

УДК 681.5: 621.35

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОКСИДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОСВЕННОГО КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

А. Р. Фаткуллин, Е. В. Парфенов

[checkmate2007@yandex.ru](mailto:checkmate2007@yandex.ru)

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 03.09.2016*

**Аннотация.** Работа посвящена решению задачи автоматизации технологического процесса плазменно-электролитического оксидирования, применяемого для нанесения защитных покрытий на алюминиевые сплавы в перспективном биполярном импульсном режиме. Проблема измерения ненаблюдаемых параметров поверхностного слоя была решена на основе использования косвенной идентификации состояния системы по информативным характеристикам электрических переходных процессов: постоянные интегрирования, постоянные времени и установившиеся значения тока и напряжения. Разработана структура автоматизированной системы и предложен алгоритм ее работы.

**Ключевые слова:** система управления, автоматизация, плазменно-электролитическое оксидирование, электрические переходные процессы.

### ВВЕДЕНИЕ

Технологический процесс плазменно-электролитического оксидирования (ТП ПЭО) позволяет эффективно наносить защитные покрытия с высокими эксплуатационными свойствами на поверхности деталей из легких сплавов [1]. Высокое качество покрытий, получаемых данным методом, обуславливает расширение их использования в областях промышленности, связанных с авиацией, автомобилестроением, судостроением, медициной и другими. В связи с этим возникает необходимость автоматизация ТП ПЭО для повышения эффективности, улучшения качества обработки, уменьшения энергопотребления, а также снижения количества бракованных изделий. Однако при автоматизации данного процесса необходимо учитывать, что он проводится при высоких напряжениях (400–700 В) и является сложным и нелинейным процессом, функционирующим в условиях неопределенности по параметрам исходной подготовки поверхности и состояния электролита.

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) формирования оксидных покрытий на алюминиевых сплавах направлены не только на программное управление плотностью тока и стабилизацию технологических параметров, но и на

диагностику свойств поверхностного слоя, и завершении процесса при достижении заданной толщины покрытия [2, 3].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для получения ПЭО покрытий с требуемыми характеристиками необходимы автоматизированные системы управления, обеспечивающие текущий контроль параметров состояния поверхностного слоя. В связи с этим возникает необходимость создания контуров обратной связи, обеспечивающих оценку параметров состояния поверхности по результатам регистрации и анализа информативных характеристик.

Исследования показали, что в ходе ТП ПЭО, проводимого в биполярном импульсном режиме, в цепи электролизера возникают электрические переходные процессы, характеризуемые такими параметрами, как постоянные интегрирования, постоянные времени и установившиеся значения тока и напряжения, которые напрямую зависят от условий обработки и текущего состояния поверхностного слоя. Таким образом, одним из путей получения информации о текущем состоянии поверхности является исследование электрических характеристик цепи электролизера как реакцию системы на входные воздействия технологических импульсов напряжения.

Изучение указанных характеристик во всем диапазоне исследованных напряжений показывает, что они плавно изменяются в зависимости от напряжения импульсов и медленно изменяются в ходе процесса ПЭО. Анализ осциллограмм позволил идентифицировать структуру модели процесса ПЭО как объекта управления, разработать эквивалентные схемы замещения и установить закономерности, связывающие характеристики моделей с толщиной покрытия и другими свойствами поверхности, что позволяет перейти к разработке АСУ ТП ПЭО. Установлено, что информативными параметрами для косвенного измерения толщины покрытия в ходе ПЭО являются (рис. 1): постоянная времени  $T_3$ , остаточное значение напряжения  $U_{ост}$  и сопротивление покрытия  $R_1$  [4, 5]. Квадрат коэффициента парной корреляции с толщиной покрытия для них составил не менее 0,96.

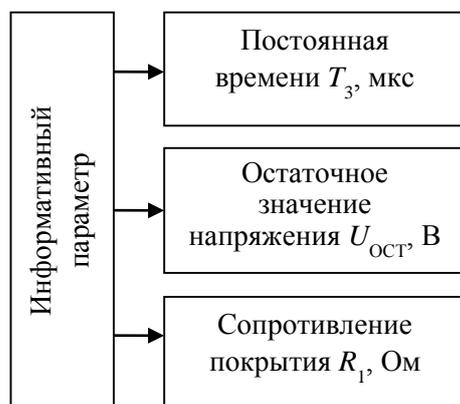


Рис. 1. Информативные параметры для идентификации толщины покрытия в ходе ПЭО

Таким образом, целью исследования является разработка автоматизированной системы управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования в импульсном биполярном режиме на основе контроля толщины покрытия по указанным выше электрическим характеристикам системы.

#### СТРУКТУРА АСУ ТП ПЭО В ИМПУЛЬСНОМ БИПОЛЯРНОМ РЕЖИМЕ

На рис. 2 представлена структурная схема системы управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по трем параметрам: значению постоянной времени  $T_3$ , остаточного значения напряжения  $U_{ост}$  и сопротивления покрытия  $R_1$ . Разработанная система включает оператора установки, управляющую ЭВМ, систему под-

держки температуры электролита  $T^\circ$ , импульсный биполярный технологический источник питания и электролизер для ПЭО.

Управляющая ЭВМ содержит задающее устройство, аналого-цифровой преобразователь, блоки расчета электрических характеристик, элементов схемы замещения, текущего значения толщины покрытия  $h_{тек}$  по электрическим характеристикам, блоки усреднения  $h_{тек}$  и сигнализации. Задающее устройство предназначено для ручного задания оператором целевого значения толщины покрытия  $h_{ц}$ , а также входных значений параметров источника питания: среднего значения напряжения  $U_0$  и амплитуды эквивалентной синусоиды  $U_1$ , частоты  $f$ . Задающее устройство рассчитывает требуемые значения температуры электролита  $T^\circ$ , положительного  $U_p$  и отрицательного  $U_n$  импульсов напряжения, а также коэффициентов заполнения  $d_1$  и  $d_2$ .

Блок расчета электрических характеристик выполняет расчет постоянных интегрирования, постоянных времени и установившихся значений электрических переходных процессов, возникающих на электролизере из осциллограмм напряжения и тока.

Блок расчета элементов схемы замещения выполняет расчет сопротивлений, емкостей и индуктивностей по значениям постоянных интегрирования, постоянных времени и установившихся значений для электрических переходных процессов. Выбор схемы замещения зависит от приложенных значений напряжений  $U_0$  и  $U_1$ , расчет границ их применимости приведен в работе [5].

Значения постоянной времени  $T_3$ , остаточного значения напряжения  $U_{ост}$  и сопротивления покрытия  $R_1$  поступают на входы блоков расчет толщины по соответствующему параметру. Блок усреднения рассчитывает текущее значение толщины покрытия  $h_{тек}$ , поступающее на вход блока сравнения, который сравнивает значения  $h_{ц}$  и  $h_{тек}$ . Если  $h = h_{тек}$ , то на выходе блока сравнения формируется сигнал совпадения  $\epsilon$ , который поступает на вход блока сигнализации; данный блок выдает оператору сигнал о необходимости останова процесса. Уведомление оператора производится о необходимости останова процесса при достижении целевой толщины покрытия или о нештатном прекращении процесса.

Модуль стабилизации температуры содержит регулятор температуры, холодильник и нагреватель. Регулятор температуры обеспечивает стабилизацию значения температуры электролита  $T^\circ$  на требуемом уровне.

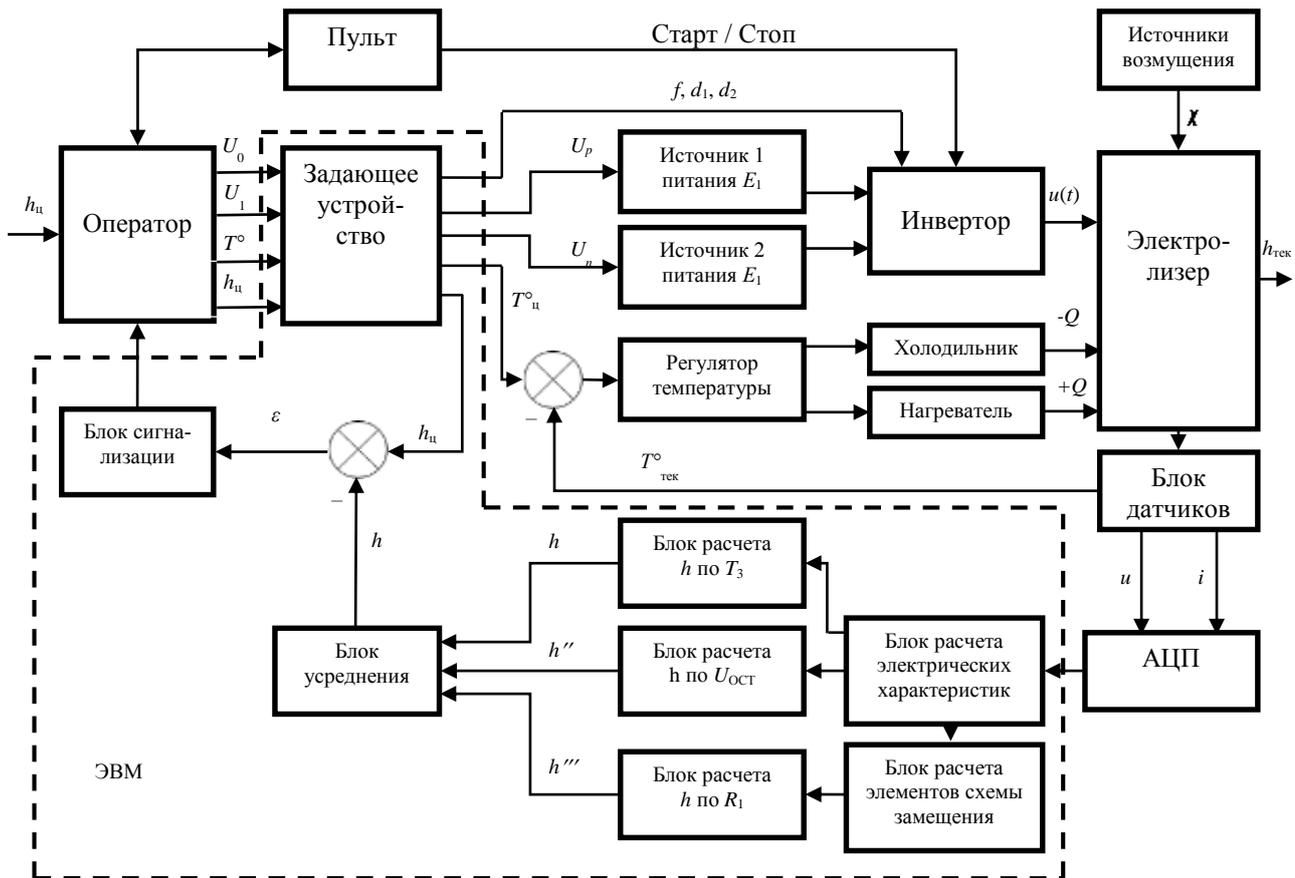


Рис. 2. Структурная схема АСУ ТП ПЭО

Технологический источник питания для ПЭО содержит два источника постоянного напряжения и инвертор, подключенный к электролизеру, представляющему собой ванну, заполненную электролитом, в которую помещается обрабатываемая деталь.

Технологический источник питания обеспечивает протекание процесса ПЭО и дает возможность управления толщиной покрытия детали  $h$  в ходе процесса за счет изменения амплитудных значений импульсов напряжения, частоты, коэффициента заполнения, и являются исполнительными механизмами системы. В результате воздействия импульсного напряжения происходит модификация поверхности детали. Формирование ПЭО покрытия происходит за счет энергии, вводимой в канал микродугового разряда, энергии, идущей на джоулев нагрев приэлектродной области и энергии, расходуемой на электрохимические реакции.

На установку для ПЭО, функционирующую в условиях неопределенности, воздействуют возмущения  $\chi$ . Наиболее типичными возмущениями являются случайные отклонения параметров питающего напряжения от стандартных. Неопределенность заключается в неполной информации о технологической наследственности состояния

поверхности и о параметрах выработки электролита.

Блок датчиков предназначен для измерения текущего состояния температуры электролита и мгновенных значений напряжения и тока.

Таким образом, разработанная структура системы управления за счет использования контура контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам обеспечивает контроль длительности процесса ПЭО, проводимого в импульсном биполярном режиме, и его завершение при достижении целевого значения толщины покрытия  $h_{ц}$ .

#### АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ТП ПЭО

Анализ способов контроля толщины покрытия и шероховатости поверхности позволяет предложить способ управления процессом плазменно-электролитического оксидирования в биполярном импульсном режиме на основе управления длительностью процесса ПЭО на основе контроля толщины покрытия по  $T_3$ ,  $U_{ост}$  и  $R_1$ . Данный способ заключается в измерении и анализе в реальном масштабе времени информативных характеристик электрических переходных процессов, возникающих на электролизере в импульсном биполярном режиме ПЭО.

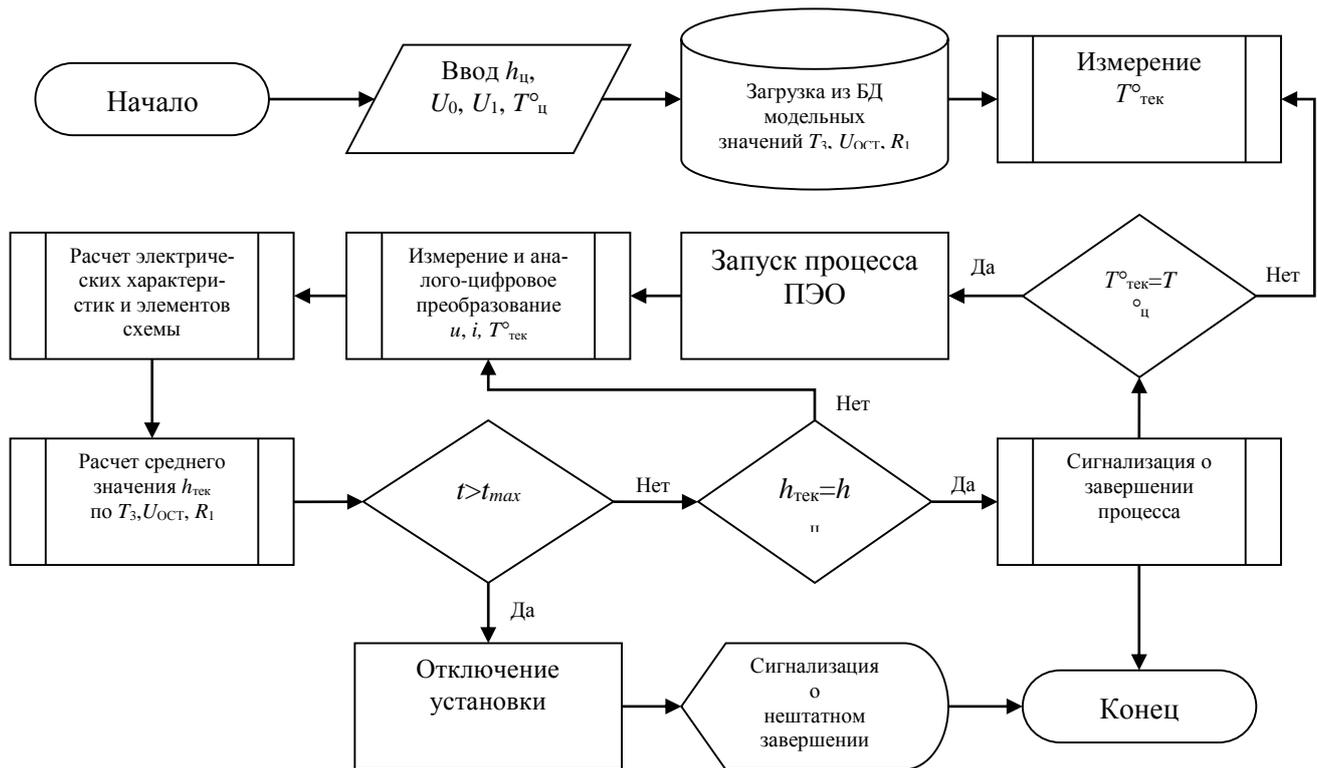


Рис. 3. Блок-схема алгоритма управления ТП ПЭО на основе контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам

Происходит косвенное измерение текущей толщины покрытия  $h_{\text{тек}}$  и отключение источника питания от электролизера при достижении  $h_{\text{тек}}=h_{\text{ц}}$ . Алгоритм предложенного способа управления представлен на блок-схеме (рис. 3).

На первой, подготовительной, стадии оператор вводит целевое значение толщины покрытия  $h_{\text{ц}}$ , загружает из базы данных ТП ПЭО требуемые значения напряжения обработки  $U_0$  и  $U_1$  и температуры электролита  $T_{\text{ц}}^0$ , и выбираются эмпирические диагностические модельные функции  $h(T_3), h(U_{\text{ост}}), h(R_1)$ . После достижения заданной температуры электролита оператор получает от компьютера разрешение на запуск установки.

На второй стадии оператор вручную производит запуск процесса ПЭО. Контроль толщины покрытия производится с интервалом в 1 минуту на основе обработки мгновенных значений напряжения и тока. Осциллограммы передаются в ЭВМ, которая, в соответствии с алгоритмом программы анализа электрических переходных характеристик, измеряет текущие значения постоянных времени, постоянных интегрирования, установившихся значений тока и напряжения, а также происходит расчет сопротивления покрытия  $R_1$ . Далее ЭВМ осуществляет расчет  $h_{\text{тек}}$  по

постоянной времени  $T_3$ , остаточному значению напряжения  $U_{\text{ост}}$  и сопротивлению покрытия  $R_1$ , которые сильно коррелированы с толщиной покрытия. После расчета  $h_{\text{тек}}$  происходит его сравнение с  $h_{\text{ц}}$ . Если  $h_{\text{тек}}=h_{\text{ц}}$ , то оператору выдается рекомендация о завершении ТП ПЭО. Если  $h_{\text{тек}} \neq h_{\text{ц}}$ , то цикл повторяется и функционирует до тех пор, пока не выполнится условие  $h_{\text{тек}}=h_{\text{ц}}$ , не произойдет тайм-аут ( $t > t_{\text{max}}$ ) или ошибка оборудования.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Апробирование результатов использования предложенной АСУ ТП ПЭО проводилось в совместной ФГБОУ ВО «УГАТУ» и АО «Кумертауское авиационное производственное предприятие» научно-исследовательской лаборатории плазменно-электролитического оксидирования деталей вертолетной техники.

Эффективность АСУ ТП ПЭО оценивали в ходе формирования покрытия на образцах из алюминия в растворе, содержащем 1 г/л КОН, 2 г/л  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  и 2 г/л  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  при температуре  $20^\circ\text{C}$  в течение 1–60 минут в биполярном импульсном режиме при напряжении (+600/–100 В). Выбирались различные режимы – формирования как тонкослойных, так и толстослойных покрытий.

При этом регистрировались осциллограммы напряжения и тока через интервалы времени  $\Delta t_n=1$  мин.

На рис. 4 приведены осциллограммы, фиксируемые АСУ ТП ПЭО в импульсном биполярном режиме. На осциллограммах видны электрические переходные процессы, как на кривых напряжения, так и на кривых тока. Наиболее заметный переходной процесс в кривой напряжения присутствует на спаде положительного импульса. Постоянная времени спада  $T_3$  связана с толщиной покрытия, так как заряд, накопленный в эквивалентной емкости покрытия, разряжается в условиях отключенного источника во время паузы через эквивалентное сопротивление покрытия  $R_1$ .

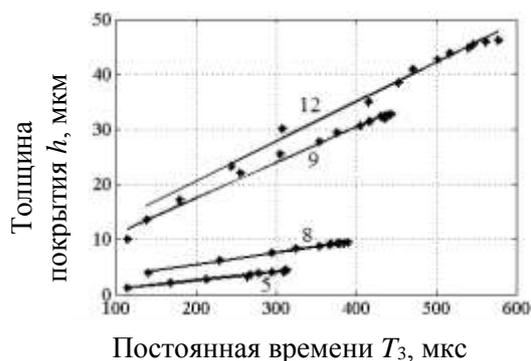
Толщину покрытия  $h$  определяли в соответствии со способом [4] с использованием постоянной времени  $T_3$  спада положительного импульса во время паузы по формуле:

$$h=k_1+k_2 \cdot T_3,$$

где  $k_1$  и  $k_2$  – эмпирические коэффициенты, зависящие от природы обрабатываемого материала и состава электролита, определяемые по тарировочным кривым (рис. 5). После обработки толщину покрытия на образцах также измеряли вихревым толщиномером Defelsko Positector 6000 и усредняли данные по 10 измерениям.

Результаты приведены в табл. 1, из которой видно, что относительная погрешность измере-

ния, определенная в процессе плазменно-электролитического оксидирования с помощью указанного способа, для условий, соответствующих управляющему сигналу №12 ( $U_0=285$  В,  $U_1=385$  В) не превышает 9%, а среднее значение в течении всего эксперимента составляет 4%, для условий, соответствующих управляющему сигналу №10 ( $U_0=245$  В,  $U_1=385$  В) – 10% и 3,7% соответственно. Использованный способ работоспособен в широком диапазоне условий обработки, как при создании толстослойных, так и тонкослойных покрытий.



**Рис. 5.** Тарировочные прямые, соответствующие номерам управляющих сигналов: 5 –  $U_0=225$  В,  $U_1=305$  В; 8 –  $U_0=285$  В,  $U_1=305$  В; 9 –  $U_0=225$  В,  $U_1=385$  В; 12 –  $U_0=285$  В,  $U_1=385$  В



**Рис. 4.** Осциллограммы, фиксируемые АСУ ТП ПЭО для управляющего сигнала № 12

Таблица 1

**Результаты эффективности оценки толщины покрытия в ходе обработки  
с использованием АСУ ТП ПЭО**

Время, мин	Толщина покрытия, измеренная вихреговым толщиномером, мкм Управляющий сигнал №12	Толщина покрытия, определенная в соответствии со способом [4], мкм	Относительная погрешность, (%)	Толщина покрытия, измеренная вихреговым толщиномером, мкм Управляющий сигнал №10	Толщина покрытия, определенная в соответствии со способом [4], мкм	Относительная погрешность, (%)
5	13,6±1,0	14,7±1,3	8,09	9,8±0,7	10,7±1,0	9,18
10	23,3±1,7	24,9±2,2	6,87	17,4±1,3	19,0±1,7	9,32
20	35±2,6	36,2±2,7	3,43	27,7±2,1	28,2±2,1	1,81
30	40,9±3,1	39,2±2,9	4,16	33,8±2,5	31,8±2,4	5,92
40	43,9±3,3	42,2±3,2	3,87	37,5±2,8	37,1±2,8	1,07
50	45,4±3,4	43,6±3,3	3,96	39,7±3,0	38,0±2,9	4,28
60	46,2±3,5	46,0±3,4	0,43	41,0±3,1	41,2±3,1	0,49

### ВЫВОДЫ

Таким образом, разработан и реализован в составе АСУ ТП метод управления технологическим процессом плазменно-электролитического оксидирования в импульсном биполярном режиме на основе косвенного контроля толщины покрытия по электрическим характеристикам, обеспечивающий повышение точности формирования покрытия за счет своевременного останова процесса при достижении заданной толщины покрытия, и позволяющий в развитии разрабатывать системы оптимального динамического управления процессом ПЭО с учетом ненаблюдаемых до настоящего момента переменных, характеризующих состояние поверхностного слоя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суминов И. В.** Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Суминов И. В., Белкин П., Эпельфельд Э., Людин В., Крит Б., Борисов А. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2011. 464 с. [I.V. Suminov. Plasma electrolytic modification of surface of metals and alloys / I.V. Suminov, P.Belkin, A. Epelfeld, V. Lyudin, B. Crete, A. Borisov. M.: Technosphere, 2011. 464 p.]
2. **Cassidy V. M.** Automation comes to anodizing // Modern Metals. Vol. 50, No.1, 1994. P. 4–7. [V.M. Cassidy Automation comes to anodizing // Modern Metals. Vol. 50, No.1, 1994. P. 4–7.]
3. **Парфенов Е. В.** Автоматизированная технологическая установка твердого анодирования деталей вертолетов с диагностикой толщины покрытия / Парфенов Е. В., Фаткуллин А. Р., Лазарев Д. М., Шевчук И. Ю., Даутов А. И. // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 3 (64). С. 73–79. [E. V. Parfenov,

A. R. Fatkullin, D. M. Lazarev, I. Y. Shevchuk, A. I. Dautov / Automated technological apparatus for helicopter parts hardcoat anodisation with diagnostics of the coating thickness // Vestnik UGATU. 2014. T. 18, № 3 (64). S. 73–79.]

4. **Патент 2540239 (РФ).** Способ определения толщины покрытия в ходе процесса плазменно-электролитического оксидирования / Фаткуллин А. Р., Парфенов Е. В., Ерохин А. Л., Лазарев Д. М., Даутов А. И. Опубл. 10.02.2015. Бюл. №. 4 [Patent No. 2540239 (Russian Federation). Method for determining coating thickness during the process of plasma electrolytic oxidation / A. R. Fatkullin, E. V. Parfenov, A. L. Yerokhin, D. M. Lazarev, A. I. Dautov. Publ. 02/10/2015. Bull. Number 4]

5. **Fatkullin A. R.** Effect of positive and negative pulse voltages on surface properties and equivalent circuit of the plasma electrolytic oxidation process / A. R. Fatkullin, E. V Parfenov, A. L. Yerokhin, D. M Lazarev, A. Matthews. // Surface and Coatings Technology, Volume 284, 25 December 2015, P. 427–437. [A. R. Fatkullin, E. V Parfenov, A. L. Yerokhin, D. M Lazarev, A. Matthews. Effect of positive and negative pulse voltages on surface properties and equivalent circuit of the plasma electrolytic oxidation process // Surface and Coatings Technology, Volume 284, 25 December 2015, P. 427–437.]

### ОБ АВТОРАХ

**ФАТКУЛЛИН Азамат Раисович**, ст. преп. каф. естественно-научных и общетехн. дисциплин (филиал в г. Кумертау). Дипл. инж. по авиац. приб. и изм.-выч. компл. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. автоматизац. электрохим. проц.

**ПАРФЕНОВ Евгений Владимирович**, проф. каф. теоретических основ электротех. Дипл. инж. по пром. электрон. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по автом. и упр. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. моделирования, диагностики и управления электрохим. технол. проц.

**METADATA**

**Title:** Automation of plasma electrolytic oxidation technological process using indirect coating thickness estimation via electrical characteristics

**Authors:** A. R. Fatkullin, E. V. Parfenov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** [checkmate2007@yandex.ru](mailto:checkmate2007@yandex.ru)

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 20, no. 4(74), pp. 38–44, 2016. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The work is devoted to a problem of automation of plasma electrolytic oxidation technological process applied for advanced bipolar pulsed mode deposition of protective coatings on aluminum alloy surfaces. The estimation problem for unobservable parameters of the surface layer has been solved via indirect system identification using informative characteristics of electrical transients: integration constants, time constants and steady state the values of currents and voltages. The structure of the proposed automated system and algorithm of its operation have been discussed.

**Key words:** control system, automation, plasma electrolytic oxidation, electrical transients

**About authors:**

**FATKULLIN, Azamat Raisovich**, Senior Lecturer at Dept. of General Science and Engineering (Kumertau campus). DI. Eng. in Aviation Instruments and Information Complexes (USATU, 2007). Research in the area of electrochemical processes automation.

**PARFENOV, Evgeny Vladimirovich**, Professor, Dept. of Theoretical Basis of Electrical Engineering. DI. Eng. in Industrial Electronics (USATU, 1997). D. Sc. in Engineering (UGATU, 2012). Research in the area of modelling, diagnostics and control for electrochemical technological processes.