

# Особенности управления процессом электроэрозионного резания тонким электродом-проволокой

\* Б. Л. Овсянников<sup>a</sup>, \*\* А. Б. Швецова<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Московский политехнический университет,  
г. Москва, 107023, Россия, \* e-mail: [obl\\_d@mail.ru](mailto:obl_d@mail.ru)

<sup>b</sup>Общество с ограниченной ответственностью «ЭЛГЕС»,  
г. Москва, 119602, Россия, \*\* e-mail: [info@estanok.ru](mailto:info@estanok.ru)

Поступила 25.03.2019

После доработки 06.06.2019

Принята к публикации 07.06.2019

Изложен опыт электроэрозионной микрообработки. Исследованы особенности электроэрозионного резания деталей проволочным электродом-инструментом диаметром 7–20 мкм. Результаты исследования интерпретированы с использованием разработанной математической модели процесса электроэрозионного резания, аккумулирующей имеющиеся опытные данные о динамике процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО) с нежестким электродом-проволокой. Исследована проблема устойчивости процесса микрообработки тонкой проволокой при использовании дискретной подачи электрода-инструмента. Определены пути достижения предельной в заданных условиях скорости реза.

*Ключевые слова:* электроэрозионная обработка, микрообработка, резание, электрод-инструмент, жесткость, динамика, управление, математическая модель, устойчивость.

УДК 621.9.048.4

DOI: 10.5281/zenodo.3369708

## ВВЕДЕНИЕ

Поводом для проведения исследований, результаты которых приводятся в данной статье, послужили первоначально неудачные попытки осуществить изготовление тонких пазов в медных заготовках с помощью электроэрозионного резания тонким проволочным электродом-инструментом (ПЭИ), в дальнейшем вырезной электроэрозионной микрообработки (ВЭЭМО). Подобные операции используются для изготовления миниатюрных прецизионных деталей как в электронной технике, так и в других высокотехнологичных областях. Нами проводилась отработка режимов резания на макетах оборудования, предназначенного для ВЭЭМО. Для изготовления пазов применялся ПЭИ из вольфрама диаметром 8 мкм. Подача ПЭИ осуществлялась с помощью шагового привода. Первоначально величина шага составляла 1 мкм, при этом использовались системы слежения за положением направляющих ПЭИ с помощью оптической системы обратной связи и системы стабилизации скорости подачи с обратной связью по пиковому напряжению на межэлектродном промежутке (МЭП) по принципу «вперед, стоп, отвод». Проведенные эксперименты показали высокую нестабильность процесса. Наблюдались регулярное возникновение коротких замыканий (КЗ), автоколебания в системе стабилизации скорости подачи и, как следствие, низкая скорость реза. Цель данной работы – выяснение причин возникающей нестабильности процесса ВЭЭМО и

разработка мер по преодолению возникших проблем управления процессом обработки.

## ОБЗОР ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО РЕЗАНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Уточним предварительно параметры исследуемого процесса. В общем случае диаметр вольфрамового или молибденового ПЭИ лежит в диапазоне 7–20 мкм. Для ВЭЭМО характерны особые электрические режимы. Длительности импульсов находится в диапазоне 0,01–1 мкс, а энергия разрядов составляет 0,01–0,5 мДж. Частота следования импульсов может достигать 200 кГц и более. Для таких параметров обработки характерны очень малые величины расстояний между электродами и малые силы натяжения ПЭИ.

Задача управления процессом вырезной электроэрозионной обработки (ВЭЭО) сводится к двум подзадачам:

- управление перемещением проволочного электрода-инструмента в пространстве по заданной траектории;
- управление скоростью перемещения ПЭИ, определяемой скоростью резания.

Для достижения стабильного резания в указанных условиях ВЭЭМО необходимо исследование процессов управления скоростью резания с учетом всех факторов, влияющих на течение процесса обработки.

Многими авторами в различное время отмечалось несоответствие действительной траектории реза с траекторией перемещения направляющих ПЭИ [1]. Особенно это характерно для изготовления миниатюрных деталей с малыми радиусами закругления. обстоятельный обзор проблем траекторных искажений, возникающих при ВЭЭМО, дан в [2]. Искажение траектории резания при ВЭЭМО авторы связывают с отклонением ПЭИ, вызванным силами, создаваемыми электрическими разрядами в межэлектродном промежутке (МЭП). В ряде работ предприняты попытки измерить усилия в МЭП, создаваемые электрическими разрядами, визуализировать отклонения и форму ПЭИ в процессе реза, а также отклонения ПЭИ при прошивке тонких отверстий [3–5]. В этих работах экспериментально установлено, что в процессе ЭЭО в МЭП возникают силы, создаваемые электрическими разрядами, стремящиеся увеличить межэлектродное расстояние. Влияние этого явления на точность ВЭЭМО ранее исследовалось и в работе [6]. Также в работе [6], помимо этого, указывалось и на то, что силы, создаваемые электрическими разрядами и вызывающие прогиб ПЭИ, оказывают влияние не только на точность воспроизведения формы детали, но и на скорость резания. Это объясняется тем, что данные силы изменяют величину МЭП, от которой зависит и скорость резания [7]. Таким образом, траекторные задачи управления и управление скоростью перемещения оказываются связанными между собой. Следует отметить, что силы, отжимающие ПЭИ и изменяющие межэлектродное расстояние, как указывается в [8], возникают также и в результате гидродинамического напора, возникающего при прокачке жидкой диэлектрической среды (ЖДС) через МЭП. Однако в случае ВЭЭМО принудительная прокачка ЖДС не применяется и влиянием гидродинамического напора в МЭП можно пренебречь.

Таким образом, можно считать установленным, что в процессе ВЭЭМО величина МЭП, от которой зависят интенсивность процесса и, следовательно, скорость резания, может изменяться под действием сил, создаваемых разрядами, в результате перемещения ПЭИ с помощью привода подачи, а также вследствие разрушения заготовки. Все эти факторы должны быть учтены при реализации процесса управления. Это особенно важно для микрообработки с дискретным приводом, так как натяжение ПЭИ в этом случае невелико, а величины МЭП сравнимы с шагом подачи. Проведем сначала теоретическое исследование процесса резания с учетом перечисленных факторов с

целью установления предполагаемых причин возникновения неустойчивости.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В работах [9, 10] проведены исследования взаимосвязи динамики величины межэлектродного промежутка (МЭП) с задачами управления процессом ВЭЭМО и построена математическая модель, аккумулирующая имеющиеся опытные данные о динамике процесса и пригодная для решения задач управления скоростью перемещения ПЭИ. Но в разработанной математической модели предусматривалось использование непрерывной подачи ПЭИ. Для решения поставленной задачи необходимо адаптировать ее к дискретной шаговой подаче ПЭИ.

Процедура построения модели и ее экспериментальное обоснование даны в [9, 10].

Приведем кратко основные результаты [9, 10], необходимые для понимания введенной терминологии и дальнейшего исследования.

Процесс ЭЭО обладает способностью к саморегулированию. Это связано с тем, что линейная скорость резания возрастает с уменьшением МЭП в некотором диапазоне межэлектродных расстояний и в результате флуктуации величины МЭП, скорости эрозии или подачи компенсируются так называемой внутренней отрицательной обратной связью. В целях управления процессом обработки это явление исследовалось как для жестких электродов, так и для электродов с ограниченной жесткостью. Поэтому сначала приведем описание динамики процесса обработки жестких электродов.

Выберем в качестве переменной, отражающей течение процесса обработки, величину МЭП. Величина МЭП является управляемой с помощью привода подачи и косвенно наблюдаемой по различным электрическим сигналам, таким, например, как амплитуда напряжения пробоя, и другим, с ними связанным. При разработке модели процесса были сделаны следующие допущения:

- электрод-деталь (ЭД) разрушается равномерно по всей поверхности взаимодействия;
- электрод-инструмент (ЭИ) не разрушается (восстанавливается) в результате перемотки ПЭИ при ВЭЭМО;
- площадь обработки постоянна.

При сделанных допущениях можно рассматривать только линейную скорость разрушения заготовки как функцию величины МЭП. Линейная скорость разрушения ЭД связана с объемной скоростью процесса соотношением:

$$v_L(d) = \frac{v_V(d)}{H \cdot D}, \quad (1)$$

где  $d$  – величина МЭП в направлении реза;  $v_V(d)$  – объемная скорость разрушения заготовки;  $v_L(d)$  – соответствующая ей линейная скорость реза в функции величины МЭП;  $H$  – толщина заготовки (принята неизменной);  $D$  – ширина паза.

Объемная скорость эрозии пропорциональна полезной мощности электрических разрядов, выделяющейся в МЭП в процессе обработки, и определяется свойствами обрабатываемого материала и режимом генератора импульсов.

Большинство исследователей отмечают экстремальный характер зависимости скорости эрозии от величины МЭП. Конкретный вид кривой зависит от типа генератора импульсов, условий эвакуации продуктов эрозии и других факторов.

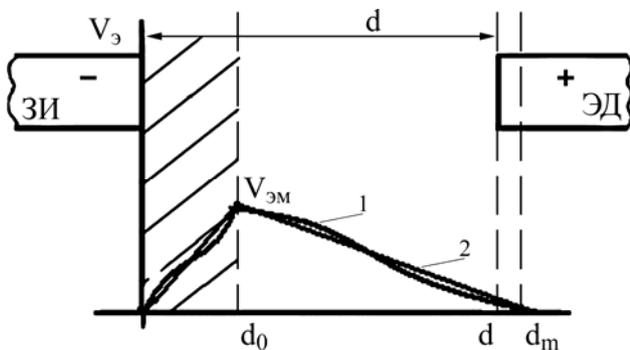


Рис. 1. Зависимость скорости эрозии от величины МЭП в случае жестких электродов.

На рис. 1 приведена некоторая гипотетическая зависимость скорости эрозии от величины МЭП. По вертикальной оси отложена линейная скорость эрозии. Кривая 1 получена путем сопоставления скорости подачи ЭД –  $V_n$ , совпадающей при стационарном течении процесса со скоростью эрозии, с величиной МЭП. Скорость эрозии возрастает с уменьшением МЭП вследствие увеличения коэффициента использования импульсов и повышения эффективности каждого рабочего импульса [7]. Предполагается, что существует некая максимальная скорость реза  $V_{эм}$ , достижимая в данном эксперименте. Подразумевается также, что скорость подачи непрерывна, и обработка ведется без обратной связи. Важно, чтобы скорость подачи не превосходила максимальную линейную скорость эрозии:  $V_n \leq V_{эм}$ .

Участок кривой  $(0, d_0]$  характеризуется наличием импульсов короткого замыкания, число которых возрастает с уменьшением  $d$ .

Для построения математической модели аппроксимируем кривую 1 ломаной, кривая 2 на рис. 1. Запишем уравнения участков аппрокси-

мирующей ломаной линии в координатах: скорость эрозии, величина МЭП –  $d$ .

$$\dot{d} = \frac{V_{эм}}{d_0} d - V_n; \quad d \in (0, d_0), \quad (2)$$

$$\dot{d} = \frac{V_{эм}}{d_m - d_0} (d_m - d) - V_n; \quad d \in (d_0, d_m). \quad (3)$$

Введем обозначения:

$$k_0 = \frac{V_{эм}}{d_0}; \quad k_2 = \frac{V_{эм}}{d_m - d_0}. \quad (4)$$

В формулах (2)–(4)  $V_{эм}$  – максимальная линейная скорость процесса электроэрозии при  $d = d_0$ ;  $d_m$  – максимальное значение величины МЭП, при которой наблюдаются электрические разряды;  $d_0$  – минимальное значение величины МЭП, при которой процесс сохраняет устойчивость, а скорость эрозии достигает максимального значения –  $V_{эм}$ ;  $k_0$  и  $k_2$  – градиенты скорости реза в линейном приближении;  $d$  с точкой – производная величины МЭП по времени.

Уравнения (2) и (3) описывают динамику изменения МЭП. Скорость подачи отрицательна, так как направлена на сближение электродов. В целом модель процесса (2), (3) существенно не линейна.

Пространство состояний распадается на две области:  $(d_0, d_m)$  – область устойчивых состояний и область неустойчивости  $[0, d_0]$ , имеющую единственную устойчивую точку –  $d = 0$ , соответствующую короткому замыканию. Положение ЭД на начальном участке возрастания скорости эрозии неустойчиво – уравнение (2), внутренняя обратная связь положительна. Уравнение (3) описывает устойчивый процесс обработки с эффектом саморегулирования.

Для построения модели динамики процесса в случае упругих электродов требуется введение дополнительной переменной, так как величина МЭП, определяющая скорость реза, может изменяться не только вследствие подачи ПЭИ, но и под действием сил, создаваемых электрическими разрядами [4–6]. Сделаем следующие допущения:

- на ПЭИ действует равномерно распределенная интегральная сила, создаваемая электрическими разрядами, направленная противоположно направлению реза, в результате чего ПЭИ имеет некоторый прогиб [1–6, 9];

- при стационарном течении процесса обработки интегральная сила процесса постоянна для каждого значения величины МЭП;

- ПЭИ не растяжим и не обладает жесткостью, прогиб образуется за счет «вытягивания» ПЭИ из системы перемотки;

– величина прогиба зависит от натяжения ПЭИ, расстояния между направляющими, толщины детали и интенсивности процесса;

– трение в направляющих системы перемотки и натяжения ПЭИ не учитывается.

Приведем здесь основные выводы работы [9], используемые для построения модели процесса:

– зависимость интегральной силы от величины МЭП подобна аналогичной зависимости скорости реза от величины МЭП, так как они обусловлены общей причиной – интенсивностью процесса эрозии;

– интегральные силы электрических разрядов возрастают с уменьшением величины МЭП в области устойчивости и могут быть уподоблены действию некоего упругого элемента;

– в линейном приближении зависимости линейной скорости реза и интегральной силы электрических разрядов от величины МЭП могут быть охарактеризованы соответствующими коэффициентами;

– в процессе обработки ПЭИ находится в состоянии устойчивого равновесия под действием двух противоположно направленных сил: интегральной распределенной по толщине детали силы, создаваемой электрическими разрядами, и силы, создаваемой системой натяжения, линейно зависящей от величины прогиба ПЭИ. Для построения модели введем обозначения согласно [9]:

$$k_1 = \frac{4F_n}{\left(L - \frac{H}{2}\right)}; \quad k_3 = \frac{F_{эм}}{d_m - d_0}, \quad (5)$$

где  $k_1$  – коэффициент жесткости ПЭИ при действии распределенной по высоте детали  $H$  нагрузки;  $k_3$  – градиент силы, создаваемый электрическими разрядами (эквивалентная жесткость процесса ЭЭО);  $F_n$  – сила натяжения ПЭИ;  $L$  – расстояние между направляющими;  $H$  – толщина детали;  $F_{эм}$  – максимальное значение интегральной силы, создаваемой разрядами при  $d = d_0$ . На рис. 2 представлена упрощенная схема равновесного течения процесса ВЭЭО.

В некоторой точке  $d$  МЭП, принадлежащей области устойчивости, достигается равновесие: скорость эрозии и скорость подачи  $V_n$  равны по величине и разнонаправлены, подвижный центр «О» занимает такое положение, при котором силы эрозии и силы «упругости» инструмента уравновешивают друг друга. В качестве дополнительной переменной, помимо величины МЭП –  $d$ , могут быть использованы: либо величина прогиба ПЭИ –  $r$ , либо координата обрабатываемого торца детали относительно подвижного центра равновесия ПЭИ. Условия равновесия ПЭИ в МЭП в процессе обработки:

$$k_1 r = k_3 (d_m - d). \quad (6)$$

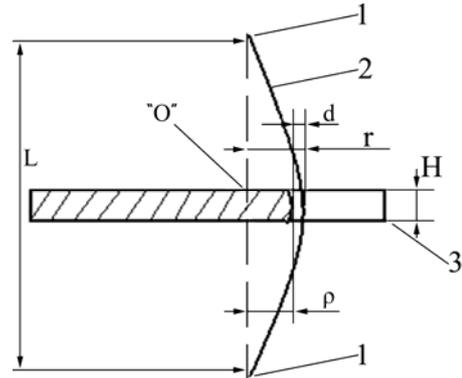


Рис. 2. Положение инструмента относительно заготовки, случай «упругого» ПЭИ и принятые обозначения: 1 – направляющие ПЭИ; 2 – ПЭИ; 3 – электрод-деталь;  $L$  – расстояние между направляющими;  $H$  – высота детали; «О» – положение подвижного центра равновесия ПЭИ (точки пересечения прямой, соединяющей направляющие ПЭИ с поверхностью детали), перемещаемого с помощью системы числового программного управления;  $\rho$  – координата истинного положения обрабатываемого торца детали относительно подвижного центра равновесия ПЭИ «О»,  $r$  – координата точки максимального отклонения ПЭИ от вертикали (прогиб);  $d$  – величина МЭП.

В равновесии всегда выполняется очевидное геометрическое равенство:

$$r = \rho + d. \quad (7)$$

Рассматривая величины  $r$ ,  $\rho$ ,  $d$  как функции времени, учитывая линейную аппроксимацию этих зависимостей и соотношение равновесия упругих элементов (6), получим дифференциальные уравнения, описывающие динамику изменения каждой из переменных, характеризующих процесс обработки:

$$\dot{\rho} = -k(d_m + \rho) + V_n, \quad (8)$$

$$\dot{d} = k(d_m - d) - k_d V_n, \quad (9)$$

$$\dot{r} = -kr + k_r V_n. \quad (10)$$

Здесь обозначено:

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_3}; \quad k_d = \frac{k_1}{k_1 + k_3}; \quad k_r = \frac{k_3}{k_1 + k_3}. \quad (11)$$

Подробный вывод, экспериментальное и теоретическое обоснование этих соотношений, а также переходные характеристики приведены в работах [9, 10].

В уравнениях (8)–(10) скорость подачи считается постоянной и непрерывной. В общем случае при наличии обратной связи она должна быть функцией состояния МЭП, определяемого величиной  $d$ . В работе [9] введены понятия «упругий» электрод и «жесткий» электрод. В том случае, если  $k_3 \gg k_1$ , электрод можно считать упругим, при этом в соотношении (11) можно пренебречь  $k_1$  в знаменателе. Параметр системы

$k$ , имеющий смысл собственной частоты, в этом случае уменьшится в  $k_3/k_1$  раз. Для упругого электрода обычно это отношение составляет 5:10. Этот случай изображен на рис. 2. Если же  $k_3 \ll k_1$ , то в (11) можно пренебречь  $k_3$  в знаменателе, прогиб ПЭИ будет стремиться к нулю, а собственная частота системы будет равна  $k_2$  и модель системы вырождается в модель (3) для жестких электродов. В этом случае электрод можно считать абсолютно жестким.

Учитывая сказанное, можно уточнить задачу управления скоростью перемещения ПЭИ. Управление скоростью подачи сводится к двум подзадачам:

- настройке системы управления подачей на максимальную скорость реза;
- стабилизации этой скорости на выбранном уровне.

Как следует из приведенного анализа, квазиустойчивое положение ПЭИ, соответствующее максимальной скорости реза, находится на границе области устойчивости [10]. Если скорость подачи близка к максимальной скорости эрозии, случайные флуктуации скорости могут привести к попаданию процесса в область неустойчивости [9]. Если обработка ведется упругим электродом, то попадание в область неустойчивости приводит к возникновению устойчивого короткого замыкания, ПЭИ «повисает» на заготовке и требуется значительный отвод инструмента по пройденной траектории до полного устранения прогиба ПЭИ и восстановления МЭП. Следует отметить, что приведенная модель процесса резания предполагает равномерное распределение импульсов холостого хода (ХХ), короткого замыкания и рабочих в общей последовательности импульсов генератора установки в области устойчивости.

#### ПОСТРОЕНИЕ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ ВЭЭМО И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В исследуемом случае перемещение ПЭИ осуществляется с помощью шагового привода и скорость подачи является дискретной функцией времени.

Проведем исследование динамики процесса резания тонкой проволокой с использованием шагового привода подачи. Перейдем в уравнениях (8)–(10) к безразмерным величинам, положив величину шага подачи, равной  $h$ , отнеся основные переменные к величине максимальной величины МЭП –  $d_m$ . Проведем замены переменных:

$$u_1 = \frac{\rho}{d_m} + 1; \quad s_1 = \frac{h}{d_m},$$

$$u_2 = 1 - \frac{d}{d_m}; \quad s_2 = k_d \frac{h}{d_m}, \quad (12)$$

$$u_3 = \frac{r}{d_m}; \quad s_3 = k_r \frac{h}{d_m}.$$

С учетом замены (12) уравнения (8)–(10) примут стандартный вид:

$$\dot{u}_i + ku_i = s_i V_n; \quad i = 1, 2, 3. \quad (13)$$

В классификации [11] уравнения (13) представляют собой разомкнутые импульсные системы с линейной непрерывной частью. Приближенно будем считать, что подача  $V_n$  осуществляется последовательностью  $\delta$  – импульсов скорости с интенсивностью  $h$ , следующих с частотой подачи  $f$ ,  $T = 1/f$  – период следования шагов подачи. Тогда дискретная скорость подачи:  $V_n = h \cdot f$ . Уравнения примут вид:

$$\dot{u}_i + ku_i = s_i f; \quad i = 1, 2, 3. \quad (14)$$

Комплексная передаточная функция непрерывной части системы (14) с единичным усилением, при воздействии последовательности импульсов, в безразмерных единицах согласно [11]:

$$K(q, \varepsilon) = \frac{e^q}{e^q - e^\beta} e^{-\beta \varepsilon}, \quad (15)$$

где  $\beta = kT$  – период следования шагов, отнесенный к постоянной времени системы,  $q = p/k$ , – безразмерная комплексная частота,  $\varepsilon \in [0, 1]$  – относительное безразмерное время в пределах интервала между шагами. Если на входе системы действует последовательность, соответствующая скачку интенсивности, то согласно [11] изменение переменных состояния системы в дискретном времени примет вид:

$$u_i(n, \varepsilon) = s_i \left( K(0, \varepsilon) - \frac{1}{1 - e^\beta} e^{-\beta(n+1+\varepsilon)} \right); \quad i = 1, 2, 3, \quad (16)$$

где

$$K(0, \varepsilon) = \frac{1}{1 - e^\beta} e^{-\beta \varepsilon}. \quad (17)$$

Следовательно,

$$u_i(n, \varepsilon) = s_i \frac{1}{1 - e^\beta} \left( 1 - e^{-\beta(n+1)} \right) e^{-\beta \varepsilon}; \quad i = 1, 2, 3. \quad (18)$$

Согласно [11] установившееся значение переменной  $u_i$ :

$$u_i(\infty, \varepsilon) = s_i K(0, \varepsilon); \quad i = 1, 2, 3. \quad (19)$$

#### ПРОДОЛЖЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Уравнения (18) моделируют все три введенных переменные  $r$ ,  $\rho$ ,  $d$  в функции

**Таблица 1.** Результаты экспериментального исследования процесса обработки тонким ПЭИ, шаг подачи  $h = 1$  мкм

$E_{имп},$ мкДж	$F_{ген},$ кГц	$F_{под},$ Гц	$V_L,$ мкм/с	$V_L,$ мм/мин	$V_S,$ мм <sup>2</sup> /мин	$k_{xx},$ %	$t_{nn},$ с	$r,$ мкм	$D,$ мкм
20	160	3	1	0,06	0,024	90	~ 0,5	~ 0,5	12–13
110	160	5	1,5	0,09	0,036	95	~ 0,5	~ 0,5	12–13
Примечания.	Процесс нестабилен, наблюдается возникновение КЗ, требующих останова либо отвода ПЭИ. Средняя линейная скорость реза меньше частоты подачи. Установившийся режим не достигается.								

времени. С помощью полученных результатов проведем численное моделирование обработки. Исходными данными, необходимыми для моделирования, являются величины, входящие в формулы (2), (3), (5):  $V_{эм}, d_m, d_0, F_n, F_{эм}, L, H$ . Эти переменные определяют параметры модели. Проведем их оценку по заданным исходным данным и по результатам реальной (неудачной) обработки, сведенным в табл. 1.

Условия обработки: генератор импульсов ДГТ 740/967; система управления: числовое программное управление ДГТ 735 с оптической обратной связью по положению направляющих ЭИ.

Исходные данные: электрод-инструмент – проволока диаметром 8 мкм, материал вольфрам; натяжение  $F_n = 0,1$  Н; раствор скобы  $L = 20$  мм; величина шага подачи  $h = 1$  мкм; электрод-деталь – медная пластина толщиной  $H = 0,4$  мм, амплитуда импульсов напряжения холостого хода  $U_{xx} = 60$  В.

В табл. 1:  $E_{имп}$  – энергия импульсов;  $F_{ген}$  – частота генератора импульсов;  $V_L$  – линейная скорость реза;  $F_{под}$  – частота подачи;  $D$  – ширина реза;  $k_{xx}$  – процент импульсов холостого хода;  $r$  – величина прогиба ЭИ;  $t_{nn}$  – время переходного процесса после останова подачи.

Так как процесс нестабилен, по приведенным данным можно получить только приближенные оценки величин, необходимых для моделирования. По ширине реза определяем боковой зазор  $\sim 2$  мкм и по известным из практики соотношениям определим торцевой зазор в направлении реза:  $d_0 = 1$  мкм. По напряжению холостого хода для воды определим  $d_m = 10$  мкм. По энергии импульсов, частоте генератора, коэффициенту использования импульсов и известным оценкам обрабатываемости меди [7] оценим:  $V_{эм} \approx 20$  мкм/с. Необходимо отметить, что эта предельная в данных условиях скорость реза не достигается из-за отсутствия установившегося режима. Величина  $F_{эм}$  устанавливается экспериментально по соотношению величины прогиба ПЭИ и заданной величины  $F_n$  по формулам (5), (6). Величина прогиба вычисляется как произведение времени переходного процесса, оцениваемого по времени

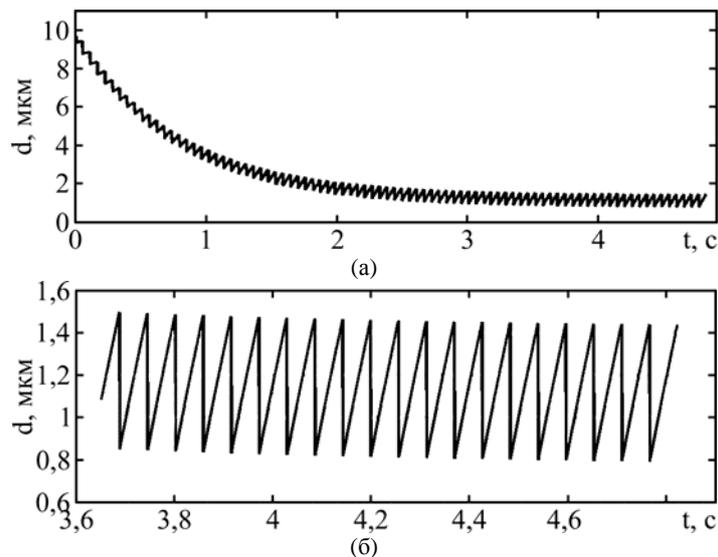
прекращения процесса эрозии после останова подачи  $t_{nn}$  и скорости подачи  $V_n$ :  $r \approx V_n \cdot t_{nn}$ . В данном случае эта оценка также затруднена и приближительна. Положим величину прогиба  $r = 10$  мкм, а  $F_{эм} \approx 10^{-4}$  Н.

По принятым оценкам по формулам (4), (5), (11) рассчитаем параметры модели:  $k_1 = 2 \cdot 10^{-5}$ ;  $k_2 = 2$ ;  $k_3 = 1 \cdot 10^{-5}$ ;  $k = 1,3$ ;  $k_d = 0,65$ ;  $k_r = 0,35$ . Полученные данные позволяют заключить, что при шаге подачи  $h = 1$  мкм величина МЭП уменьшается на 0,65 мкм, а прогиб ПЭИ увеличивается на 0,35 мкм.

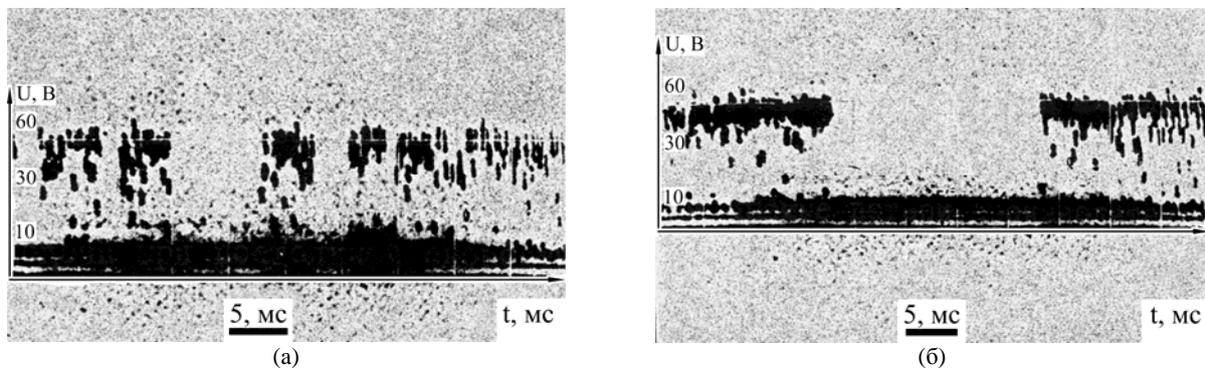
С целью выявления причин нестабильности реза проведем моделирование изменения во времени величины МЭП –  $d$  при сближении электродов, так как эта величина определяет течение процесса. Величина  $d$  находится из обобщенного решения –  $u_2$  соответствующей обратной подстановкой (12). Моделирование динамики процесса проводилось по формулам (18) и (12) в среде Mat Lab с помощью специально разработанной программы. При моделировании предполагалось, что процесс протекает стабильно и эпизоды потери устойчивости отсутствуют. Исходные данные для моделирования: максимальная скорость реза  $V_{эм} = 18$  мкм/с; частота подачи  $f = 17$  Гц; число шагов  $n = 80$ ; шаг подачи 1 мкм.

Как следует из приведенных результатов моделирования, переходной процесс завершается примерно за 3–4 секунды, что и наблюдается на практике. В завершение переходного процесса величина МЭП приближается к критическому значению  $d_0 = 1$  мкм (рис. 3б), и процесс попадает в область неустойчивости, представленную уравнением (2). Попадание ПЭИ в область неустойчивости влечет немедленное короткое замыкание, для устранения которого требуется отвод ПЭИ на несколько шагов. В результате в системе управления наступают автоколебания, и процесс обработки становится невозможным.

Нами замечено, что автоколебания возникают и на меньших скоростях подачи, при которых величина МЭП еще не достигает критических значений. Это, по-видимому, происходит в результате возмущения среды при относительно большом шаге подачи, что влечет нарушение



**Рис. 3.** Результаты моделирования изменения величины МЭП при сближении электродов с шагом 1 мкм; (а) – весь ход переходного процесса; (б) – финальная часть кривой в увеличенном масштабе.



**Рис. 4.** Осциллограммы импульсов напряжения на МЭП при ВЭЭО с использованием шагового привода при шаге подачи  $h = 1$  мкм: (а) величина МЭП  $d \sim 3$  мкм, (б) величина МЭП  $d \sim 1$  мкм. Напряжение ХХ – 60 В, напряжение, соответствующее КЗ,  $\leq 10$  В.

равномерности распределения импульсов различных типов.

На рис. 4 приведены типичные осциллограммы импульсов напряжения на МЭП при ВЭЭО с использованием шагового привода при шаге подачи  $h = 1$  мкм.

Как следует из приведенных осциллограмм, импульсы с малой амплитудой – импульсы КЗ – имеют тенденцию к группированию, причем количество импульсов в группах возрастает при приближении ПЭИ к критической области. Причина этого явления до конца не ясна. Однако группировка импульсов КЗ оказывает влияние на стабильность процесса резания. Появление групп КЗ порождает флуктуации величины силы, отжимающей ПЭИ, что при совпадении с шагом подачи приводит к устойчивому замыканию электродов, требующему отвода по пройденной траектории.

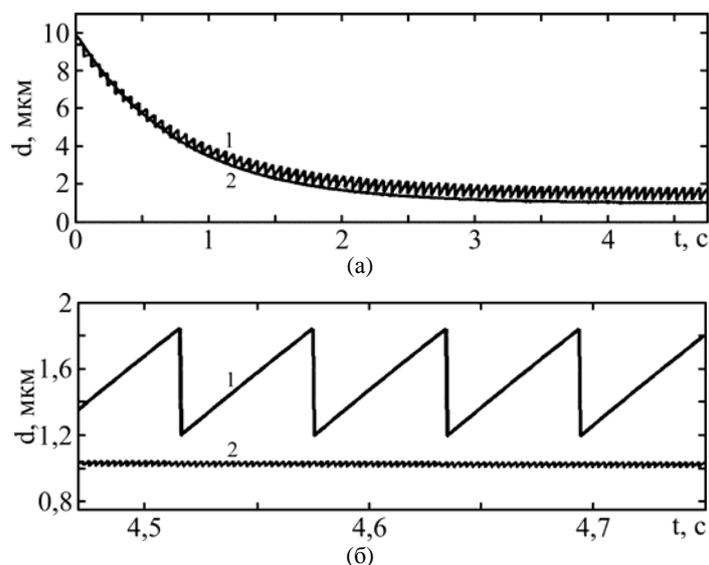
Таким образом, возможной причиной неустойчивости процесса является относительно большая величина шага подачи по сравнению с критическим значением МЭП. Для выяснения влияния величины шага подачи на течение

процесса проведем моделирование для величин шагов  $h = 1$  мкм и  $h = 0,05$  мкм. Остальные параметры сохраним неизменными.

На рис. 5а изображена зависимость изменения величины МЭП –  $d$  от времени при сближении электродов. Длительность шага составляет примерно 60 мс. Время переходного процесса – примерно 3,5 с. На рис. 5б показан финальный фрагмент того же графика в увеличенном масштабе. На рис. 5б видна значительная девиация величины МЭП, связанная с работой шагового привода. Минимальное и максимальное установившиеся значения МЭП определяются по формулам (17), (19) соответственно при:  $d(\infty,0) \approx 1,8$  мкм;  $d(\infty,1) \approx 1,2$  мкм. В модели величина МЭП –  $d_0 = 1$  мкм является критической для течения процесса. При величинах МЭП, меньших этого значения, возможно короткое замыкание.

Для оценки изменений МЭП вследствие шаговой подачи введем коэффициент девиации МЭП по формуле:

$$Kd = \frac{|d(\infty,0) - d(\infty,1)|}{d_0}. \quad (20)$$



**Рис. 5.** Результаты моделирования изменения величины МЭП при сближении электродов. Кривые 1 – сближение с шагом 1 мкм, частота подачи 17 Гц, кривые 2 – сближение с шагом 0,05 мкм, частота подачи 340 Гц; (а) – весь ход переходного процесса; (б) – финальные части кривых в увеличенном масштабе.

**Таблица 2.** Результаты экспериментального исследования процесса обработки тонким ПЭИ, шаг подачи  $h = 0,05$  мкм

$E_{\text{шт}}$ , мкДж	$F_{\text{ген}}$ , кГц	$F_{\text{под}}$ , Гц	$V_L$ , мкм/с	$V_L$ , мм/мин	$V_S$ , мм <sup>2</sup> /мин	$k_{\text{ж}}$ , %	$t_{\text{пр}}$ , с	$r$ , мкм	$D$ , мкм
20	160	160	8	0,5	0,2	85	~ 1	8	12–13
20	240	240	12	0,7	0,3	84	~ 2	12	12–13
110	160	400	20	1,2	0,48	75	~ 2	18	12–13
110	240	540	27	1,6	0,64	72	~ 3	25	12–13
110	240	600	30	1,8	0,72	60	~ 3	28	12–13
Примечания.	Процесс реза стабилен. Возможна плавная настройка частоты подачи на максимальную скорость реза при устойчивом течении процесса.								

В приведенном примере при шаге подачи 1 мкм  $Kd = 0,6$ . При шаге подачи 0,05 мкм  $Kd \approx 0,03$ . Наличие девиации МЭП не позволяет настроить систему автоматического управления подачей (САУП) на максимум производительности, так как приближение к границе устойчивости повышает риск КЗ и САУП стабилизирует МЭП на пониженной скорости. При уменьшении величины шага подачи вероятность подобных событий снижается, что позволяет настроить систему управления на большую скорость резания.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПОЛУЧЕННОГО РЕЗУЛЬТАТА

Для проверки влияния величины шага подачи на течение процесса резания проводилась обработка в условиях, аналогичных предыдущим, с шагом подачи  $h = 0,05$  мкм и соответствующим увеличением частоты подачи. Уменьшение шага подачи достигалось путем дробления шага шагового двигателя (ШД). Результаты исследований приведены в табл. 2.

Как следует из приведенных данных, достигаемая скорость реза увеличилась более чем на

порядок. Это стало возможным благодаря стабильности процесса и возможности тонкой настройки частоты подачи на максимальную скорость реза при сохранении стабильности. Следует полагать, что возможная скорость реза при шаге подачи  $h = 1$  мкм близка к скорости реза в последнем случае, так как она определяется энергетическими характеристиками режима, но не достигается из-за потери стабильности.

Уменьшения девиации МЭП можно добиться путем сокращения шага подачи либо снижением жесткости ПЭИ, причем жесткость ПЭИ может быть уменьшена снижением натяжения ПЭИ либо увеличением раствора скобы. Уменьшение жесткости ПЭИ сокращает также собственную частоту системы и увеличивает время переходного процесса, но снижает возможную точность обработки [6].

При дроблении шага подача ПЭИ становится практически непрерывной, что позволяет избежать коротких замыканий и точнее настроить САУ на максимальную скорость реза. Следует отметить, что дробление шага подачи и соответственное увеличение частоты шагов увеличивает разнос собственной частоты системы и частоты

входных воздействий, что улучшает подавление помех в системе ПЭИ – МЭП. Разработанная математическая модель процесса резания позволяет имитировать процесс при различных сочетаниях параметров обработки и прогнозировать ее результаты, что придает целенаправленность экспериментам и позволяет сократить их объем.

### ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованная математическая модель процесса электроэрозионного резания, учитывающая ограниченную жесткость ЭИ, адекватно отражает особенности электроэрозионного резания тонким ПЭИ с применением шаговой подачи.

2. При электроэрозионном резании тонким электродом – проволокой диаметром 7–12 мкм с использованием шагового привода величина шага подачи оказывает существенное влияние на течение процесса в том случае, если она сопоставима с величиной МЭП в направлении реза.

3. В том случае, если величина шага подачи сопоставима с величиной межэлектродного промежутка, возникают частые короткие замыкания и настройка системы подачи на производственный режим невозможна.

4. Улучшения работы системы управления приводом подачи можно достичь путем дробления шага подачи либо путем «смягчения» характеристик электрода-инструмента.

5. Наилучший результат по стабильности и производительности обработки достигается совместным дроблением шага подачи и уменьшением жесткости электрода-инструмента.

6. Настройка системы управления на максимальную скорость реза должна производиться с учетом времени переходного процесса – изменения скорости подачи производятся только по его завершении.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Conde A., Sanchez J.A., Plazab S., Ramos J.M. *Procedia CIRP*. 2016, **42**, 274–279.

2. Klocke F., Lung D., Nothe T. *Proceedings ISEM XIII*. Bilbao, Spain. 2001, Vol. **II**, P. 767–779.
3. Liang J.F., Tsai C.F., Lin M.H., Liao Y.S. *Proceedings ISEM-XVI*. Shanghai, China. 2010. P. 223–226.
4. Beltrami Ivano, Bertholds Axel, Dauw Dirk. *Proceedings ISEM-XI*. Lausanne, Switzerland 1995. P. 437–445.
5. Klocke F., Garzon M., Braun C., Dieckmann J. *Procedia CIRP*. 2013, **6**, 151–156.
6. Золотых Б.Н., Овсянников Б.Л., Ставицкая Н.Б. *ЭОМ*. 1989, (3), 16–19.
7. Ставицкий Б.И., Безрук А.И. *ЭОМ*. 1969, (5), 7–14.
8. Алексеев Г.А., Волков Ю.С., Сосенко А.Б. *Электрофизикохимическая обработка. Технология, оборудование, станочные системы*. Сборник научных трудов под редакцией Б.Х. Мечетнера. М.: ЭНИМС ОНТИ, 1987. С. 106–109.
9. Овсянников Б.Л., Ставицкая Н.Б. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2013, **2**(1), 91–97.
10. Овсянников Б.Л. *Известия МГТУ «МАМИ»*. 2013, **2**(16), 379–385.
11. Ципкин Я.З. *Теория линейных импульсных систем*. М.: Госиздат. физ-мат. литературы, 1963. 968 с.

### Summary

The experience of the electrical discharge micro-machining is reported. The peculiarities of electro-erosive cutting of pieces with a wire-electrode – a tool with a diameter of 7–20 μm. The results of the study are interpreted using the developed mathematical model of the electro-erosive cutting process, accumulating the available experimental data on the dynamics of the electro-erosive cutting process with a non-rigid electrode-wire. The problem of stability of the process of micro-machining with a thin wire via a discrete feed of the electrode – a tool. The ways of reaching the cutting speed limit under the given conditions are determined.

*Keywords:* electrical discharge machining, micro-machining, cutting, electrode – tool, stiffness, dynamics, control, mathematical model, stability.