

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО ПОЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ПО ИМПЕДАНСНЫМ СПЕКТРАМ

В. Р. МУКАЕВА<sup>1</sup>, Е. В. ПАРФЕНОВ<sup>2</sup>, М. В. ГОРБАТКОВ<sup>3</sup>, Р. Р. НЕВЬЯНЦЕВА<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>veta\_mr@mail.ru, <sup>2</sup>pev\_us@yahoo.com, <sup>3</sup>mikesg@mail.ru, <sup>4</sup>rrnev@mail.ru

<sup>1-4</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 2 сентября 2015 г.*

**Аннотация.** Приводятся результаты экспериментального исследования, и предлагается модель процесса электролитно-плазменного полирования (ЭПП) как объекта управления в виде структуры из типовых динамических звеньев с переменными параметрами. Рассматривается новый метод оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам и регулирования управляющего напряжения по оптимальной траектории, рассчитанной методом линейного программирования. Описывается структурная схема автоматизированной системы оптимального управления и элементы аппаратно-программного комплекса АСУ ТП, реализующие предложенный метод управления процессом ЭПП.

**Ключевые слова:** электролитно-плазменное полирование; шероховатость; нержавеющая сталь; импедансная спектроскопия; динамическая модель; математическое моделирование; контроль характеристик поверхности; оптимальное управление.

Технологический процесс электролитно-плазменного полирования (ЭПП) отвечает современным экологическим требованиям и позволяет обрабатывать поверхности деталей из нержавеющей и низкоуглеродистых сталей, титановых и никелевых сплавов с высокой производительностью. В области изучения процессов ЭПП достигнуты значительные результаты по технологическим аспектам получения поверхности высокого качества: подобраны экологически допустимые и эффективные электролиты и установлены их концентрации, выявлены диапазоны рабочих напряжений на электродах и температуры электролитов [1]. Несмотря на многие преимущества процесса ЭПП по сравнению с традиционно применяемыми в промышленности методами полирования, для широкого внедрения в производство необходимо повышать эффективность установок ЭПП, например, за счет снижения доли брака, улучшать экономические показатели, например, за счет уменьшения энергоемкости процесса.

Подобные результаты могут быть достигнуты при создании систем оптимального управления технологическим процессом ЭПП.

В работе рассматривается метод оптимального управления технологическим процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам.

Импедансная спектроскопия – это метод активной идентификации, который служит для выявления зависимости комплексного сопротивления от частоты [2]. Приведены результаты применения данного метода для исследования процесса ЭПП. Существенное отличие импедансных спектров для процесса ЭПП и гальванических процессов определяется наличием активной парогозовой оболочки (ПГО), в которой развивается тлеющий разряд с электролитным катодом. Методика и опыт применения импедансной спектроскопии для актуальных разновидностей электролитно-плазменных процессов без ПГО описаны в монографии [3]. Применение импедансной спектроскопии позволяет получить электрическую схему замещения электролизера и исследовать явления в системе, что

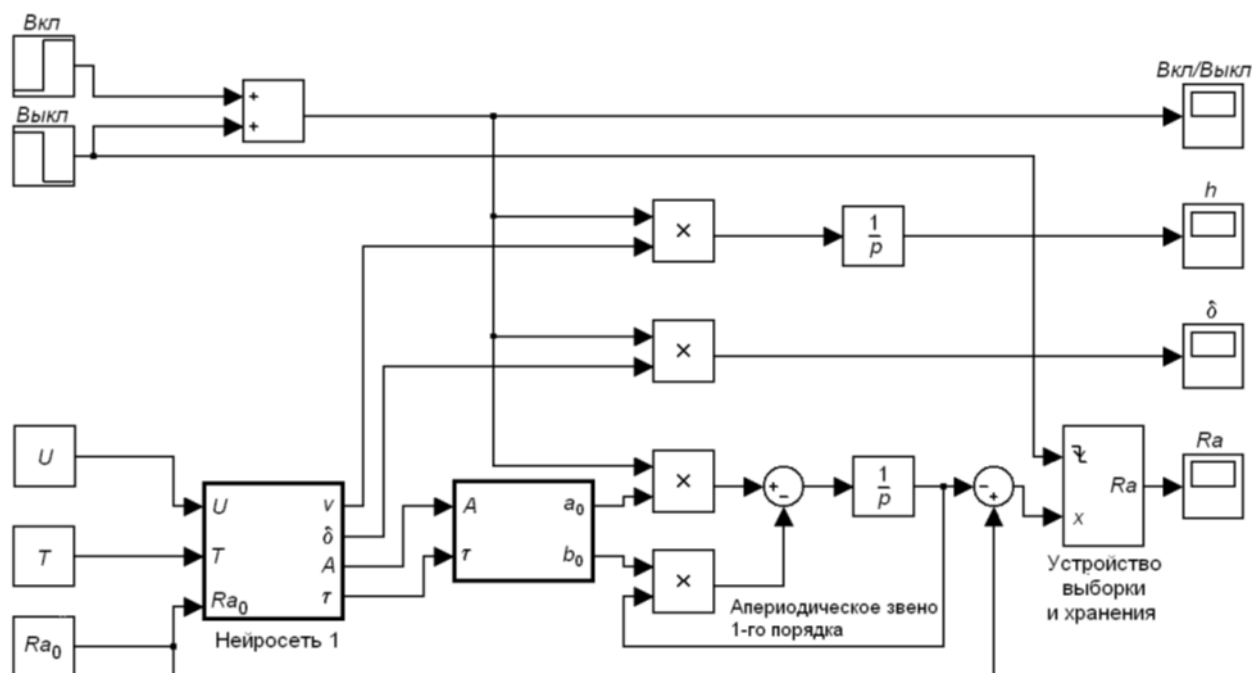


Рис. 1. Функциональная схема модели процесса ЭПП как объекта управления

было реализовано, например, для процессов плазменно-электролитического оксидирования и твердого анодирования [3, 4].

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ЭПП КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

Были проведены экспериментальные исследования процесса электролитно-плазменного полирования образцов из стали 20X13, с четырьмя факторами: напряжение на электролизере  $U$ , температура электролита  $T$ , начальная шероховатость поверхности  $Ra_0$  и длительность обработки  $t$ . В ходе обработки регистрировались мгновенные значения тока и напряжения, рассчитывалась средняя по площади анода плотность тока  $\delta$ . После ЭПП измерялась шероховатость поверхности образцов  $Ra$  и рассчитывалась толщина съема поверхностного слоя  $h$  гравиметрическим методом. Более подробное описание методики и экспериментальной установки приведено в работе [5].

В результате анализа вида переходных характеристик переменных  $Ra$  и  $h$  установлено, что изменение свойств поверхностного слоя можно описать следующими уравнениями:

$$Ra = A \cdot \exp(-t / \tau) + C, \quad (1)$$

$$h = v \cdot t, \quad (2)$$

где  $A$  – предельное снижение шероховатости;  $\tau$  – постоянная времени;  $C$  – предельно достижимая шероховатость;  $t$  – длительность обработки;  $v$  – скорость съема поверхностного слоя.

Установлено, что плотность тока  $\delta$  незначимо изменяется в ходе обработки, а время ее установления на 2–3 порядка меньше постоянной времени  $\tau$ , поэтому в рассматриваемом масштабе времени с шагом моделирования в 1 мин, инерционностью переменной  $\delta$  можно пренебречь.

С использованием графической среды программирования Simulink построена функциональная модель процесса ЭПП, как объекта управления (рис. 1), описывающая переходные характеристики выходных переменных объекта управления, как реакцию на ступенчатое воздействие включения установки ЭПП на напряжение  $U$ , температуру электролита  $T$ , с начальными условиями  $Ra_0$ .

В соответствии с полученными переходными характеристиками, динамика переменной  $Ra$  соответствует аperiodическому звену первого порядка,  $h$  – интегрирующему звену,  $\delta$  – безинерционному звену. Выявлены закономерности изменения параметров  $A$ ,  $C$ ,  $\tau$ ,  $v$ ,  $\delta$  передаточных функций динамических звеньев, в зависимости от  $U$ ,  $T$ ,  $Ra_0$ , графики которых приведены в статье [5]. Вычисление параметров  $A$ ,  $C$ ,  $\tau$ ,  $v$ ,  $\delta$  в представленной на рис. 1 функциональной схеме выполняет нейросетевая модель НС1.

Импедансная спектроскопия проводилась по методике [3] в режиме малого сигнала. На электроды подавалась сумма напряжений технологического источника постоянного напряжения 225...325 В и источника однополярных прямоугольных импульсов с амплитудой 50 В, с дискретной частотой следования  $f_m$  в диапазоне

от 20 до 2000 Гц. В результате цифровой обработки сигналов напряжения  $u[\eta]$  и тока  $i[\eta]$ , где  $\eta$  – номер отсчета дискретного сигнала с общим числом отсчетов  $N$ , для каждого отсчета  $t_n$  дискретного времени  $n$  по формулам (3) и (4) были рассчитаны оценки спектров тока и напряжения с помощью быстрого преобразования Фурье с учетом анализа степени линейности системы [6], из которых были выделены эквивалентные синусоиды на частотах  $f_m$ .

$$\underline{I}(t_n, f_m) = \sum_{\eta=1}^N i[\eta] e^{(-2\pi j \cdot (m-1) \cdot (\eta-1)) / N}, \quad (3)$$

$$\underline{U}(t_n, f_m) = \sum_{\eta=1}^N u[\eta] e^{(-2\pi j \cdot (m-1) \cdot (\eta-1)) / N}, \quad (4)$$

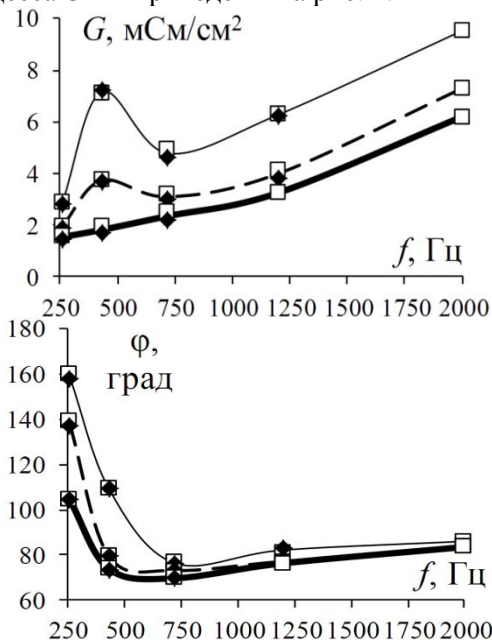
$$\underline{G}(t_n, f_m) = \frac{\underline{I}(t_n, f_m)}{\underline{U}(t_n, f_m)}, \quad m = 1, 2 \dots M. \quad (5)$$

Для проверки эквивалентные синусоиды также выделялись с помощью полосовых фильтров.

В качестве оценок импедансных спектров были приняты: удельная проводимость  $G(t_n, f_m)$  и разность фаз  $\varphi(t_n, f_m)$  между эквивалентными синусоидами тока и напряжения, фактически представляющие собой составляющие оценки комплексной частотной характеристики:

$$\underline{G}(t_n, f_m) = G(t_n, f_m) \cdot \exp(j\varphi(t_n, f_m)). \quad (6)$$

Примеры оценок импедансных спектров процесса ЭПП приведены на рис. 2.



**Рис. 2.** Оценки импедансных спектров процесса ЭПП при температуре 70 °С (---), 80 °С (—), 90 °С (—) и напряжении 300 В, рассчитанные с применением полосовых фильтров (□) и преобразования Фурье (◆)

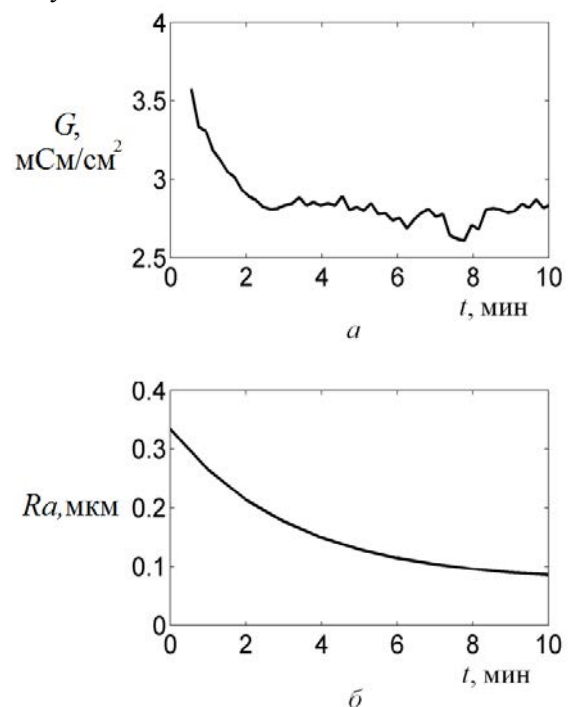
## МЕТОД КОНТРОЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА ПО ИМПЕДАНСНЫМ СПЕКТРАМ

Контроль изменения  $Ra$  и  $h$  по импедансным спектрам предлагается осуществлять с использованием нейронной сети.

К электролизеру прикладывают тестовые диагностирующие сигналы напряжения переменной частоты. Измеряют мгновенные значения тока  $i$  и напряжения  $u$  и рассчитывают оценки модуля и аргумента импедансных спектров в диапазоне частот  $f = 250 \dots 2000$  Гц: удельную проводимость  $G(t_n, f_m)$  и разность фаз  $\varphi(t_n, f_m)$ . Полученные значения оценок импедансных спектров электрического сигнала и плотность тока  $\delta$  подают на вход предварительно обученной обобщенно-регрессионной радиально базисной нейронной сети НС2, которая вычисляет значения шероховатости  $Ra$  и  $h$ .

На рис. 3 показан пример изменения во времени проводимости  $G$  на частоте 258 Гц при температуре 70 °С и напряжении 300 В и показана динамика изменения шероховатости поверхности  $Ra$  при тех же условиях.

Наблюдается закономерное уменьшение значений указанных параметров во времени, но зависимость на различных частотах проявляется по-разному, поэтому диагностика  $Ra$  осуществляется с помощью нейросетевой модели во всем указанном диапазоне частот.



**Рис. 3.** Динамика изменения проводимости на частоте 258 Гц (а); динамика изменения шероховатости  $Ra$  (б)

### МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭПП

Предложенный метод метода оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам включает в себя:

- алгоритм расчета траектории оптимального управления напряжением  $U$  по эталонным моделям объекта управления для достижения целевой шероховатости при заданных начальных условиях и ограничениях;
- способы измерения шероховатости поверхности и толщины съема поверхностного слоя в ходе процесса ЭПП;
- алгоритм управления процессом ЭПП по достижению требуемой шероховатости поверхности.

Разработан алгоритм расчета траектории изменения напряжения  $U$  для достижения целевой шероховатости поверхности  $Ra_{ц}$ , не превышая допустимую толщину съема поверхностного слоя  $h_{д}$ , при минимальном энергопотреблении. При расчете используются эталонные модели объекта управления в виде динамических звеньев, описанные выше, и методы линейного математического программирования.

Учитывая инерционность изменения температуры ванны, входная переменная  $T$  фиксируется на постоянном уровне.

Траектория оптимального управления напряжением  $U_k[n]$  выбирается из  $K$  траекторий, так, чтобы обеспечить минимальное энергопотребление  $Q_k$ :

$$U_k[n]: \{(Q_k \rightarrow \min) \cap (Ra_k < Ra_{ц}) \cap (h_k < h_{д})\}, \quad (7)$$

где  $k$  – номер траектории управляющего напряжения.

Для каждого  $k = 1, 2, \dots, K$  рассчитывается траектория  $U_k[n]$ , соответствующая минимуму целевой функции линейного математического программирования  $F_k[n]$  на каждом шаге дискретного времени  $n$ :

$$U_k[n]: \{F_k[n] \rightarrow \min\}. \quad (8)$$

Целевая функции линейного программирования  $F$  имеет вид:

$$F_k[n] = C_1 Ra[n] + C_{2k} h[n], \quad (9)$$

где текущие значения  $Ra_k[n]$  и  $h_k[n]$  определяются с помощью модели объекта управления:

$$\begin{aligned} (Ra_k[n], h_k[n]) = \\ = f_1(Ra_k[n-1], h_k[n-1], U[n], Ra_0, T), \end{aligned} \quad (10)$$

где коэффициент оптимизации  $C_1=1$ , а значение коэффициента оптимизации  $C_{2k}$  ищется

в заданной области значений. Значения входных переменных и начальных условий лежат в диапазонах:  $U = 250 \dots 350$  В,  $T = 70 \dots 90$  °С,  $Ra_0 = 0,32 \dots 0,63$  мкм.

Разработаны два способа косвенного измерения шероховатости поверхности в ходе ЭПП.

Первый способ, основанный на анализе импедансных спектров входе процесса ЭПП, заключается в применении обобщенно-регрессионной радиально базисной нейронной сети, структура которой приведена на рис. 4. Выбор числа нейронов осуществлялся на основе анализа коэффициента детерминации  $R^2$ . Было определено оптимальное по точности и сложности число нейронов в скрытом слое: 370.

Адекватность диагностической нейросетевой модели оценивалась по величине  $R^2$  для данных, не участвовавших в обучении нейросети. Высокие значения  $R^2 = 0,96 \dots 0,98$  свидетельствуют об адекватности диагностической модели.

Расчет импедансных спектров по мгновенным значениям тока и напряжения проводится по формулам (3–6). Плотность тока рассчитывается, как отношение среднего значения анодного тока к площади обрабатываемой поверхности образца. Масштабированные значения оценок импедансных спектров, выраженных через модуль  $G$  и аргумент  $\varphi$ , подаются на вход нейросети. Выходными значениями нейросети являются  $Ra$  и  $h$ .

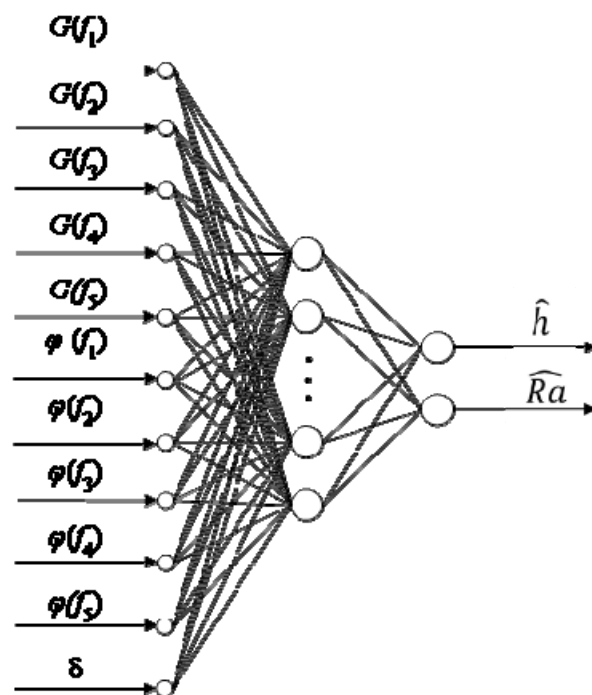


Рис. 4. Структура диагностической нейросетевой модели НС2 для контроля  $Ra$  и  $h$  по импедансным спектрам

Рассмотрим второй способ, основанный на эталонных моделях, в котором измеряют значения плотности тока  $\delta$  и напряжение на электролизере  $U$ . Шероховатость поверхности в ходе обработки определяют по формуле:

$$Ra = C + (Ra_0 - C) \cdot \exp(-t/\tau_0) + b_1 \delta + b_2 U), \quad (11)$$

где  $\tau_0$  – среднее значение постоянной времени;  $b_1, b_2$  – коэффициенты пропорциональности, зависящие от материала детали, свойств электролита. Величины  $\tau_0, b_1$  и  $b_2$  вычисляются по семейству тарировочных кривых зависимости постоянной времени снижения шероховатости от напряжения  $U$  и плотности тока  $\delta$  согласно патенту [7].

По достижению требуемой шероховатости поверхности оператор получает соответствующий сигнал на дисплее, что является рекомендацией к останову технологического процесса. По выбору оператора останов также может проводиться автоматически. Управление технологическим процессом ЭПП согласно разработанному методу осуществляется по алгоритму, представленному на рис. 5.

#### АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЭПП

Аппаратные и программные средства для проведения импедансной спектроскопии и управления процессом ЭПП выполняют задачи расчета траектории оптимального управления напряжением; активного воздействия на процесс сканирующими импульсами; сбора, обработки данных и расчета импедансных спектров; обеспечения возможности оператора управлять технологическим процессом.

На рис. 6 приведена структурная схема автоматизированной системы оптимального управления процессом ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам. Оптимальное управление напряжением осуществляется по траектории, рассчитанной исходя из начальных условий и целевых свойств поверхности.

Разработано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора на базе промышленного компьютера и программируемых источников питания TDK-Lambda и опытного образца импульсного блока спектральной диагностики.

Аппаратно-программное обеспечение представляет следующие блоки структурной схемы:

- Блок расчета траектории напряжения, выполняющий свою функцию до начала

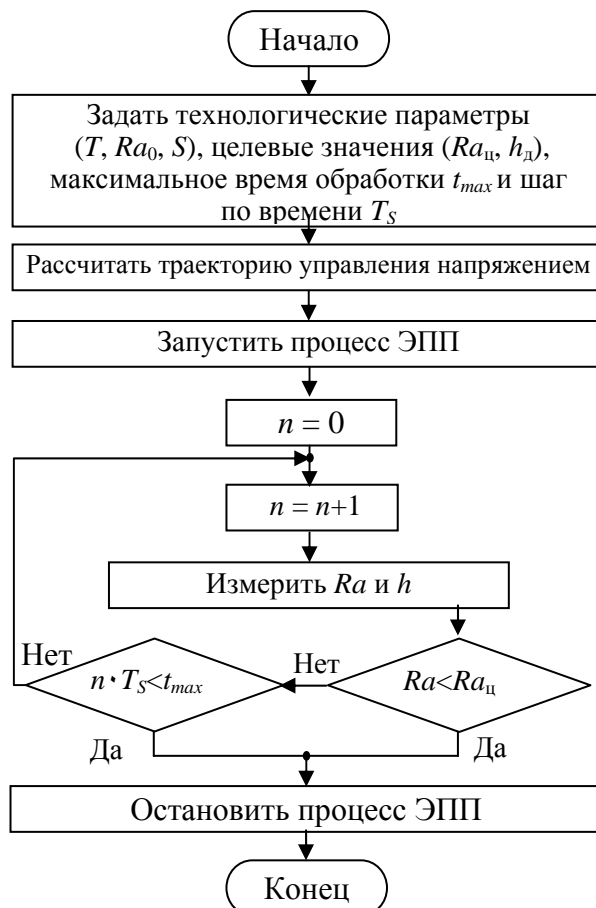


Рис. 5. Алгоритм управления технологическим процессом ЭПП

технологического процесса, на этапе планирования хода обработки.

- Импульсный блок спектральной диагностики ИБСД-20, который обеспечивает воздействие на технологический процесс ЭПП сканирующими импульсами переменной частоты [8].
- Блок расчета импедансного спектра и блок расчета  $Ra$  и  $h$ , которые входят в состав контура обратной связи для контроля шероховатости и информирования оператора о ходе процесса электролитно-плазменного полирования.

Измерение мгновенных значений тока, напряжения и температуры производится блоком датчиков. Сбор данных и их аналого-цифровое преобразование осуществляется с помощью платы NI PCI-6230. Обработку данных и расчет импедансных спектров выполняет прототип программного комплекса, реализованный в среде программирования LabVIEW.

На рис. 7 показан пример, показывающий эффективность оптимального управления напряжением по сравнению с поддержанием напряжения на постоянном субоптимальном уровне  $U=300$  В.

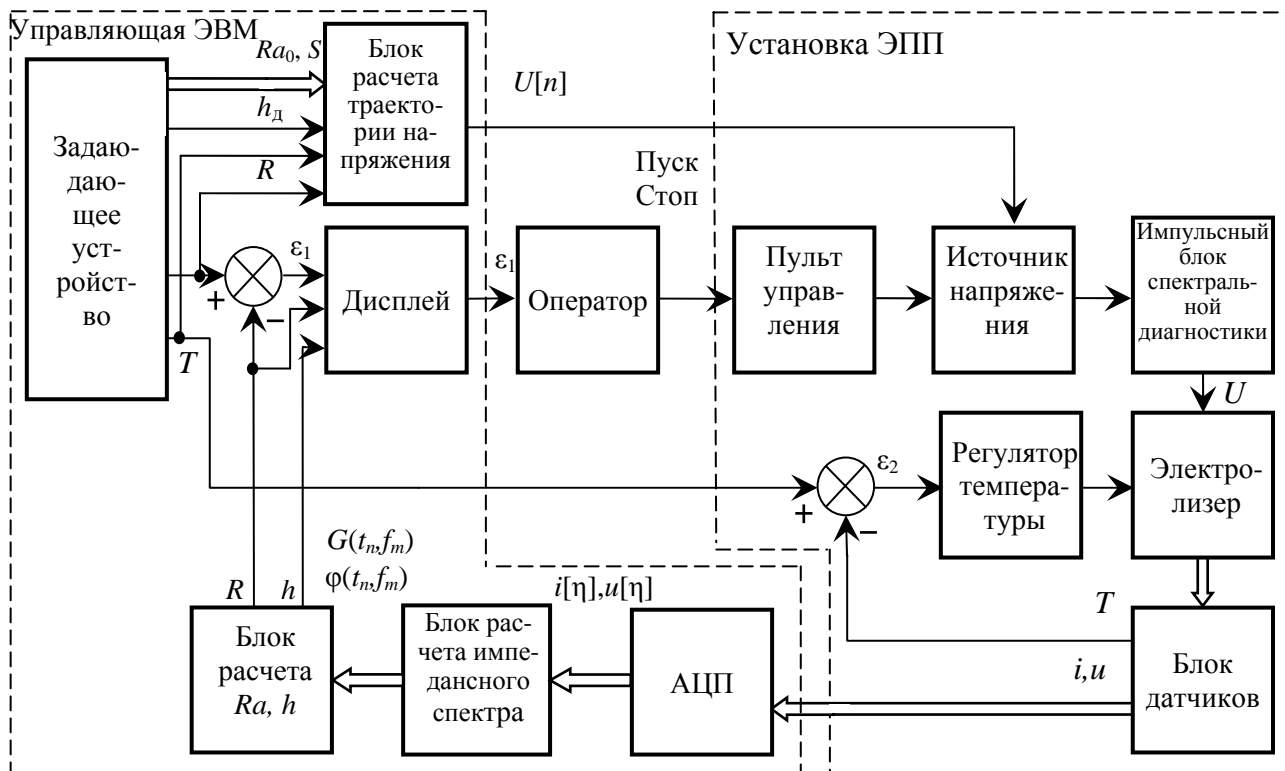


Рис. 6. Структурная схема автоматизированной системы оптимального управления ТП ЭПП на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам

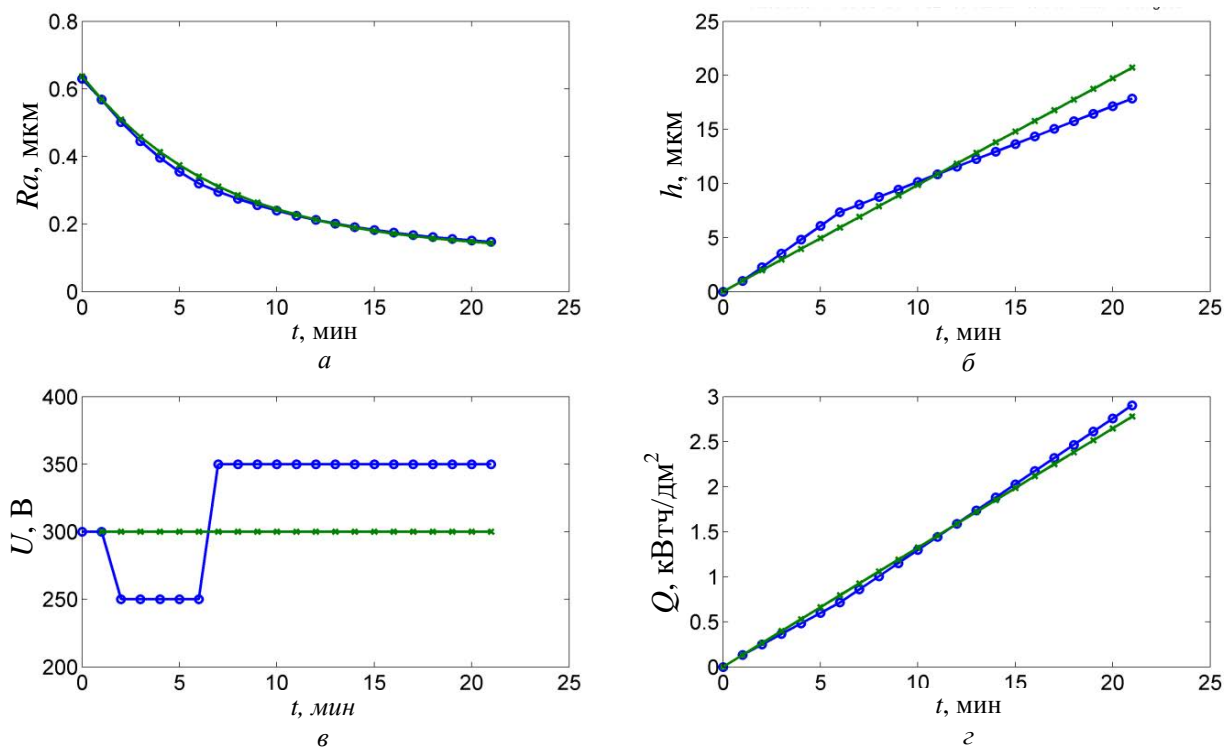
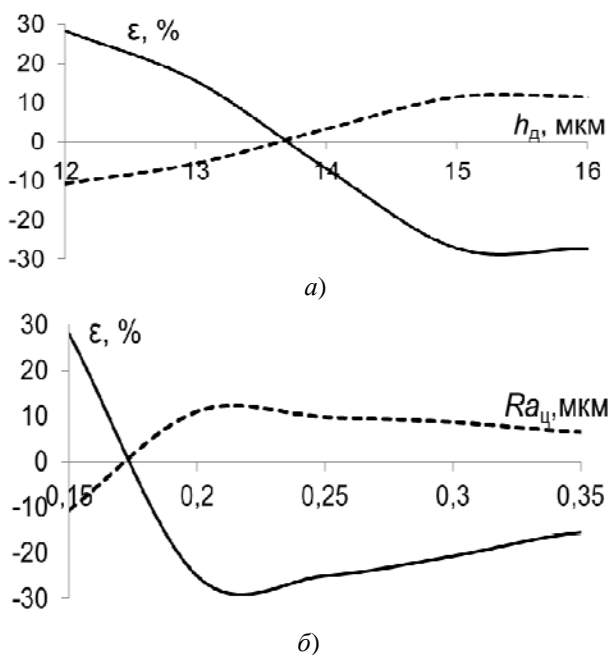


Рис. 7. Сравнение траекторий управляющего напряжения  $U$  (z) и соответствующие изменения величин  $Ra$  (a);  $h$  (б);  $Q$  (z):  
 (x) – напряжение поддерживается постоянным на субоптимальном уровне,  
 (o) – траектория оптимального управления напряжением



**Рис. 8.** Выигрыш по энергоёмкости (---) и по толщине съема поверхностного слоя (—) в зависимости от целевых свойств поверхности для  $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $Ra_0 = 0,5\text{ мкм}$  и  $Ra_{ц} = 0,15\text{ мкм}$  (а),  $h_d = 12\text{ мкм}$  (б)

Расчет проводился для детали с  $Ra_0 = 0,63\text{ мкм}$  и  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  с целью достижения  $Ra_{ц} = 0,15\text{ мкм}$  и обеспечения  $h_d < 18\text{ мкм}$ . Благодаря рассчитанной траектории оптимального управления достигнуты целевые значения с выигрышем по  $h$  в 14 %, в то время как при постоянных значениях  $U = 300\text{ В}$  и  $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$  их достигнуть невозможно.

Показано, что по сравнению с ТП ЭПП без управления, применение программ оптимального управления позволяет достигнуть выигрыша  $\varepsilon$  по энергоёмкости  $Q$  или по толщине съема поверхностного слоя  $h$  в зависимости от начального условия  $Ra_0$ , температуры  $T$ , целевой шероховатости  $Ra_{ц}$  и ограничения  $h_d$ .

Из рис. 8 следует, что ужесточение требований к допустимой толщине съема поверхностного слоя  $h_d$  или к целевой шероховатости  $Ra_{ц}$  приводит к повышению энергоёмкости за счет необходимости выполнения ограничения по  $h$ , что недостижимо без управления.

Таким образом, разработанный метод оптимального управления на основе контроля шероховатости поверхности по импедансным спектрам позволяет снизить энергоёмкость и уменьшить изменение геометрических размеров деталей за счет оптимизации траектории изменения управляющего напряжения и своевременного останова процесса обработки.

## ВЫВОДЫ

На основе экспериментальных исследований объекта управления установлены взаимосвязи, отражающие закономерности изменения свойств поверхностного слоя и импедансных спектров процесса ЭПП в зависимости от технологических параметров (напряжения на электролизере, температуры электролита, длительности обработки и начальной шероховатости), что позволяет выявить переходные характеристики процесса ЭПП, формализовать его модель как объекта управления, предложить способы контроля шероховатости и обосновать метод оптимального управления.

Разработана модель объекта управления в виде структуры из типовых динамических звеньев (апериодического звена первого порядка, интегрирующего и безынерционного звеньев), с переменными параметрами (постоянная времени и коэффициенты передачи звеньев), рассчитываемыми с помощью радиально-базисной нейронной сети по начальным условиям и управляющим воздействиям, что позволяет поставить и решить задачу оптимального управления процессом электролитно-плазменного полирования.

Разработан метод оптимального управления процессом ЭПП, заключающийся в изменении напряжения на электролизере по оптимальной траектории, рассчитанной по модели объекта управления для достижения требуемой шероховатости поверхности с минимальным энергопотреблением, при ограничении по толщине съема поверхностного слоя, стабилизации температуры электролита на постоянном уровне и своевременном останове процесса за счет контроля свойств поверхности по импедансным спектрам, реализуемом либо по запатентованному способу на основе модели объекта управления, либо с помощью диагностической радиально-базисной нейросетевой модели.

Разработан аппаратно-программный комплекс АСУ ТП, реализующий метод оптимального управления процессом ЭПП на основе изменения напряжения на электролизере по оптимальной траектории и контроля шероховатости поверхности, толщины съема поверхностного слоя по импедансным спектрам, обеспечивающий снижение энергоёмкости процесса на 6...11 % и уменьшение толщины съема поверхностного слоя на 20...30 % при достижении требуемой шероховатости поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов, И. С., Ващенко С. В., Каменев А. Я. Электролитно-плазменная обработка материалов. Минск: Беларус.навука, 2010. 232 с. [I. S. Kulikov, S. V. Vashenko, A. Y. Kamenev. Electrolytic plasma processing of materials, (in Russian). Minsk: Belarus Navuka, 2010, p. 232.]

2. Стойнов, Э. Б., Графов, Б. М., Саввова-Стойнова, Б. С., Елкин, В. В. Электрохимический импеданс. М: Наука, 1991. 336 с. [E. B. Stoinov, B. M. Grafov, B. S. Savvova-Stoinova, V. V. Elkin. Electrochemical impedance, (in Russian). Moscow: Nauka, 1991, p. 336.]

3. Парфенов Е. В., Невьянцева Р. Р., Горбатков С. А., Ерохин А. Л. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление. М.: Машиностроение, 2014. 380 с. [E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbatkov, A. L. Yerokhin. Electrolytic plasma processing: modelling, diagnostics, control. (in Russian) Moscow: Mashinostroenie, 2014, p. 380.]

4. Curioni M., Koroleva E. V., Skeldon P., Thompson G. E. Flow modulated ionic migration during porous oxide growth on aluminium // *Electrochimica Acta*, 2010. vol. 55, pp. 7044–7049.

5. Мукаева, В. Р., Парфенов Е. В. Математическое моделирование процесса электролитно-плазменного полирования. // Уфа: Вестник УГАТУ, 2012. Т.16. №6. С. 67-73. [V. R. Mukaeva, E. V. Parfenov Mathematical modeling of electrolytic plasma polishing process(in Russian), Vestnik UGATU, vol. 16, no.6,pp. 67-73, 2012. ]

6. Yerokhin A., Parfenov E. V., Liang C. J., Mukaeva V. R., Matthews A. System linearity quantification for in-situ impedance spectroscopy of plasma electrolytic oxidation // *Electrochemistry Communications*, 2013. vol. 27. pp. 137–140.

7. Парфенов Е. В., Мукаева В. Р., Невьянцева Р. Р., Быбин А. А.. Патент РФ №2475700. МПК G 01 В 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности в процессе электролитно-плазменной обработки. Оpubл. 20.02.2013. [E. V. Parfenov, V. R. Mukaeva, R. R. Nevyantseva, A. A. Bybin, Patent RF №2475700. МПК G 01 В 7/34 Method of surface roughness measurement during plasma electrolytic treatment. Publ. 20.02.2013.]

8. Парфенов Е. В., Горбатков М. В., Мукаева В. Р. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ. № 2013618088. Программа микроконтроллера для спектральной диагностики и управления процессами электролитно-плазменной обработки. Оpubл. 29.09.2013. [E. V. Parfenov, M. V. Gorbatkov, V. R. Mukaeva, Certificate of state registration of computer program № 2013618088. Program for microcontroller for spectral diagnostics and control of electrolytic-plasma processes. Publ. 29.09.2013. ]

## ОБ АВТОРАХ

**МУКАЕВА Вета Робертовна**, науч. сотр., каф. теор. основ электротехн. М-р в обл. инф. измерит. техники и технологий (УГАТУ, 2011), Канд. техн. наук по автомат. и упр. технол. проц. и произв. (УГАТУ, 2014). Иссл. в обл. диагностики и моделирования технол. процессов.

**ПАРФЕНОВ Евгений Владимирович**, проф. каф. теор. основ электротехн. Дипл. инж. по пром. электронике (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук по автомат.и упр. технол. проц. и произв. (там же, 2012). Иссл. в обл. управления технол. процессами электролитно-плазменной обработки.

**ГОРБАТКОВ Михаил Викторович**, асп. каф. теор. основ электротехн. М-р в обл. электроники и микроэлектроники (УГАТУ, 2014).

**НЕВЬЯНЦЕВА Римма Рахимзяновна**, доц. каф. общ. химии. Дипл. инж.-металлург и физ.-химик (Челяб. политехн. ин-т, 1965). Канд. хим. наук по неорг. химии (ИФП СО АН СССР, 1972). Иссл. в обл. ремонта лопаток авиац. двиг. электролитно-плазменным методом.

## METADATA

**Title:** Optimal control of electrolytic plasma polishing technological process using plant monitoring by impedance spectra.

**Authors:** V. R. Mukaeva<sup>1</sup>, E. V. Parfenov<sup>2</sup>, M. V. Gorbatkov<sup>3</sup>, R. R. Nevyantseva<sup>4</sup>.

**Affiliation:**

<sup>1-4</sup>Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>veta\_mr@mail.ru, <sup>2</sup>pev\_us@yahoo.com,

<sup>3</sup>mikesg@mail.ru, <sup>4</sup>rrnev@mail.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 3 (69), pp. 150-157, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Results of experimental study and a model of electrolytic plasma polishing process (EPP) as a structure of basic dynamic units with variable parameters are presented. A new process control method for the EPP is proposed. The method includes optimal voltage control program and in-situ measurement of surface roughness and thickness of the removed layer. Methods of impedance spectroscopy, linear mathematical programming and neural network modeling have been applied. The block diagram of the optimal control automated system and the prototypes of hardware and software are described.

**Key words:** Electrolytic plasma polishing, roughness, stainless steel, dynamic model, mathematical modeling, monitoring of surface properties, optimal control

**About authors:**

**MUKAEVA, Veta Robertovna**, Research fellow, Dept. of Theoretical Basis of Electrical Engineering. Dipl. Master in information measurement technics and technology (UGATU, 2011). PhD in automated process control (UGATU, 2014).

**PARFENOV, Evgeny Vladimirovich**, Prof., Dept. of Theoretical Basis of Electrical Engineering. Dipl. Eng. in Industrial Electronics (UGATU, 1997). DSc in automated process control (UGATU, 2012).

**GORBATKOV, Mikhail Victorovich**, PhD student, Dept. of Theoretical Basis of Electrical Engineering. Master of Technics & Technology (UGATU, 2014).

**NEVYANTSEVA, Rimma Rakhimzyanovna**, Assoc. Prof., Dept. of General Chemistry. Dipl. Eng.-Metallurgist (Chelyabinsk Polytech. Inst., 1965). PhD in chemistry (Inst. of Semicond. Phys. Siberian Branch of USSR Acad. of Sci., 1972).