рис. 3) для 10 частот в диапазоне от 20 Гц до 10 кГц по выражениям

$$R_p = \frac{1}{\omega^2 C_s^2 R_s} + R_s, \quad (1)$$

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \omega^2 C_s^2 R_s^2}, \quad (2)$$

$$R_s = R_{s1} + R_{s1} + R_{p3} = \frac{R_{p1}}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} + \frac{R_{p2}}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} + R_{p3}, \quad (3)$$

$$C_s = \left( \frac{1}{C_{s1}} + \frac{1}{C_{s2}} \right)^{-1} = \left( \frac{\omega^2 C_{p1} R_{p1}^2}{1 + \omega^2 C_{p1}^2 R_{p1}^2} + \frac{\omega^2 C_{p2} R_{p2}^2}{1 + \omega^2 C_{p2}^2 R_{p2}^2} \right)^{-1}, \quad (4)$$

где  $R_p$  и  $C_p$  – сопротивление и емкость эквивалентной параллельной  $RC$ -цепи;  $R_0, R_{p1}, R_{p2}, R_{p3}, C_0, C_{p1}, C_{p2}$  – номиналы компонентов образцовых мер;  $\omega$  – циклическая частота.

3. Измерить 20 значений сопротивления  $R_i$  и емкости  $C_i$  образцовой меры в диапазоне частот ( $i$  – порядковый номер частоты), подключив ее вместо гальванической ячейки к установке «МДОлаб».

4. Определить вид закона распределения случайной величины по критерию согласия Пирсона (критерий  $\chi^2$ ) для сопротивления и емкости на одной частоте по методике, изложенной, например, в работе [8]. Для остальных частот принять аналогичный характер распределения.

5. Провести статистическую обработку полученных в п. 3 данных. Определить матожидание  $m_i^R, m_i^C$ , дисперсию  $D_i^R, D_i^C$  и среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_i^R, \sigma_i^C$  сопротивления  $R$  и емкости  $C$  для каждой  $i$ -й частоты диапазона с учетом вида закона распределения.

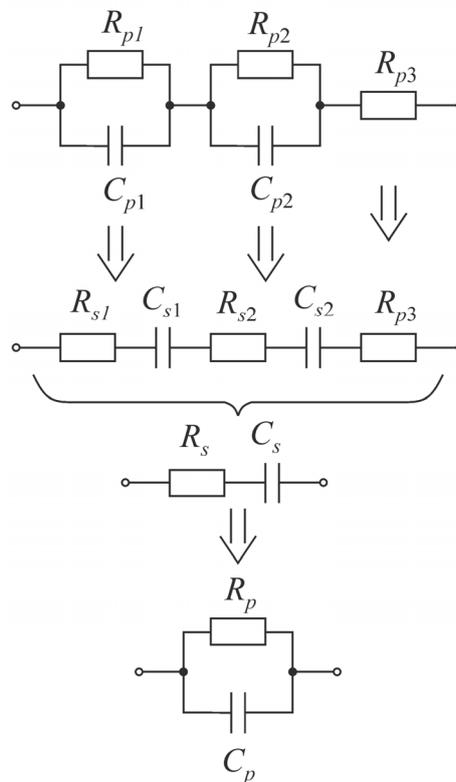


Рис. 3. Расчет комплексной проводимости образцовой меры № 2

6. Определить абсолютную  $\Delta_i^X$  и относительную  $\delta_i^X$  систематическую погрешность измерения сопротивления и емкости на каждой частоте по формулам

$$\Delta_i^X = m_i^X - (X_p)_i, \quad (5)$$

$$\delta_i^X = \frac{\Delta_i^X}{m_i^X}, \quad (6)$$

где  $X$  – измеряемая величина ( $R$  или  $C$ );  $m_i^X$  – матожидание;  $X_p$  – точные значения сопротивления и емкости образцовых мер, полученные в п. 1 или 2 (в зависимости от образцовой меры).

7. Определить доверительный интервал случайной погрешности измерения сопротивления и емкости:

$$X_i = m_i^X \pm t_{\alpha, \nu} \sigma_i^X, \quad (7)$$

где  $\sigma_i^X$  – СКО;  $t_{\alpha, \nu}$  – коэффициент Стьюдента (для доверительной вероятности  $\alpha = 0,95$  и 20 наблюдений  $t_{\alpha, \nu} = 2,086$  [9]).

8. Исключить систематическую погрешность, умножив значения сопротивления и емкости, полученные в п. 3, на поправочный коэффициент  $k_i^X$  для каждой частоты:

$$X_i^* = X_i \cdot k_i^X = X_{изм} \cdot (1 - \delta_i^X), \tag{8}$$

где  $X_i^*$  – уточненные значения сопротивления и емкости.

9. Вычислить уточненные значения матожидания  $m_i^{X*}$ , дисперсии  $D_i^{X*}$  и СКО  $\sigma_i^{X*}$  для выборок, полученных в п. 10.

10. Оценить неисключенные остатки систематической погрешности в абсолютном  $\Delta_i^{X*}$  и относительном  $\delta_i^{X*}$  виде по формулам

$$\Delta_i^{X*} = m_i^{X*} - (X_p)_i, \tag{9}$$

$$\delta_i^{X*} = \frac{\Delta_i^{X*}}{m_i^{X*}}. \tag{10}$$

Определить интервалы  $[-\Delta_i^{R*}, +\Delta_i^{R*}]$  и  $[-\Delta_i^{C*}, +\Delta_i^{C*}]$ , в которых находятся предельные значения неисключенных остатков систематической погрешности измерения сопротивления и емкости.

11. Аналогично (7) найти доверительный интервал случайной погрешности для уточненных значений сопротивления и емкости.

12. Оценить предельные значения случайной погрешности измерений сопротивления  $\Delta_i^{oR}$  и емкости  $\Delta_i^{oC}$  для каждой частоты, пользуясь правилом трех сигм.

13. Определить основную погрешность измерения сопротивления и емкости соответственно по выражениям:

$$\Delta_i^{\Sigma R} = \sqrt{(\Delta_i^{R*})^2 + (\Delta_i^{oR})^2}, \tag{11}$$

$$\Delta_i^{\Sigma C} = \sqrt{(\Delta_i^{C*})^2 + (\Delta_i^{oC})^2}. \tag{12}$$

Рассмотренная методика повышения точности измерительного преобразователя импеданса может быть выполнена в виде программы.

### Результаты

Результаты метрологических испытаний рассмотрим на примере образцовой меры № 2. Точные значения номиналов компонентов образцовой меры равны:  $R_{p1} = 2000$  Ом,  $R_{p2} = 20\ 000$  Ом,  $R_{p3} = 16,5$  Ом,  $C_{p1} = 0,6713$  мкФ,  $C_{p2} = 1,3481$  мкФ. Результаты пересчета сопротивления и емкости образцовой меры по параллельной эквивалентной электрической схеме даны в табл. 1.

Таблица 1

Результаты пересчета сопротивления и емкости образцовой меры по параллельной эквивалентной электрической схеме

Номер (i)	Частота f, Гц	Сопротивление $R_p$ , Ом	Емкость $C_p$ , мкФ
1	20	13285	1,008
2	38	7957	0,8232
3	76	5417	0,6083
4	152	4594	0,4947
5	305	4225	0,4579
6	610	3630	0,4478
7	1220	2380	0,4442
8	2441	1010	0,4394
9	4883	316	0,4232
10	9766	95	0,3693

Фрагменты выборок измеренных значений сопротивления и емкости образцовой меры, полученных по п. 1 рассмотренной методики, представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Результаты измерения сопротивления (фрагменты)

$i$	$f$ , Гц	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом	$R_7$ , Ом
1	20	13147,4	13137,9	13149,1	13155,9	13146,1	13136,2	13156,8
2	38	7933,25	7932,28	7914,98	7940,84	7932,34	7904,17	7911,5
3	76	5433,45	5425,46	5418,61	5438,32	5432,54	5442,95	5434,46
4	152	4637,08	4623,94	4626,3	4632,74	4614,94	4620,91	4620,98
5	305	4290,33	4284,61	4284,73	4281,84	4277,24	4287,48	4284,14
6	610	3729,42	3709,36	3707,13	3711,11	3709,41	3704,54	3698,91
7	1220	2454,47	2442,79	2443,24	2433,67	2440,14	2439,13	2439,55
8	2441	1029,64	1024,78	1024,9	1026,87	1025,51	1023,7	1023,26
9	4883	319,15	318,84	318,772	318,301	318,519	318,135	317,951
10	9766	95,9803	87,7281	87,8152	87,8679	96,2078	96,2206	87,8017

Таблица 3

Результаты измерения емкости (фрагменты)

$i$	$f$ , Гц	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , мкФ	$C_3$ , мкФ	$C_4$ , мкФ	$C_5$ , мкФ	$C_6$ , мкФ
1	20	0,997199	0,997074	0,998302	0,997737	0,997308	0,997575
2	38	0,814054	0,812265	0,812185	0,814225	0,814215	0,813918
3	76	0,600315	0,601583	0,601142	0,600812	0,602092	0,601319
4	152	0,490757	0,490706	0,491455	0,491068	0,490802	0,491011
5	305	0,454609	0,454765	0,454744	0,454728	0,454852	0,45468
6	610	0,445468	0,445504	0,445339	0,445361	0,445391	0,445235
7	1220	0,442397	0,442365	0,442246	0,4424	0,442225	0,442312
8	2441	0,437503	0,43755	0,437185	0,437317	0,437159	0,437268
9	4883	0,42134	0,420954	0,420758	0,420818	0,420755	0,420686
10	9766	0,368918	0,355284	0,355521	0,355834	0,368836	0,368851

Как показал расчет, предельные значения относительных систематических погрешностей  $\delta_i^R$  и  $\delta_i^C$  сопротивления и емкости до введения поправочного коэффициента (п. 6 методики) составили 1,8 и 1,2 % соответственно, что больше требуемого значения (0,5 %), однако после калибровки по п. 8 они были сведены к минимуму ( $10^{-14}$  %) и фактически определялись погрешностью применяемого LCR-метра, что говорит об эффективности методики. Таким образом, на наибольший вклад в основную погрешность измерительного преобразователя вносит случайная погрешность, предельное значение которой как для сопротивления, так и для емкости (табл. 4) не превышает 0,5 %.

Таблица 4

Предельные значения случайной погрешности измерения сопротивления и емкости в абсолютном и относительном виде

Номер ( $i$ )	Частота, Гц	$\Delta_i^{OR}$ , Ом	$\delta_i^{OR}$ , %	$\Delta_i^{OC}$ , мкФ	$\delta_i^{OC}$ , %
1	20	26,909126	0,2025466	$1,657 \cdot 10^{-3}$	0,1643698
2	38	43,113747	0,5417917	$2,566 \cdot 10^{-3}$	0,311735
3	76	22,373777	0,412958	$2,007 \cdot 10^{-3}$	0,3299124
4	152	19,449396	0,4233417	$7,676 \cdot 10^{-4}$	0,1551527
5	305	18,414299	0,4358241	$2,474 \cdot 10^{-4}$	0,0540189
6	610	19,570792	0,4945658	$4,495 \cdot 10^{-4}$	0,100395
7	1220	17,82571	0,4690412	$7,521 \cdot 10^{-4}$	0,1693071
8	2441	10,236019	0,5027891	$9,416 \cdot 10^{-4}$	0,2142914
9	4883	1,348664	0,4264862	$1,233 \cdot 10^{-4}$	0,2912478
10	9766	1,293815	0,5178734	$1,997 \cdot 10^{-4}$	0,4071459

### Заклучение

Проведенные метрологические испытания показали, что разработанный измерительный преобразователь удовлетворяет заявленным требованиям к точности измерений (основная относительная погрешность измерения сопротивления и емкости не превышает 0,5 %). Предложенная методика метрологических испытаний показала свою жизнеспособность: благодаря введению поправочного коэффициента удалось минимизировать систематическую погрешность и повысить точность измерений не менее, чем в 2 раза. Все это позволяет использовать разработанный измерительный преобразователь для исследования и контроля процесса микродугового окисления и электрофизических параметров формируемых покрытий.

### Список литературы

1. Угодчикова А. В. Влияние параметров процесса микродугового окисления на свойства антибактериальных серебросодержащих кальцийфосфатных покрытий // Перспективы развития фундаментальных наук : материалы XIV Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (25–28 апреля 2017 г.). Томск : Изд-во НИ ТПУ, 2017. С. 366–368.
2. Булан И. В., Загоненко В. Ф. Влияние анодного импульса на характеристики оксидных покрытий, полученных микродуговым окислением // Электрофизические методы обработки в современной промышленности : материалы II Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (18–20 декабря 2018 г.). Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2019. С. 98–102.
3. Мамаев А. И., Мамаева В. А., Бориков 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.
4. 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.
5. Фаткуллин А. Р., Парфенов Е. В. Автоматизация технологического процесса плазменно-электролитического окисления на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2016. Т. 20, № 4. С. 38–44.
6. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method // FRUCT 2020 : proc. of the 26th Conference of Open Innovations Association (23–24 April 2020). Yaroslavl, 2020. P. 91–101.
7. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys // Surface & Coatings Technology. 2019. Vol. 369. P. 142–155.
8. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М. : Наука, 1973. Т. 2. 899 с.
9. Фаддеев М. А. Элементарная обработка результатов эксперимента : учеб. пособие. Нижний Новгород : ННГУ, 2010. 122 с.

### References

1. Ugodchikova A.V. Influence of microarc oxidation process parameters on the properties of antibacterial silver-containing calcium phosphate coatings. *Perspektivy razvitiya fundamental'nykh nauk: materialy XIV Mezhdunar. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (25–28 aprelya 2017 g.) = Prospects for the development of fundamental sciences : Materials of the XIV International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists (April 25–28, 2017)*. Tomsk: Izd-vo NI TPU, 2017:366–368. (In Russ.)
2. Bulan I.V., Zagonenko V.F. The influence of the anode pulse on the characteristics of oxide coatings obtained by microarc oxidation. *Elektrofizicheskie metody obrabotki v sovremennoy promyshlennosti: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (18–20 dekabrya 2018 g.) = Electrophysical processing methods in modern industry : materials of the II International Scientific and Practical Conference of Young scientists, postgraduates and students (December 18–20, 2018)*. Perm: Izd-vo PNIPIU, 2019:98–102. (In Russ.)
3. 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 nonmetallic inorganic coatings by localization of high-energy flows at the interface of phases : textbook*. Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010:360. (In Russ.)
4. 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.
5. Fatkullin A.R., Parfenov E.V. Automation of the technological process of plasma-electrolytic oxidation based on indirect control of the coating thickness by electrical characteristics. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2016;20(4):38–44. (In Russ.)

6. Golubkov P., Pecherskaya E., Karpanin O. [et al.]. Development of theoretical foundations of the controlled synthesis of multifunctional coatings by the micro-arc oxidation method. *FRUCT 2020: proc. of the 26th Conference of Open Innovations Association (23–24 April 2020)*. Yaroslavl, 2020:91–101.
7. Buling A., Zerrer J. Increasing the application fields of magnesium by ultraceraamic: Corrosion and wear protection by plasma electrolytical oxidation (PEO) of Mg alloys. *Surface & Coatings Technology*. 2019;369:142–155.
8. Kendall M., St'yuart A. *Statisticheskie vyvody i svyazi = Statistical conclusions and connections*. Moscow: Nauka, 1973;2:899. (In Russ.)
9. Faddeev M.A. *Elementarnaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta: ucheb. posobie = Elementary processing of experimental results : textbook*. Nizhny Novgorod: NNGU, 2010:122. (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 Андреевич Мельников**

аспирант, Пензенский государственный университет (Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: oleg-068@mail.ru

##### **Oleg A. Mel'nikov**

Postgraduate student, 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)

##### **Владимир Сергеевич Александров**

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

##### **Vladimir S. Aleksandrov**

Student, 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)

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

**Поступила в редакцию/Received 06.09.2021**

**Поступила после рецензирования/Revised 13.09.2021**

**Принята к публикации/Accepted 29.09.2021**