

Е. В. ПАРФЕНОВ

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ОСНОВЕ ПАССИВНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Представлены подходы к управлению технологическими процессами электролитно-плазменной обработки на основе пассивной идентификации свойств поверхностного слоя. Рассмотрена методика статистического спектрального анализа тока электролизера, позволяющая выявлять скрытые закономерности изменения информативных параметров, коррелированные с динамикой состояния поверхности. Представлены способы пассивной идентификации свойств поверхностного слоя при электролитно-плазменном полировании и удалении покрытий и способы управления длительностью процесса на их основе. *Электролитно-плазменная обработка; диагностика технологических процессов; автоматизация и управление; статистический спектральный анализ; пассивная идентификация*

### ВВЕДЕНИЕ

Решение проблем обеспечения качества поверхностного слоя при электролитно-плазменной обработке (ЭПО) в ходе изготовления и ремонта деталей современного двигателестроения неразрывно связано с созданием автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП). В настоящее время процессы электролитно-плазменной обработки применяются для формирования защитных покрытий, полирования поверхности сталей и сплавов, химико-термической обработки деталей [1–3]. Предложено использование электролитно-плазменного метода для удаления защитных покрытий при ремонте лопаток газотурбинных двигателей [4].

Технологический процесс ЭПО является сложной и нелинейной системой, функционирующей в условиях неопределенности по параметрам подготовки исходной поверхности, качеству электропитания источника тока и составу рабочего электролита. Обеспечение воспроизводимости результатов при обработке ответственных деталей сложной формы требует оценки свойств поверхностного слоя в ходе процесса. Однако прямое измерение параметров состояния поверхности во время обработки затруднено из-за окружающей обрабатываемую деталь парогазовой оболочки (ПГО), в которой горят микроаряды, обеспечивающие интенсивное целевое воздействие на поверхностный слой. В связи с этим оценка свойств поверхностного слоя требует разработки методов косвенной идентификации, позволяющих на основе измерения наблюдаемых параметров вычислять ненаблюдаемые параметры состояния поверх-

ности. Данные методы косвенной идентификации формируют новые контуры обратной связи в составе АСУ ТП ЭПО.

Достижение целевого состояния поверхностного слоя невозможно без создания алгоритмов управления технологическим процессом ЭПО, использующих новые контуры обратной связи. Нелинейность и многосвязность АСУ ТП ЭПО, отсутствие общепринятых теоретических моделей процесса не позволяет использовать стандартные подходы теории автоматического управления и требует применения современных средств моделирования и управления с использованием систем искусственного интеллекта.

Целью данной работы является создание алгоритмов и способов управления длительностью технологических процессов электролитно-плазменной обработки парогазовой оболочкой на основе пассивной идентификации свойств поверхностного слоя.

### АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ИДЕНТИФИКАЦИИ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ

Для решения поставленных проблем разработаны методы активной и пассивной идентификации параметров состояния поверхности с применением статистического спектрального анализа сигналов тока и напряжения, измеренных в ходе процессов ЭПО [5, 6].

Анализ особенностей различных типов ЭПО показывает, что методы активной идентификации наилучшим образом подходят для процессов, в ходе которых на поверхности образуется прочный оксидный слой, а методы пассивной идентификации – для процессов с ПГО. На оксидном слое и/или парогазовой оболочке происходит основное падение напряжения в системе, и процессы в них определяют модифицирующее

воздействие на поверхность, следовательно, их электрические свойства коррелируют с состоянием поверхностного слоя [7].

Различия в применимости методов идентификации заключаются в свойствах слоя, обладающего максимальным сопротивлением в цепи. В отличие от стационарного оксидного слоя, парогазовая оболочка – квазистационарный объект, существующий только в процессе ЭПО, поэтому при наличии до обработки оксидного слоя на поверхности детали, сплошная парогазовая оболочка в ходе процесса ЭПО, как правило, не образуется. Квазистационарная парогазовая оболочка имеет вольтамперную характеристику с круто падающим участком в диапазоне рабочих напряжений от 200 до 400 В, поэтому при появлении ПГО в цепи электролизера генерируются шумовые колебания тока в диапазоне частот 1...10000 Гц с амплитудой, сопоставимой со средним значением тока [8]. Форма спектра колебаний тока зависит от типа кипения в ПГО и от состояния поверхности, что позволяет применять спектральный метод пассивной идентификации для оценки свойств поверхностного слоя в ходе процессов ЭПО с парогазовой оболочкой. Применение импедансного метода активной идентификации к таким процессам затруднено из-за сильного зашумления сигнала тока. Такое разделение хорошо иллюстрируется отличиями традиционных процессов электролитно-плазменного полирования при постоянном напряжении (с пузырьковой ПГО) и плазменно-электролитического оксидирования при постоянном токе (с микроразрядами в порах покрытия) [9, 10].

Метод пассивной идентификации основан на гипотезе о том, что спектральный состав колебаний тока, вызванных кипением ПГО, коррелирован с распределением пузырьков пара и газа по размерам, которые зависят от шероховатости и фазового состояния поверхностного слоя.

#### МЕТОДИКА СТАТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Пассивная идентификация параметров состояния поверхности проводится с использованием статистического спектрального анализа сигналов тока и напряжения, измеримых в ходе процессов ЭПО.

#### Вычисление статистического спектра

Спектральный состав сигнала  $y(t)$  определяется на основе преобразования Фурье  $\underline{Y}(f)$  [11]:

$$\underline{Y}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} y(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота. Однако интеграл (1) содержит бесконечные пределы интегрирования, что недостижимо на практике, поэтому при оценке спектрального состава используется финитный спектр  $\underline{Y}_T(t, f)$ , представляющий собой практически доступную оценку  $\underline{Y}(f)$  для сигнала  $y(t)$ , зарегистрированного в течение времени  $T$ , и центрированную относительно момента времени измерения  $t$  [12]:

$$\underline{Y}_T(t, f) = \int_{t-T/2}^{t+T/2} y(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (2)$$

Для снижения влияния случайных воздействий используется статистический спектр, усредненный, например, на интервале времени  $\Delta t$ :

$$S_{y_T}(t, f)_{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t/2}^{t+\Delta t/2} S_{y_T}(v, f) dv, \quad (3)$$

где  $S_{y_T}(t, f)$  – нормализованный квадрат модуля финитного спектра, или периодограмма

$$S_{y_T}(t, f) = \frac{1}{T} |\underline{Y}_T(t, f)|^2. \quad (4)$$

В отличие от обратимого преобразования (2), статистическое преобразование (3)-(4) не является обратимым, то есть по нему невозможно восстановить сигнал  $y(t)$ . Однако при статистической оценке спектрального состава сигнала  $y(t)$  в этом нет необходимости.

В отличие от комплексного спектра  $\underline{Y}_T(t, f)$  статистический спектр  $S_{y_T}(t, f)_{\Delta t}$  является чисто действительным; при статистическом усреднении информацией о начальной фазе спектральных составляющих жертвуют для уточнения более важной информации об их амплитуде.

Периодограмма тесно связана с автокорреляционной функцией. В соответствии с теоремой свертки для преобразования Фурье  $F\{\cdot\}$

$$S_{y_T}(t, \cdot) = F\{R_{y_T}(t, \cdot)\}, \quad (5)$$

где  $R_{y_T}(t, \tau)$  – коррелограмма или финитная автокорреляционная функция:

$$\begin{aligned} R_{y_T}(t, \tau) &= \\ &= \frac{1}{T} \int_{t-(T-|\tau|)/2}^{t+(T-|\tau|)/2} y(v + \tau/2)y(v - \tau/2)dv \times \\ &\times [2Tu_{2T}(\tau)], \end{aligned} \quad (6)$$

где  $u_{2T}(\tau)$  – прямоугольное окно с основанием  $2T$  и высотой  $1/(2T)$ .

Вычисление статистического спектра может производиться четырьмя путями. Во-первых, периодограмма может вычисляться либо по формуле (4), либо (5). Во-вторых, усреднение при вычислении статистического спектра может проводиться либо по времени (3), либо по частоте:

$$S_{y_T}(t, f)_{\Delta f} = \frac{1}{\Delta f} \int_{v-\Delta f/2}^{v+\Delta f/2} S_{y_T}(t, v) dv. \quad (7)$$

Для линейных инвариантных во времени (или стационарных) систем взятие предела от статистического спектра (3) приводит к предельному спектру

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} S_{y_T}(t, f)_{\Delta t} = \bar{S}_y(f), \quad (8)$$

причем порядок взятия пределов изменять нельзя. Предельный спектр (8) существует, если существует предельная автокорреляционная функция для  $y(t)$ :

$$\bar{R}_y(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} y(t + \frac{\tau}{2}) y(t - \frac{\tau}{2}) dt. \quad (9)$$

Все четыре пути вычисления приводят к очень близким оценкам статистического спектра, которые при правильном выборе параметров усреднения, определяемых временными и частотными окнами, стремятся к предельному спектру для линейных инвариантных во времени систем [12].

### Динамические спектры

Однако процесс электролитно-плазменной обработки принципиально является изменяющейся во времени (нестационарной) системой, потому что в его ходе намеренно производится изменение свойств поверхностного слоя, следовательно, свойства системы в целом также изменяются во времени.

Более того, данная система является нелинейной из-за фазовых превращений в поверхностном слое, кипения электролита и горения микрозарядов в ПГО [7, 10]. Такой анализ показывает, что процесс электролитно-плазменной обработки является нелинейной нестационарной системой.

К счастью, данная система изменяется во времени достаточно медленно, так как обычно длительность обработки составляет от нескольких минут до нескольких часов. Данный факт дает возможность определить интервалы времени эргодичности  $T^*$ , в течение которых систему можно рассматривать как инвариантную во времени, так что усреднение характеристик системы (для получения статистически надежных

оценок) может быть проведено по времени вместо ансамбля реализаций [13].

Для оценки влияния нелинейности могут быть применены подходы глобальной и локальной линеаризации. В результате процесс электролитно-плазменной обработки может быть представлен как кусочно-линейная стационарная система на каждом интервале времени эргодичности.

Для статистического спектрального анализа нестационарных систем уравнение (3) может быть использовано при условии, что интервал времени усреднения меньше интервала времени эргодичности процесса ЭПО (но больше времени измерения  $T$ ):

$$T < \Delta t < T^*. \quad (10)$$

В этом случае при усреднении будет уменьшено влияние случайных возмущений, а медленные изменения системы будут проследиваться в оценках статистического спектра. Получаемые периодограммы и статистические спектры будем называть динамическими.

Анализ особенностей регистрируемых при ЭПО сигналов показывает, что данные характеризуются большим объемом, значительной длительностью и невысокой частотой дискретизации. Сравнительные рекомендации по применению методов расчета статистических спектров указывают на целесообразность применения периодограммных методов с усреднением по времени [12].

На основе анализа динамики свойств поверхностного слоя для различных типов ЭПО установлено, что интервал эргодичности процесса составляет от 10 до 100 с, что позволяет усреднять спектральные характеристики сигналов тока и напряжения для получения статистически достоверной оценки.

### Разрешающая способность спектров

Как при вычислении периодограммы (2), (4), так и при усреднении во времени (3) используются конечные пределы интегрирования, которые могут быть заменены на бесконечные при использовании обуживающих окон.

Вычисление периодограммы (4) может быть представлено следующим образом:

$$\begin{aligned} S_{y_T}(t, f) &= \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} y(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right|^2 = \\ &= \frac{1}{T} \left| \int_{-\infty}^{\infty} a_T(\tau) y(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right|^2, \quad (11) \end{aligned}$$

где  $a_T(t)$  – временное окно, ограниченное временем  $T$  измерения сигнала. Такая импульсоподобная функция окна  $a_T(t)$  центрирована вокруг момента измерения  $t$  и не равна нулю только в пределах  $t \pm T/2$ . Расчет статистического спектра (3) может быть представлен в виде свертки периодограммы (11) с импульсоподобным окном  $g_{\Delta t}(t)$  длительностью  $\Delta t$ :

$$\begin{aligned} S_{y_T}(t, f)_{\Delta t} &= \int_{-\infty}^{\infty} S_{y_T}(t - \tau, f) g_{\Delta t}(\tau) d\tau = \\ &= S_{y_T}(t, f) \otimes g_{\Delta t}(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Фактически в формулах (2) и (3) используется прямоугольное окно. Выбор окон  $a_T(t)$  и  $g_{\Delta t}(t)$  определяет разрешение спектральной оценки по частоте и по времени, соответственно, а также степень утечки спектра и надежность оценки.

Разрешение по времени и по частоте для периодограммы (12) определяется эффективной шириной обуживающего окна  $a_T(t)$  и составляет соответственно

$$T \text{ и } \Delta f = 1/T. \quad (13)$$

Для нестатистических спектров произведение разрешений  $T\Delta f$  составляет величину порядка единицы.

Для усредненной по времени периодограммы (12) разрешение по частоте также определяется окном  $a_T(t)$  и равняется  $\Delta f$ . Разрешение по времени определяется сглаживающим окном  $g_{\Delta t}(t)$  и равно  $\Delta t$ , то есть при статистическом усреднении разрешение по времени ухудшается, так как выполняется условие (10). Однако при этом значительно улучшается надежность оценки спектра:

$$R = \Delta t \Delta f \gg 1. \quad (14)$$

Степень утечки спектра определяется формой спектрального окна  $A_{\Delta t}(f)$ , соответствующего временному обуживающему окну  $a_T(t)$  и представляющему собой его преобразование Фурье:

$$A_{\Delta t}(f) = F\{a_T(t)\}. \quad (15)$$

Величина утечки спектра определяется размером боковых лепестков окна  $A_{\Delta t}(f)$  и является одним из параметров оптимизации при выборе типа обуживающего окна [14]. Следует отметить, что из ряда наиболее часто используемых окон, прямоугольное окно (Дирихле) обладает наименее худшими свойствами по степени утечки спектра, поэтому при статистическом спектральном анализе целесообразно использование действительно спадающих к краям окон, например, треугольного (Бартлетта), косинусоидальных (фон Хана, Хэмминга) и др.

### Расчет статистических спектров в дискретном времени

Расчет спектральных оценок для сигналов тока и напряжения при ЭПО ведется для дискретных сигналов. Рассмотрим особенности статистического спектрального анализа для дискретного времени.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) для последовательности  $\{y_n\} = \{y_0, y_1, \dots, y_{N-1}\}$  в дискретном времени  $n$  представляет собой последовательность  $\{\underline{Y}_k\} = \{Y_0, Y_1, \dots, Y_{N-1}\}$  и определяется как [15]

$$\begin{aligned} \underline{Y}_k &= \sum_{n=0}^{N-1} y_n e^{-j(2\pi/N)kn}, \\ k &= 0, 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (16)$$

Последовательность  $\{\underline{Y}_k\}$ , в отличие от  $\{y_n\}$ , является комплексозначной. Она представляет собой дискретную плотность гармонических составляющих, содержащихся в последовательности  $\{y_n\}$ , масштабированных по  $N$ . Частоты  $f_k$  этих составляющих равны  $0, 1/N, 2/N, \dots, (N-1)/N$ , что указывает на то, что ДПФ не может различать частоты, отличающиеся менее чем на  $1/N$ . Данное соотношение связано с теоремой Котельникова, устанавливающей минимум двукратное соотношение между максимальной частотой в ограниченном сверху спектре сигнала и частотой дискретизации  $f_s$  [15]. Аналогичная теорема в зарубежной литературе носит имя Найквиста [14].

Использование подхода дополнения нулями кратности  $D$  позволяет интерполировать точки  $\{Y_m\}$   $K$  точками sinc-функции, представляющей собой преобразование Фурье для прямоугольного окна, фактически обуживающего дополненную нулями последовательность  $\{y_n\}$  [12]. Новая информация в спектре при этом не появляется, однако качество человеческого восприятия такого спектра существенно повышается.

Введем обозначения для дискретных величин (16) подобноиспользованным для непрерывных величин в уравнениях (1)–(15):

$$\begin{aligned} y_n &= y(t), \quad n = t = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, N; \\ \underline{Y}_k &= \tilde{Y}_T(f), \quad \frac{k}{DN} = f = \\ &= 0, \pm \frac{1}{DN}, \pm \frac{2}{DN}, \dots, \pm \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{DN} \right), \pm \frac{1}{2}, \end{aligned} \quad (17)$$

где  $N$  – число измеренных точек,  $D$  – кратность дополнения нулями. Шаг дискретизации принят равным единице ( $T_s = 1$ ) и, следовательно, число отсчетов по времени в отрезке измеренных данных конечной длины  $T$  равно

$$N = T + 1, \quad (19)$$

и размерные  $\hat{f}$  и безразмерные  $f$  частоты идентичны. Другой шаг дискретизации, отличный от единицы, может быть обеспечен умножением всех переменных дискретного времени на  $T_s$  и всех переменных дискретной частоты на  $1/T_s$ .

Если ДПФ (16) с  $D$ -кратным дополнением нулями применено к последовательности блоков данных

$$\{y(t-v) : v = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1\},$$

индексированных по  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ , то оно дает последовательность преобразованных блоков

$$\tilde{y}_T(t, f) : f = 0, \pm \frac{1}{DN}, \pm \frac{2}{DN}, \dots, \pm \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{DN} \right), \pm \frac{1}{2},$$

индексированных по  $t = 0, 1, 2, 3, \dots$ , где

$$\tilde{y}_T(t, f) = \sum_{w=0}^T y(t-T+w) e^{-j2\pi f w}. \quad (20)$$

Индекс  $t$  представляет ближайший отсчет времени в блоке, или передний край блока. Для каждого значения  $f$ ,  $\tilde{y}_T(t, f)$  представляет собой узкополосный временной ряд с центральной частотой  $f$  и эффективной полосой частот  $\Delta f^0 \cong 1/N$  ( $\Delta f^0 \cong 1/T$  для  $N \gg 1$ ). Таким образом,  $\tilde{y}_T(t, f)$  представляет собой дискретный по времени и дискретный по частоте аналог непрерывной по времени и непрерывной по частоте локальной синусоидальной составляющей  $y_T(t, f)$  [12]. Низкочастотный временной ряд, который является комплексной огибающей  $\tilde{y}_T(t, f)$ , получается путем распределения по частотам

$$\tilde{Y}_T(t, f) = \tilde{y}_T(t, f) e^{-j2\pi f t}. \quad (21)$$

Таким образом, имеем равенство (используя  $v=-w$  в уравнении (20)):

$$\tilde{Y}_T(t, f) = \sum_{v=-T}^0 y(t-T-v) e^{-j2\pi f (t-v)}, \quad (22)$$

которое является дискретным по времени и дискретным по частоте аналогом динамического финитного комплексного спектра  $\underline{Y}_T(t, f)$  (2). Следовательно, аналоговые методы, представленные выше для функции  $\underline{Y}_T(t, f)$ , могут быть представлены в цифровой форме, используя функции  $\tilde{y}_T(t, f)$  и  $\tilde{Y}_T(t, f)$ , полученные из ДПФ.

Одним из наиболее вычислительно эффективных цифровых методов (особенно для длинных отрезков данных) является метод Бартлетта – Уэлча [14]. Этот метод использует

интервальное усреднение периодограмм по времени с обуживанием данных и, как правило, с 50% наложением:

$$\tilde{S}_{y_T}(t, f)_{\Delta t} = \frac{1}{2L/N - 1} \sum_{v=0}^{2(L/N-1)} \tilde{S}_{y_T}(t - \frac{vN}{2}, f), \quad (23)$$

где  $\tilde{S}_{y_T}(t, f)$  представляет собой динамическую периодограмму (с  $T = N - 1$ ):

$$\tilde{S}_{y_T}(t, f) = \frac{1}{N} |\tilde{Y}_T(t, f)|^2 = \frac{1}{N} |\tilde{y}_T(t, f)|^2, \quad (24)$$

где

$$\tilde{y}_T(t, f) = \sum_w^{N-1} a_T(-w) y(t-T+w) e^{-j2\pi f w}. \quad (25)$$

Последовательность  $a_T(w)$  – обуживающее окно.

На рис. 1 показаны перекрывающиеся на 50% треугольные окна. Число блоков, усредняемых в уравнении (23), равно

$$2C = \frac{2L}{N} - 1. \quad (26)$$

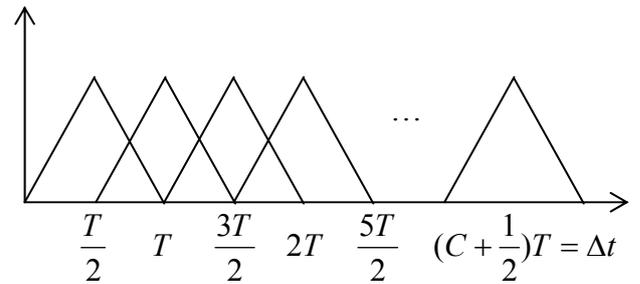


Рис. 1. Перекрывающиеся на 50% обуживающие окна Бартлетта

Полная длительность используемого отрезка данных равна  $\Delta t = L - 1$ , где  $L$  – число отсчетов по времени в отрезке данных.

Таким образом, длина отрезка времени анализируемых данных представляется выражением

$$\Delta t = (C + \frac{1}{2})N - 1, \quad (27)$$

и частотное разрешение составляет величину порядка  $1/T$ , другими словами – величину порядка промежутка между точками по частоте без дополнения нулями:

$$\Delta f = \frac{1}{N}. \quad (28)$$

Следовательно, надежность спектральной оценки, рассчитываемая как произведение разрешений по времени и по частоте, представляется выражением

$$R = \Delta t \Delta f = C + \frac{1}{2} - \frac{1}{N} \cong C. \quad (29)$$

Таким образом, уравнения (23)–(29) формализуют вычислительный метод статистического динамического спектрального анализа для обработки данных, характеризующих процесс электролитно-плазменной обработки.

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА

### Способы пассивной идентификации

Предложены способы идентификации шероховатости поверхности, полноты удаления покрытия и момента окончания процесса по анализу динамики спектральной плотности мощности колебаний тока в диапазоне частот 500...2500 Гц.

Известен способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия, включающий измерение переменной составляющей тока и анализ ее изменения во времени, отличающийся тем, что в электрическую цепь включают измерительное сопротивление, переменную составляющую тока измеряют осциллографом по изменению напряжения на измерительном сопротивлении, а момент окончания процесса устанавливают при изменении амплитуды переменной составляющей тока на 2% за время не менее 2 мин. [16].

Данный способ является наиболее простым среди разработанных, однако его точность и быстродействие невелики, и в некоторых случаях их недостаточно.

Известен способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия [17], включающий измерение переменной составляющей тока и анализ ее изменения во времени, отличающийся тем, что переменную составляющую тока подают на полосовой фильтр

с граничными частотами 500–700 и 1300–1500 Гц, измеряют действующее значение напряжения на выходе фильтра  $u$  и определяют значение порогового напряжения  $u_0$  путем усреднения значения  $u$  в течение 20–40 сот начала обработки, затем начинают отсчет отрезков времени  $t_k$  и  $t$ , при этом если через 50–70 с от начала обработки напряжение  $u$  достигает значения  $(0,5–0,6) u_0$ , то конец отсчета времени  $t_k$  устанавливают по достижении напряжением  $u$  значения  $(0,7–1,0) u_0$ , и момент окончания процесса определяют по достижении  $t$  значения  $(1,4–1,6)t_k$ , а расчет значения площади поверхности, освобожденной от покрытия  $S$ , ведут по формуле

$$S = k \cdot t_k, \quad (30)$$

где  $k$  – эмпирический коэффициент пропорциональности (рис. 2, а); в случае, если через 50–70 с от начала обработки напряжение  $u$  не достигает значения  $(0,5–0,6) u_0$ , процесс электролитно-плазменного удаления покрытия останавливают, так как покрытие удаляться не будет (рис. 2, б).

Данный способ является развитием предыдущего. Повышение точности измерений здесь основано на информации, полученной с применением статистического спектрального анализа сигнала тока.

В результате подтверждена гипотеза о наличии информативного диапазона частот, изменение сигнала в котором коррелировано с изменением состояния поверхности. Одним из информативных диапазонов является диапазон частот 500...1500 Гц, который и использован в приведенном способе.

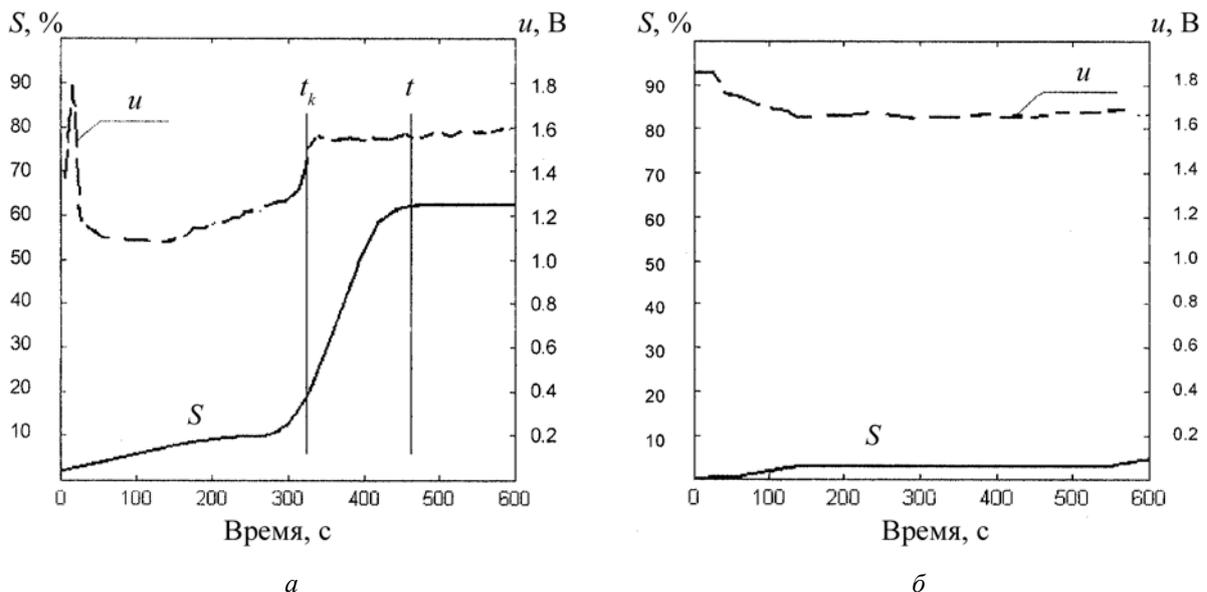


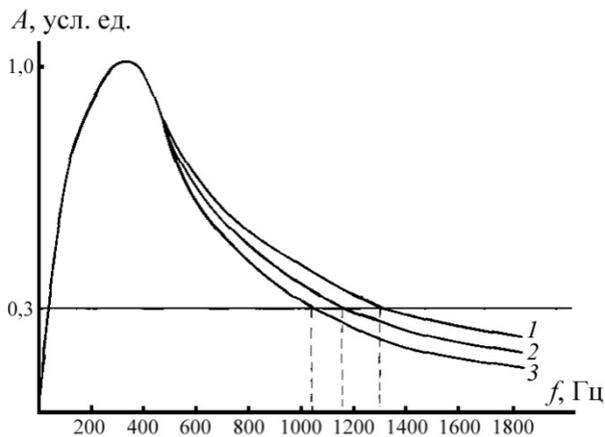
Рис. 2. Динамика площади поверхности, освобожденной от покрытия  $S$ , и действующего значения напряжения сигнала на выходе фильтра  $u$  при обработке в условиях: а – близких к оптимальным для удаления покрытия:  $U=320$  В,  $T_0=60$  °С, и б – при обработке в неоптимальных условиях:  $U=250$  В,  $T_0=90$  °С [17]

Разработаны способы пассивной идентификации состояния поверхностного слоя, в частности, измерения шероховатости.

Известен способ измерения шероховатости поверхности электропроводящих деталей в процессе электролитно-плазменной обработки, заключающийся в том, что прикладывают высокое напряжение между обрабатываемой деталью, являющейся анодом, и катодом, отличающийся тем, что измеряют ширину нормированного частотного спектра переменной составляющей тока (рис. 3) по уровню среза, выбираемого из диапазона 0,2 ... 0,5 в зависимости от рабочего напряжения, и определяют шероховатость по формуле

$$Ra = k \cdot f + R_0, \quad (31)$$

где  $Ra$  – шероховатость поверхности, мкм;  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от материала детали, природы и концентрации электролита;  $f$  – измеренная ширина спектра при определенном уровне среза, Гц;  $R_0$  – эмпирический параметр, при этом значения  $k$  и  $R_0$  вычисляют по тарировочной кривой зависимости шероховатости от ширины спектра [18].



**Рис. 3.** Форма нормированного статистического спектра переменной составляющей тока при электролитно-плазменном полировании [18]

Особенностью данного способа является применение статистического спектрального анализа для выявления связи между шероховатостью поверхности и эффективной шириной спектра. Показано, что сужение спектра коррелировано со снижением шероховатости поверхности, что может быть связано с измерением распределения пузырьков в парогазовой оболочке в сторону больших размеров (ниже собственной частота) в связи с выравниванием поверхности.

Известен способ измерения шероховатости поверхности электропроводящих изделий в процессе электролитно-плазменной обработки,

заключающийся в том, что прикладывают высокое напряжение между обрабатываемой деталью, являющейся анодом, и катодом, отличающийся тем, что переменную составляющую тока подают на полосовой фильтр с граничными частотами 500–700 и 1300–1500 Гц, измеряют действующее значение напряжения на выходе фильтра  $u$ , рассчитывают начальное значение напряжения  $u_0$  путем усреднения значения  $u$  в течение 20–40 сот начала процесса, шероховатость в ходе обработки определяют по формуле

$$Ra = \frac{u}{u_0} R_0, \quad (32)$$

где  $u$  – текущее значение напряжения на выходе полосового фильтра;  $u_0$  – начальное значение напряжения на выходе полосового фильтра;  $R_0$  – начальное значение шероховатости обрабатываемой поверхности [19].

Данный способ основан на предыдущем, однако для упрощения реализации применен подход выделения информативной полосы частот, в котором происходит снижение спектральной плотности мощности в связи с сужением спектра (рис. 4).

Разработанные методы позволяют формировать контуры обратной связи по параметрам состояния поверхности в составе АСУ ТП ЭПО и создавать системы управления длительностью обработки при оптимальных условиях [20].

### Точность пассивной идентификации

Оценим точность метода пассивной идентификации по результатам определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия из нитрида титана и площади поверхности, освобожденной от покрытия [5, 17].

Калибровочная кривая подтверждает линейную зависимость (30) и показывает, что точность идентификации в рассматриваемом случае составляет 3,9 %. Аналогичные закономерности получены и для других покрытий, например, хромового и алюминидного.

### СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ТП ЭПО

Представленные выше способы идентификации состояния поверхности в ходе ТП ЭПО позволяют разрабатывать алгоритмы и способы управления данными процессами.

Наиболее простым является подход к управлению длительностью обработки при оптимальных условиях. Пример блок-схемы алгоритма, реализующего такой подход, приведен на рис. 6. Алгоритм содержит действия 2...4 по установке оптимального режима и проверке соответствия

информативного сигнала данному режиму. При несоответствии выдается сигнал оператору 5 с рекомендацией закончить обработку без возможности достижения результата в установленных условиях. При соответствии начинается отсчет 6...8 отрезка времени, характеризующего специфический участок кривой информативного сигнала (см. рис. 5). При выполнении условия 8, соответствующего концу такого участка, выполняется прогнозное действие 9 и определяется момент окончания процесса, о чем информируется оператор установки.

Таким образом, использование алгоритма управления длительностью процесса ЭПО позволяет создавать подсистемы поддержки принятия решения оператором автоматизированной установки для ЭПО, обеспечивающие повышение производительности за счет исключения времени в конце обработки, не приводящего к целевому модифицированию поверхностного слоя.

Более сложный подход заключается в изменении напряжения источника и температуры электролита в ходе процесса на основе оптимизации функционала, характеризующего качество обработки. В качестве одного из примеров такого подхода можно привести способ программного изменения указанных технологических параметров, с учетом сигнала обратной связи, формируемого на основе статистического спектрального анализа сигнала тока в цепи электролизера [22].

Способ управления процессом удаления дефектного покрытия электролитно-плазменным методом включает измерение переменной составляющей плотности тока и анализ ее изменения во времени, причем измеряют среднее значение плотности тока и обработку поверхности ведут с использованием нечеткого интеллектуального регулятора сначала при напряжении 150–200 В и температуре электролита 50–70 °С в течение 3 мин., затем при напряжении 350–400 В и температуре электролита 70–90 °С в течение 4 мин. и далее при напряжении 180–200 В и температуре электролита 85–95 °С в течение 5 мин., при этом сигнал экспертной системы задания траектории управления и сигнал обратной связи формируют в виде векторов, составленных из среднего значения плотности тока, амплитуды и частоты характеристических колебаний плотности тока, и подают их на элемент сравнения, с выхода которого сигнал рассогласования подают на интеллектуальный регулятор, выполненный на основе нечеткой логики, сигнал управления с которого подают на источник технологического напряжения.

Таким образом, использование управления напряжением источника и температурой электролита, в сочетании с новым контуром обратной связи и использованием средств искусственного интеллекта, позволяет повысить точность и производительность процесса электролитно-плазменной обработки.

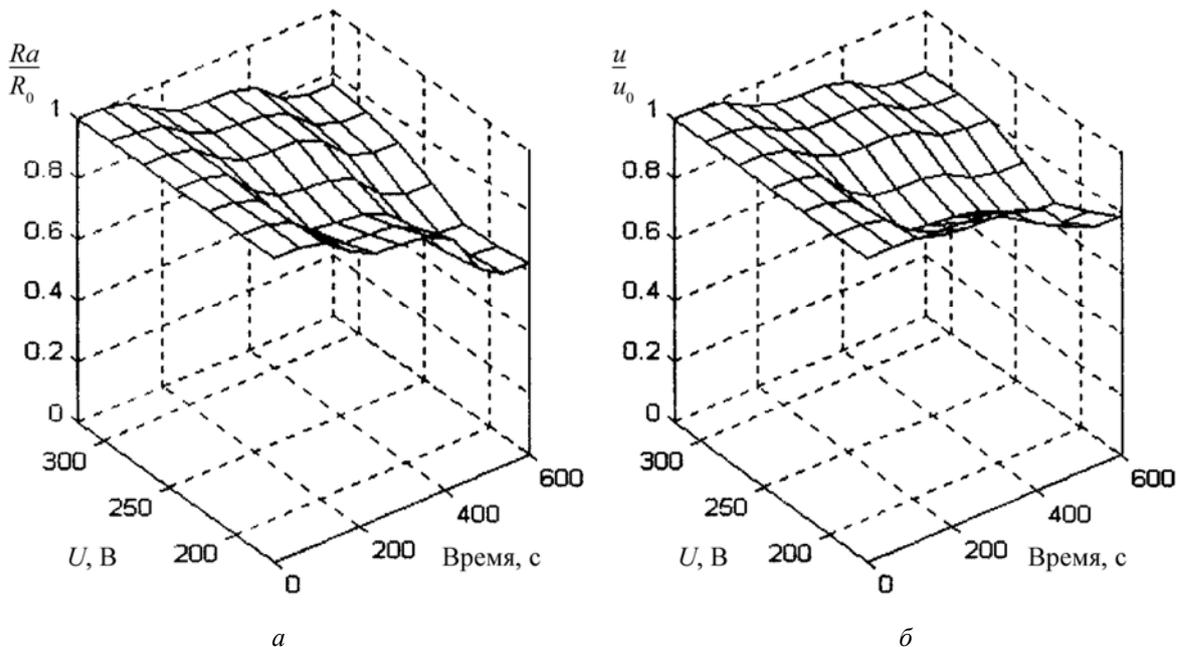


Рис. 4. Идентификация процесса электролитно-плазменного полирования:

а – динамика относительного изменения шероховатости и б – напряжения на выходе полосового фильтра [19]

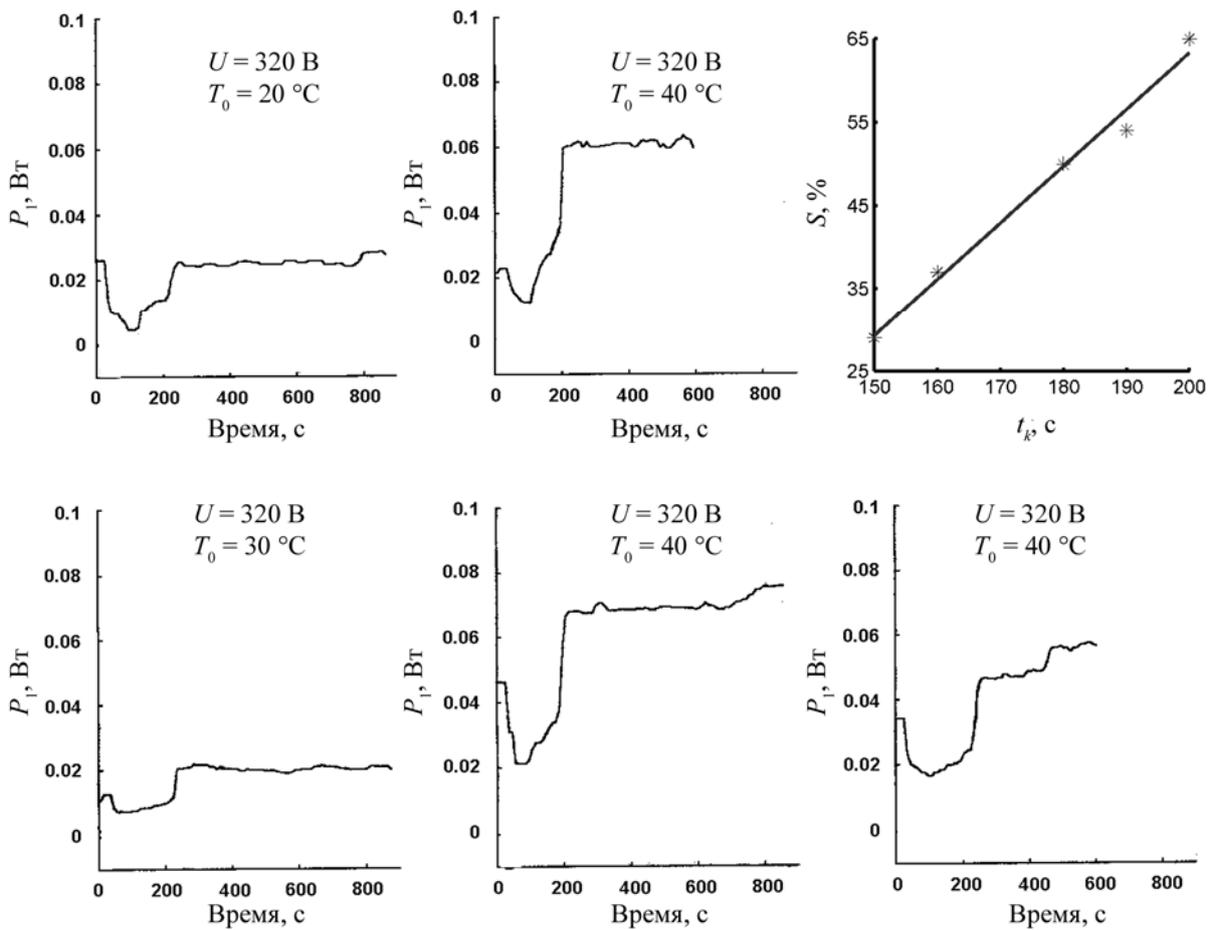


Рис. 5. Зависимость спектральной плотности мощности колебаний переменной составляющей тока в диапазоне частот 500...1500 Гц ( $P_1$ ) от времени при различных условиях электролитно-плазменного удаления покрытия TiN, а также калибровочная кривая  $S=f(t_k)$

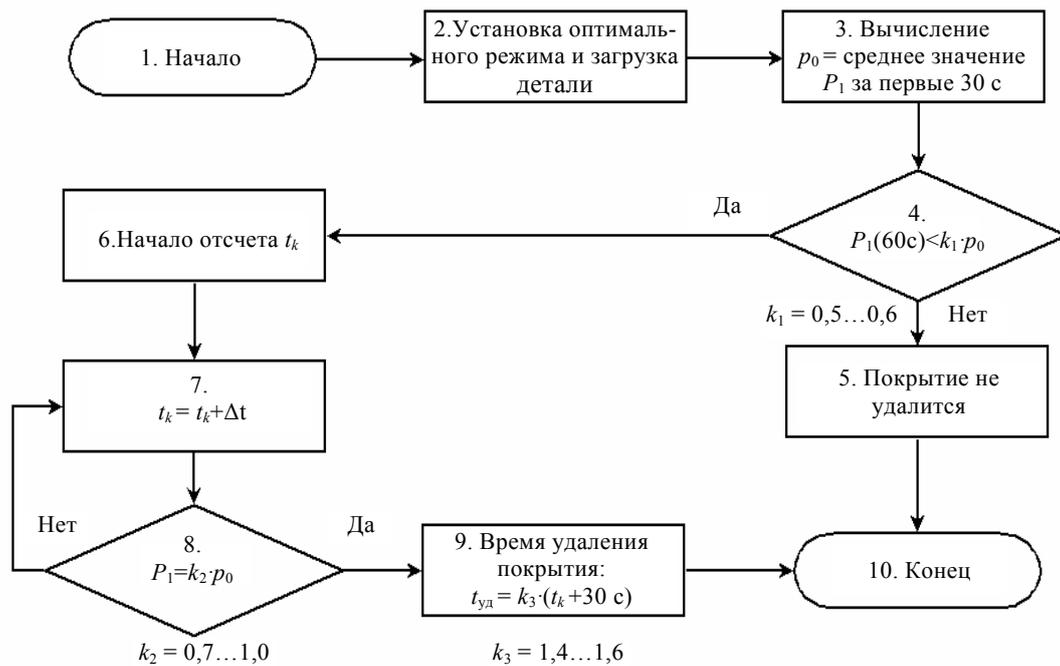


Рис. 6. Алгоритм управления длительностью процесса электролитно-плазменного удаления покрытия из нитрида титана [21]

## ВЫВОДЫ

Разработаны методы решения проблем создания автоматизированных систем управления технологическими процессами электролитно-плазменной обработки, содержащих новые контуры обратной связи по параметрам состояния поверхности. Предложены методы активной и пассивной идентификации, основанные на спектральном анализе тока и напряжения на электролизере и позволяющие оценивать состояние поверхности в ходе обработки с погрешностью не более 10%. Предложены методы управления длительностью обработки в оптимальных режимах и управления напряжением источника и температурой электролита, позволяющие сократить длительность обработки на 10–20%, снизить энергопотребление и улучшить качество электролитно-плазменной обработки ответственных деталей современного двигателестроения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б.** Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование. М.: Экомет, 2005. 368 с.
2. **Белкин П. Н.** Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Мир, 2005. 336 с.
3. Процесс электролитно-плазменной обработки деталей ГТД с предварительным формированием парогазовой оболочки / М. К. Смыслова [и др.] // Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий: сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2008.
4. Выбор способа удаления покрытия TiN с поверхности мартенситной стали для разработки технологических рекомендаций ремонта лопаток энергоустановок / Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, Е. В. Парфенов, Н. Ф. Измайлова // Вестник УГАТУ. 2009. т. 12. №2 (31). С. 103–107.
5. **Parfenov, E. V.** Statistical Signal Processing for Plasma Electrolysis Process Control / E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov // Proc. of IV Intl Conf. "System Identification and Control Problems". Moscow, 2005. P. 998-1004.
6. **Parfenov, E.V.** Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process / E.V. Parfenov, A. L. Yerokhin, A. Matthews // Surface and Coatings Technology, 2007. V. 201. P. 8661-8670.
7. Nevyantseva, R. R. The influence of vapor-gaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal / R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbakov, E. V. Parfenov, A. A. Bybin // Surface and Coatings Technology. 2001. V. 148. P. 30-37.
8. Влияние физико-химического состояния поверхности образцов различной формы на колебания тока при электролитно-плазменной обработке / Р. Р. Невьянцева, Н. Ф. Измайлова, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 2. С. 33–39.
9. **Амирханова Н. А., Белоногов В. А., Белоногова Г. У.** Исследование закономерностей электролитно-плазменного полирования жаропрочного сплава ЭП-718 // Металлообработка. 2003. № 6. С. 16–20.
10. Yerokhin, A.L. Plasma electrolysis for surface engineering. Review / A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S. J. Dowey // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 122. P. 73-79.
11. **Дженкинс Г., Ватс Д.** Спектральный анализ и его приложения / пер. с англ. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1971. 316 с.
12. Gardner, W.A. Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory. New York: Prentice Hall, 1988. 591 p.
13. **Вентцель Е. С.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 383 с.
14. Oppenheim, A.V. Discrete-Time Signal Processing / A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer, J.R. Buck. New York: Prentice Hall, 1999. 855 p.
15. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.
16. **Амирханова Н. А.** Патент РФ № 2119975 МПК6 С 25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Т. М. Тимергазина, Е. В. Парфенов. Оpubл. 10.10.1998.
17. **Невьянцева Р. Р.** Патент РФ № 2227181 МПК7 С 25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатов, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Оpubл. 20.04.2004.
18. **Амирханова Н. А.** Патент РФ № 2133943 МПК7 G 01 В 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Н. Ф. Измайлова, Т. М. Тимергазина, Е. В. Парфенов. Оpubл. 27.07.1999.
19. **Невьянцева Р. Р.** Патент РФ № 2240500 МПК7 G 01 В 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатов, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Оpubл. 20.11.2004.
20. Parfenov E.V. Process Control for Plasma Electrolytic Removal of TiN Coatings. Part 1: Duration Control / E.V. Parfenov, R.R. Nevyantseva, S.A. Gorbakov // Surface and Coatings Technology. 2005. V.199. P. 189–197.
21. **Горбатов С. А., Парфенов Е. В., Невьянцева Р. Р.** Управление технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия // Вестник УГАТУ. 2003. Т. 4. № 1. С. 145–152.
22. Патент РФ № 2202451 МПК7 В 23 Н 7/20. Способ управления процессом удаления дефектного покрытия электролитно-плазменным методом / А. И. Михайловский, Р. Р. Невьянцева, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Оpubл. 21.12.2000.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает искреннюю благодарность Министерству образования и науки Российской Федерации, а также Правительству Республики Башкортостан за финансовую поддержку исследований.

## ОБ АВТОРАХ

**Парфенов Евгений Владимирович**, докторант, доц. каф. теор. основ электротехн. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по автоматиз. и упр. технол. процессами и производствами (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. упр. технол. процессами, цифровой обработки сигналов.