

**Сариллов М.Ю.**  
**Sarilov M.Yu.**

**К ВОПРОСУ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ  
ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ**

**ON THE ISSUE OF THE ADAPTIVE CONTROL OVER THE PROCESS OF ELECTRIC-  
AL DISCHARGE MACHINING**



**Сариллов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре), 681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [sarilov@knastu.ru](mailto:sarilov@knastu.ru).

**Mikhail Y. Sarilov** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Mechanical Engineering Technology of the Komsomolsk-on-Amur State Technical University (Komsomolsk-on-Amur), e-mail: [sarilov@knastu.ru](mailto:sarilov@knastu.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрены вопросы устойчивости и автоматизации электроэрозионной обработки. Предложено дифференциальное уравнение устойчивости процесса обработки в целом, а также уравнение устойчивости импульса по методу Ляпунова. Описаны пять основных видов импульсов, присутствующих при электроэрозионной обработке. Предложена схема адаптивного управления процессом ЭЭО.

**Summary:** The paper examines the issues of sustainability and automation of electrical discharge machining. Proposed is a differential equation of the stability of the processing in general, and also an equation of the stability of the pulse by the Lyapunov method. Also the paper describes five main types of pulses present at spark processing. A scheme for adaptive control of the EDM is proposed.

**Ключевые слова:** электроэрозионная обработка, автоматизация, эвакуация, устойчивость, адаптивное управление, импульс, нейронная сетка, зазор, станок, производительность.

**Key-words:** electrical discharge processing, automation, evacuation, stability, adaptive control, pulse, neural nets, gap, machine performance

УДК 621.9.048.4: 681.324

Традиционно процесс электроэрозионной обработки (ЭЭО), как объект автоматизации, рассматривается в виде трех тесно взаимосвязанных между собой систем регулирования:

а) системы автоматического регулирования межэлектродного расстояния, поддерживающей величину зазора на уровне, не превышающем расстояния возникновения стабильных электроимпульсных разрядов, но в то же время достаточном для обеспечения беспрепятственной эвакуации продуктов эрозии;

б) системы оптимального управления электрической мощностью, вводимой в зону обработки, для достижения максимальной производительности при изменяющейся площади обработки;

в) системы автоматического регулирования частоты и тока для получения заданного качества поверхности в минимальное время.

Из этих систем первая находится на стадии промышленного применения, вторая – частично на стадии промышленного применения и экспериментального опробования и, наконец, последняя система – на стадии исследования [1].

Таким образом, традиционная схема автоматизации электроэрозионных операций до настоящего времени еще не реализована в полной мере, и перспективы ее развития остаются под вопросом. Между тем, более эффективным видится подход в формировании единой, не



разделенной на подсистемы, адаптивной системы управления процессом ЭЭО, созданной на общем принципе анализа устойчивости процесса обработки, оцениваемой в различных масштабах времени.

Под устойчивостью будем понимать способность сохранять в течение заданного промежутка времени стабильными такие параметры ЭЭО, как производительность, качество получаемой поверхности, точность формообразования и стойкость электрода-инструмента, несмотря на возникновение в системе случайных или закономерных возмущений.

Если обозначить через  $p_1, p_2, \dots, p_n$  параметры, определяющие процесс ЭЭО, тогда динамика процесса описывается обыкновенными дифференциальными уравнениями, которые могут быть решены относительно производных по времени:

$$\begin{cases} \frac{dp_1}{dt} = Y_1(p_1, p_2, \dots, p_n, t) \\ \dots \\ \frac{dp_n}{dt} = Y_n(p_1, p_2, \dots, p_n, t) \end{cases} \quad (1)$$

где  $Y_1, \dots, Y_n$  – известные функции переменных  $p_1, p_2, \dots, p_n$  по времени  $t$ , удовлетворяющие условиям существования и единственности решения. Невозмущенному состоянию процесса отвечает определенное частное решение

$$p_1 = f_1(t), p_2 = f_2(t), \dots, p_n = f_n(t)$$

дифференциальных уравнений (1), удовлетворяющих условиям:

$$\text{при } t = t_0: p_1 = f_1(t_0), p_2 = f_2(t_0), \dots, p_n = f_n(t_0). \quad (2)$$

Изменив условия (2) и дав начальным значениям параметров  $p_1, p_2, \dots, p_n$  небольшие по модулю приращения  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ , получим начальные условия, соответствующие возмущенному развитию процесса обработки:

$$\text{при } t = t_0: p_1 = f_1(t_0) + \varepsilon_1, p_2 = f_2(t_0) + \varepsilon_2, \dots, p_n = f_n(t_0) + \varepsilon_n.$$

Обозначив значения параметров  $p_j$  в возмущенном развитии процесса через  $p_j(t)$ , а в невозмущенном – через  $f_j(t)$ , получим вариации  $\Delta p_j$  параметров процесса ЭЭО:

$$\Delta p_j = p_j(t) - f_j(t), (j = 1, 2, \dots, n).$$

Тогда, исходя из критерия Ляпунова, условие устойчивости процесса ЭЭО будет иметь вид:

$$\lim_{t \rightarrow \tau} \Delta p_j(t) \leq \delta_j, \quad (3)$$

где  $\delta_j$  – максимально допустимое отклонение  $j$ -го параметра обработки;  $\tau$  – заданный интервал времени.

С позиций адаптивного управления технологическими параметрами ЭЭО устойчивость динамической системы процесса формообразования удобно рассматривать в трех масштабах времени.

Если интервал времени  $\tau$  в условии (3) ограничить длительностью импульса  $\tau \leq t_{ин}$ , а в качестве  $\Delta p$  считать отклонение от падения напряжения на межэлектродном промежутке, то при соблюдении условия (3) можно говорить об устойчивости процесса ЭЭО в *масштабе времени единичного импульса*.

Неустойчивость в масштабе импульса означает, что по каким-либо причинам единичный электроимпульсный разряд не может быть инициирован, а если возникает, то обрывается, не совершив требуемой полезной работы. Такая неустойчивость напрямую влияет на производительность обработки и косвенно на качество обработанной поверхности.

Устойчивость в масштабе импульса может быть достаточно легко исследована с помощью прямого метода Ляпунова исходя из дифференциального уравнения установившихся режимов вольтовой дуги в цепи с сопротивлением  $R$  и самоиндукцией  $L$ :

**Сарилов М.Ю.**

## К ВОПРОСУ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \varphi(i) = E, \quad (4)$$

где  $i$  – ток, протекающий между электродами;  $E$  – напряжение источника питания;  $\varphi(i)$  – нелинейная зависимость между током  $i$  и напряжением  $u$  в дуговом промежутке.

За невозмущенное развитие дугового процесса примем условие  $i = I$  (где  $I$  – ток в установившейся дуге), а за возмущенное – выражение  $i = I + \varepsilon$ . Тогда функцией Ляпунова для уравнения (4) является определенно-положительная функция [2]:

$$V = \frac{1}{2} L \varepsilon^2.$$

Ее производная по времени  $\dot{V}$ , вычисленная в силу дифференциального уравнения возмущенного режима дугового разряда, будет отрицательно-определенной функцией  $\varepsilon$  при выполнении условия  $R + \dot{\varphi}(i) > 0$  и, следовательно, на основании теоремы Ляпунова об устойчивости. При выполнении данного условия режим протекания электроимпульсного разряда будет асимптотически устойчив.

Таким образом, зная характер зависимости  $\varphi(i)$ , несложно реализовать электронную схему автоматического поддержания устойчивости процесса ЭЭО в масштабе времени единичного импульса.

Если интервал времени в условии (3) сделать бесконечно большим  $\tau = \infty$ , то можно говорить об устойчивости в *масштабе времени технологической операции*. Данный вид устойчивости ЭЭО будет иметь место при соблюдении в заданном весьма большом интервале времени баланса вновь образующихся эвакуируемых продуктов эрозии. Если обозначить через  $M_0$  общий объем продуктов эрозии, образующихся в единицу времени, а через  $M_v$  – количество продуктов эрозии, которое может быть удалено при данных условиях в ту же единицу времени (скорость эвакуации), то условие устойчивости процесса ЭЭО в масштабе времени технологической операции запишется как:

$$M_0 \leq M_v.$$

Неустойчивость ЭЭО в масштабе времени технологической операции существенно снижает производительность обработки, но может быть устранена различными технологическими приемами, улучшающими условия эвакуации продуктов эрозии из зоны обработки, например применением принудительной прокачки рабочей жидкости, вибрации или вращения электродов.

Промежуточное положение между масштабами времени единичного импульса и технологической операции занимает наиболее информативный с позиций диагностики процесса ЭЭО *масштаб времени серии импульсов*. Этот масштаб определяется интервалом времени  $\tau = nt_{и}$ , где  $n$  – количество импульсов в серии. Неустойчивость ЭЭО в масштабе серии импульсов (которую коротко можно охарактеризовать как непериодичность возникновения полноценных рабочих электроэрозионных разрядов в межэлектродном промежутке) не только снижает производительность обработки, но и существенно ухудшает качество получаемой поверхности, а также приводит к интенсивному износу электрода-инструмента и, как следствие, снижает точность формообразования. Рассмотрение механизма возникновения электроимпульсного разряда показало, что существует, по крайней мере, пять видов электрических импульсов, подводимых в зону обработки [3]:

1) *рабочий импульс*, после которого возникают стабильный дуговой разряд и лунка на поверхности электрода-заготовки, соответствующая некоторым номинальным средним условиям ЭЭО;

2) *импульс холостого хода*, характеризующийся отсутствием возникновения дугового разряда между электродами из-за слишком большого зазора;



3) *импульс короткого замыкания*, который наблюдается при замыкании электродов через микронеровности на их поверхностях и также не сопровождающийся возникновением дугового разряда;

4) *повторный импульс*, то есть совмещение в пространстве предыдущего и последующего разрядов, что обычно происходит, когда пауза между импульсами мала. Поскольку на заготовке нет пространственного переноса лунок, то нарушается сам принцип электроэрозионного формообразования;

5) *фиктивный импульс*, сопровождающийся пробоем газовой, но не жидкой фазы, и характеризующийся малым объемом лунки, возникающей на электроде-заготовке.

В настоящее время для получения информации о состоянии межэлектродного зазора и диагностики возникающих там электроимпульсных разрядов используют электрические характеристики процесса ЭЭО. Но при таком подходе не представляется возможным провести четкую классификацию между рабочими, повторными и фиктивными импульсами. А между тем повторные импульсы крайне нежелательны в процессе ЭЭО, так как нарушают равномерность распределения эрозионных лунок на поверхности электрода-детали, чем снижают качество обработанной поверхности, а также в силу несимметричного распределения энергии возникающего дугового разряда вызывают интенсивный износ электрода-инструмента.

Проведенные экспериментальные исследования показали [4], что повторные, а также (в несколько меньшей степени) фиктивные импульсы характеризуются избытком энергии, которая в отсутствии процесса образования эрозионной лунки рассеивается в виде ударной волны, распространяющейся в рабочей жидкости и электродах и четко фиксируемой с помощью датчика акустической эмиссии, закрепленного на электроде-инструменте.

Таким образом, для четкой диагностической классификации периодических импульсных процессов, происходящих в межэлектродном промежутке, необходимо трехканальное регистрирующее устройство, фиксирующее импульсы напряжения  $U_j$  между электродами, тока  $I_j$  и импульсы акустической эмиссии  $A_j$ , возникающие в процессе обработки ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

На базе данной диагностики был осуществлен принцип адаптивного управления, заключающийся в создании таких условий процесса ЭЭО, при которых серия импульсов состояла бы из максимально большого количества равномерно следующих рабочих импульсов, не перемежаемых повторными или фиктивными импульсами, и не прерывалась при этом импульсами холостого хода или короткого замыкания. То есть был использован метод управления устойчивостью процесса ЭЭО в масштабе времени серии импульсов.

Так как серия импульсов представляет собой явление, плохо формализуемое с помощью аналитических зависимостей, то прямой метод Ляпунова для анализа устойчивости процесса ЭЭО в этом масштабе времени оказался неприменим. Поэтому для оценки устойчивости были использованы методы нелинейной динамики, в частности критерий оценки хаотичности временных рядов с помощью вычисления фрактальной размерности  $D_0$ , реконструированного по ряду аттрактора динамической системы.

В качестве элементов временного ряда использовались показатели полезной работы, совершенной каждым из единичных энергетических импульсов серии, – объем  $V_j$  лунки, формируемой импульсом на электроде-заготовке. Объем  $V_j$  предложено находить из эмпирической зависимости вида:

$$V_j = \mathfrak{F}(U_j I_j - k A_j), \quad (5)$$

где  $\mathfrak{F}$  – нелинейная функция;  $k$  – эмпирический коэффициент.

В этом выражении член  $U_j I_j$  характеризует количество электрической энергии, введенной в межэлектродный зазор, а член  $k A_j$  – количество энергии, не потраченной на эрозию электродов, а рассеянной в виде ударной волны.

Так как характеристики функции  $\mathfrak{F}$  заранее неизвестны, то для реализации формулы (5) была использована нейронная сеть – трехслойный персептрон (на рис. 1 обозначена цифрой

III). Обучение сети производилось на основе экспериментальных данных методом обратного распространения ошибки.

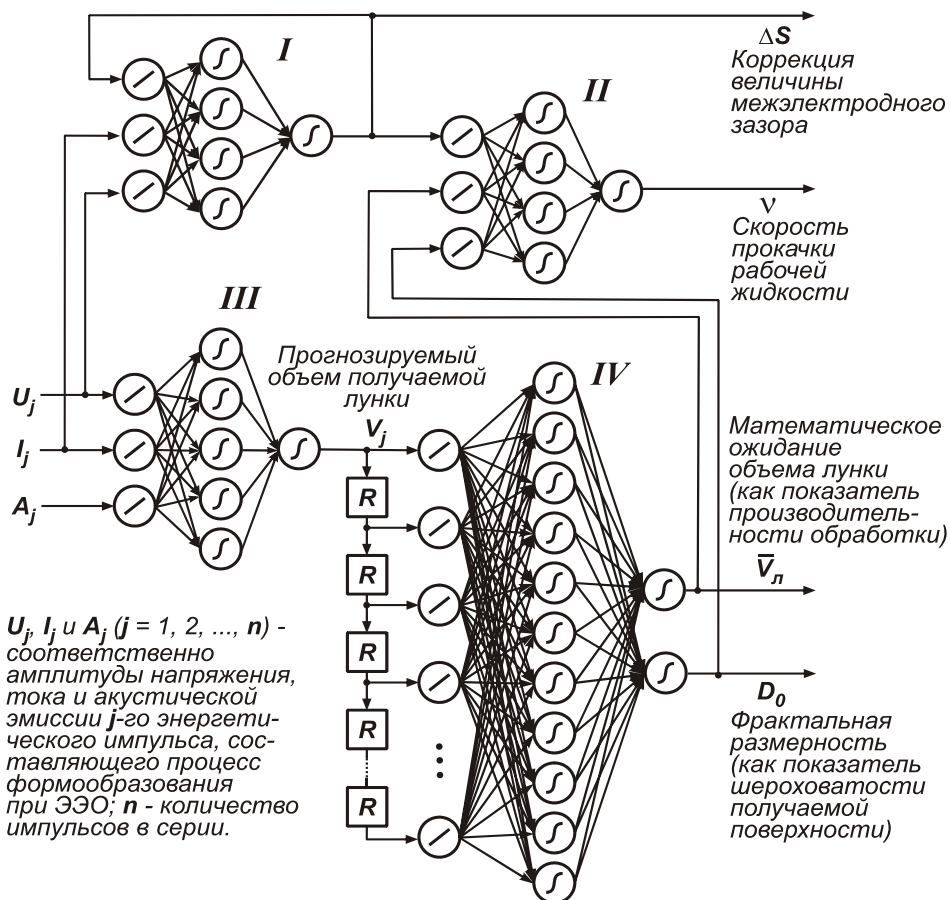


Рис.1. Адаптивная система управления процессом ЭЭО. Нейронная сеть **I** управляет устойчивостью обработки в масштабе времени единичного импульса, сеть **II** контролирует устойчивость процесса в масштабе времени технологической операции, сети **III** и **IV** управляют устойчивостью ЭЭО в масштабе времени серии импульсов.

Сформированный временной ряд  $V_1, V_2, \dots, V_n$  служит исходными данными для реконструкции аттрактора динамической системы процесса ЭЭО. Реконструкция проводилась методом задержек с помощью динамической нейронной сети (на рис. 1 обозначена цифрой IV). Данная сеть имеет 4096 входов, на которые с помощью сдвиговых регистров (на рисунке обозначены буквой  $R$ ) подаются значения  $V_j$ . Таким образом, сеть непрерывно анализирует параметры последних 4096 эрозионных лунок, образующихся ( $V_j$  много больше 0 для рабочих,  $V_j$  стремится к 0 для повторных и фиктивных импульсов) или не образующихся ( $V_j$  равно 0 для импульсов холостого хода и короткого замыкания) после соответствующих им 4096 электрических разрядов, поданных на электроды. Обновление временного ряда происходит последовательно – каждый вновь формирующийся на выходе сети III элемент  $V_1$  сдвигает ряд на одну позицию в сторону увеличения порядковых номеров элементов ряда и «выталкивает» из регистров самый последний элемент. Сети III и IV синхронизированы между собой тактовыми сигналами, которые вырабатывает сеть III и частота которых совпадает с частотой следования электрических импульсов, подаваемых генератором станка в зону обработки.

Первый слой сети IV состоит из 4096 нейронов с линейной активационной функцией и служит для нормирования входных данных. Второй слой состоит из 1024, а третий – из 2 нелинейных нейронов с сигмоидной логистической функцией активации. Основной функцией нелинейных слоев сети IV является реконструкция аттрактора и вычисление его фрактальной размерности  $D_0$ . Параллельно с этим сетью решается задача вычисления среднего значения

объема  $\bar{V}_л$  эрозионной лунки для серии из последних 4096 произведенных генератором станка электрических импульсов:

$$\bar{V}_л = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n V_j, n = 4096.$$

Для чистовых режимов обработки (частота генератора  $f_r = 22$  кГц) окно усреднения составляет 0,186 с, для черновых ( $f_r = 4$  кГц) – 1 с.

Получаемый сетью параметр фрактальной размерности  $D_0$  аттрактора динамической системы процесса ЭЭО очень тесно коррелирует с шероховатостью  $R_a$  получаемой поверхности, поэтому используется в адаптивной системе, как информативный признак качества обработки. Параметр  $\bar{V}_л$  позволяет судить о том, насколько интенсивно происходит эрозия электрода-заготовки, то есть является информативным признаком производительности ЭЭО. Опираясь на эти два информативных признака, производится управление устойчивостью процесса ЭЭО в масштабе времени серии путем подстройки в соответствии с типовыми алгоритмами оптимизации электрических режимов обработки (частота, скважность, количество задействованных ключей генератора), обеспечивая тем самым максимальную производительность при сохранении приемлемого качества обработанной поверхности.

Аналогичным образом с использованием нейронносетевых алгоритмов производится управление устойчивости процесса ЭЭО в других масштабах времени – масштабе времени и масштабе технологической операции. Для этого в состав адаптивной системы управления (рис. 1) введены две нейронные сети I и II, которые управляют соответственно величиной межэлектродного расстояния  $S$  и скоростью  $v$  прокачки рабочей жидкости. Сеть I регистрирует факт наличия в процессе обработки импульсов холостого хода или короткого замыкания и в зависимости от этого вырабатывает отрицательный либо положительный сигнал коррекции  $\Delta S$  величины межэлектродного зазора. Сеть II отслеживает величину межэлектродного зазора, а также устойчивость возникновения рабочих разрядов в серии импульсов и контролирует скорость течения рабочей жидкости таким образом, чтобы добиться максимальной эвакуации продуктов эрозии из зазора, но с другой стороны не нарушать при этом механизм мостикообразования и условий устойчивого возбуждения разрядов.

Описываемая адаптивная система была реализована в части управления устойчивостью процесса ЭЭО в масштабе времени серии импульсов. Объектом управления служил электроэрозионный копировально-прошивочный станок 4Л721Ф1. Адаптивная система управления исполнена в виде ПЭВМ, оснащенной четырехканальным цифровым осциллографом, программным образом реализованными нейронными сетями и алгоритмами оптимизации. Станок был оснащен дополнительными датчиками тока, напряжения и акустической эмиссии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кабалдин, Ю. Г. Повышение устойчивости процесса электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта / Ю. Г. Кабалдин, М. Ю. Сариллов, С. В. Биленко. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 191 с.
2. Электроимпульсная обработка металлов / А. Л. Лившиц, А. Т. Кравец, И. С. Рогачев, А. Б. Сошенко – М. : Машиностроение, 1967. – 294 с.
3. Меркин, Д. Р. Введение в теорию устойчивости движения / Д. Р. Меркин – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 304 с.
4. Сариллов, М. Ю. Выбор параметров управления процессом электроэрозионной обработки / М. Ю. Сариллов, М. А. Покотило // Известия ТулГУ. – Тула : ТулГУ, 2006. – С. 80-87.