

УДК 621.9.048.4

## СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

В. В. АДАМОВСКИЙ<sup>1</sup>, Е. В. ПАРФЕНОВ<sup>2</sup>, Р. Х. ГАНЦЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>adam2034@yandex.ru, <sup>2</sup>evparfenov@mail.ru, <sup>3</sup>ufa-iskra@yandex.ru

<sup>1,2</sup>ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

<sup>3</sup>АО ИНТЦ «Искра»

Поступила в редакцию 23.05.2016

**Аннотация.** Приведена структура процесса электроэрозионной обработки. Описаны основные составляющие элементы копировально-прошивочного электроэрозионного станка. Предложена структурная схема автоматизированной системы управления электроэрозионным станком, имеющая три канала управления. Представлены результаты тестовых испытаний разработанной системы управления в сравнении с ее предыдущими аналогами, показано повышение производительности на 10–15%.

**Ключевые слова.** Электроэрозионная обработка; копировально-прошивочный станок; электрод инструмент; генератор импульсов.

### ВВЕДЕНИЕ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) получила широкое распространение благодаря своим возможностям формообразования деталей из труднообрабатываемых сплавов. В настоящее время научные вызовы в области ЭЭО включают вопросы моделирования, микроминиатюризации, исследования новых диэлектрических технологических сред, разработки высокоэффективных систем управления процессом [1].

Процесс электроэрозионной обработки представляет собой разрушение металла или иного токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между двумя электродами, один из которых является обрабатываемой деталью, а другой – электродом-инструментом. Под воздействием высоких температур в зоне разряда происходит нагрев, расплавление и частичное испарение металла. Существует ряд разновидностей электроэрозионной обработки: проволочная вырезка, копирование, фрезерование, прошивка отверстий, легирование. ЭЭО применяется при изготовлении большого количества классов деталей: матриц штампов, полостей пресс-форм и литейных форм, фильер деталей машин, твердосплавных профилированных резцов и других.

Электроэрозионная обработка незаменима в тех случаях, когда требуется обработать углубления сложной формы. Например, ЭЭО применяется для перфорации лопаток газотурбинных двигателей (ГТД), причем в одной лопатке мо-

жет насчитываться до 400 охлаждающих отверстий. В связи со значительным объемом производства лопаток ГТД, возникает актуальная задача обеспечения высокопроизводительной обработки отверстий малых диаметров с требуемым высоким качеством. Задача обработки отверстий усложняется тем, что они расположены под острыми углами к обрабатываемой поверхности и достигают глубин до 20 диаметров. Так как в настоящее время более 50 % электроэрозионных станков на моторостроительных предприятиях занято на операциях перфорации отверстий малого диаметра, то повышение производительности следует проводить за счет разработки современных систем управления такими станками [2].

Целью данной работы является разработка системы автоматического управления копировально-прошивочным электроэрозионным станком, обеспечивающей повышение производительности перфорации группы отверстий малого диаметра в деталях из титановых и жаропрочных сплавов.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНОГО СТАНКА

Электроэрозионный копировально-прошивочный станок (рис. 1) состоит из следующих типовых элементов: станины с рабочей ванной, в которой закреплен стол для установки детали-электрода, электрода-инструмента (ЭИ), кон-

троллера сервопривода подачи, источника питания – генератора импульсов (ГИ), системы прокачки диэлектрической жидкости, состоящей из насосов, фильтров и бака.

Генератор импульсов является источником питания станка, преобразующим переменный ток промышленной частоты в импульсный с заданными параметрами. Контроллер сервопривода подачи изменяет положение электрода-инструмента с целью поддержания заданного значения межэлектродного промежутка (МЭП). Система прокачки служит для контроля расхода и фильтрации рабочей жидкости, подаваемой в рабочую зону с целью облегчения эвакуации продуктов эрозии из зоны МЭП и ее охлаждения.

К параметрам ГИ предъявляются жесткие требования, так как характеристики силовых импульсов определяют технологические показатели процесса ЭО. К основным параметрам импульсов напряжения (тока) относятся: форма импульса, его длительность ( $t_n$ ), длительность паузы ( $t_p$ ), амплитуда, частота следования ( $f = 1/T$ ), скважность, параметры пакетного режима следования импульсов – длительности пакета и паузы. Импульсы характеризуются также крутизной переднего и заднего фронтов, максимальным и средним значениями тока и напряжения, максимальной и средней мощностью и энергией импульса. На рис. 2 представлены формы наиболее часто применяемых импульсов напряжения, вырабатываемых генераторами серии ШГИ: идеальные прямоугольные импульсы, прямоугольные импульсы вместе с

поджигающими, импульсы, идущие в пакетном режиме, «гребенчатые» импульсы.

Не все импульсы генератора, поступившие в межэлектродный промежуток, производят полезный съем материала. По принципу прохождения импульсов через межэлектродный промежуток их делят на холостые, рабочие, короткозамкнутые и фиктивные (рис. 3). Импульсы считаются холостыми (рис. 3, а), когда импульс на промежутке не реализован, т.е. импульс напряжения есть, но разряд по каким-то причинам не произошел, и тока нет. Холостые импульсы возникают, когда электрод-инструмент и деталь разведены на расстояние, не достаточное для возникновения пробоя диэлектрика. Рабочие импульсы (рис. 3, б) характеризуются наличием, как импульсов напряжения, так и импульсов тока. При прохождении рабочих импульсов происходит полезный эрозионный съем материала. Короткозамкнутые импульсы (рис. 3, в) характеризуются практически полным отсутствием импульса напряжения на МЭП и наличием импульса тока. При прохождении короткозамкнутых импульсов через МЭП полезный эрозионный съем материала не происходит. Короткозамкнутые импульсы ухудшают качество поверхности обрабатываемой детали и повышают износ электрода-инструмента. Фиктивные импульсы (рис. 3, г) наблюдаются, когда разряд проходит через отложившиеся в межэлектродном промежутке частицы, выплавленные предыдущими импульсами. Фиктивный импульс не производит полезный эрозионный съем материала [3].

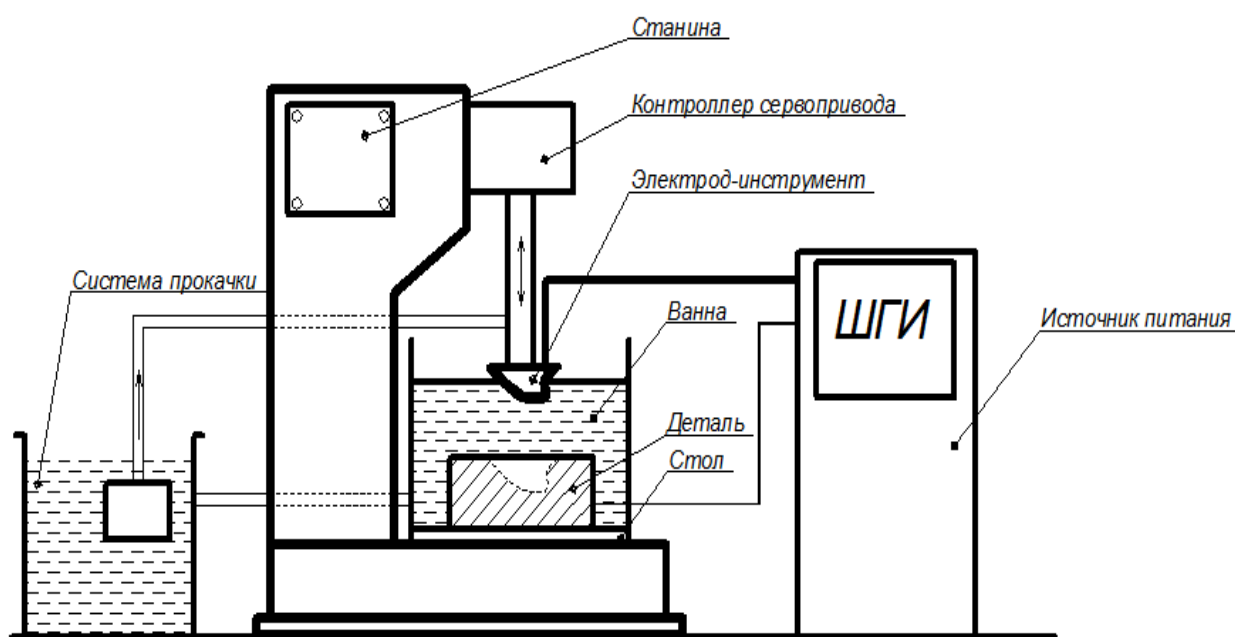
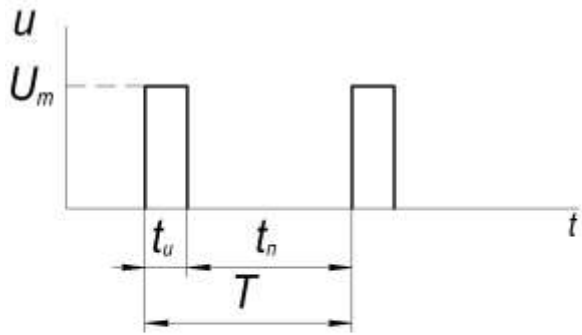
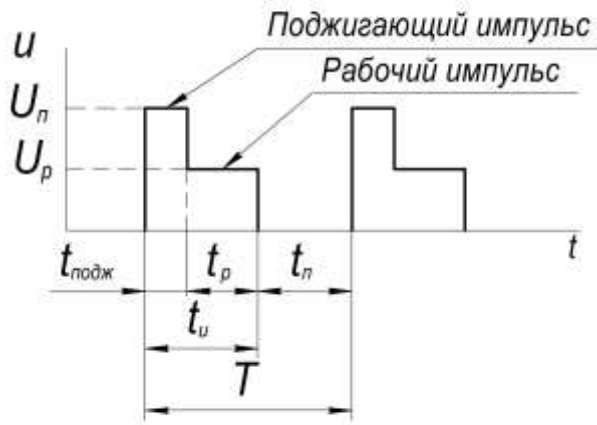


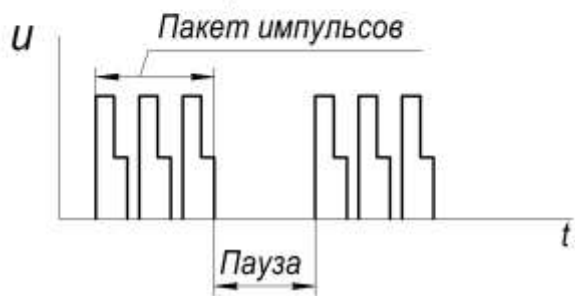
Рис. 1. Конструкция электроэрозионного копировально-прошивочного станка



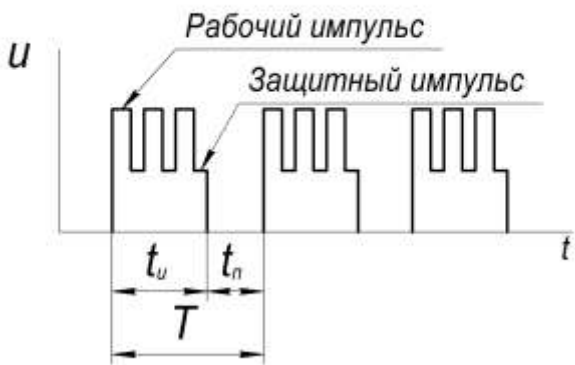
а)



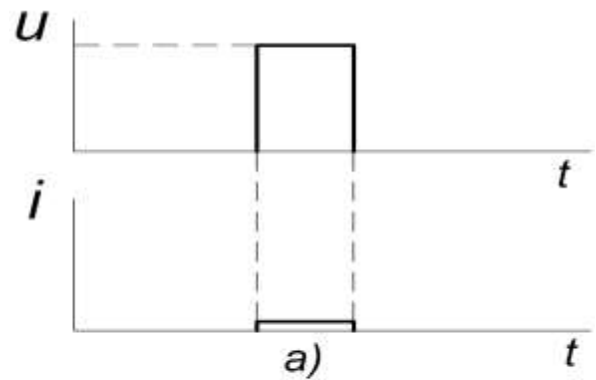
б)



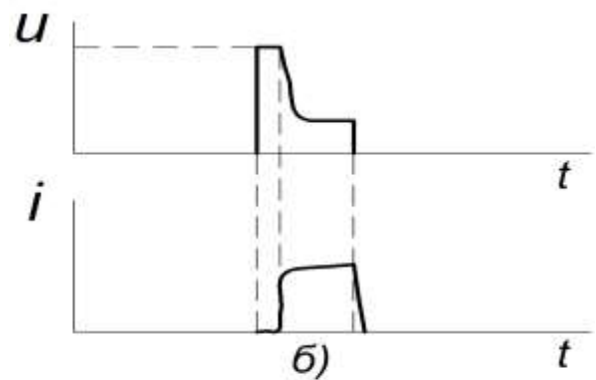
в)



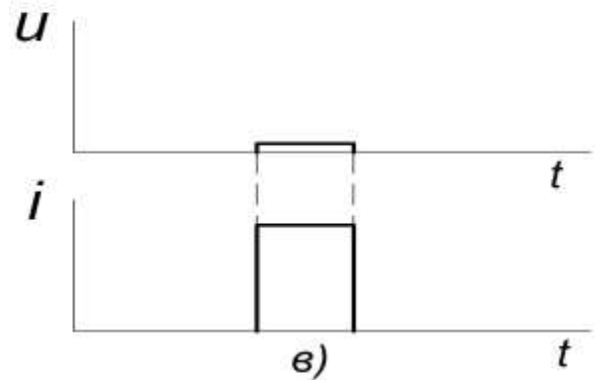
г)



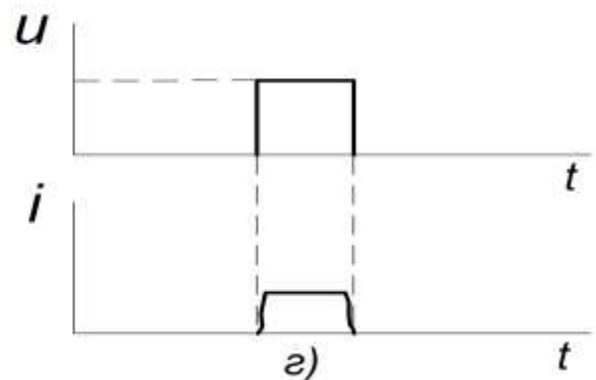
а)



б)



в)



г)

**Рис. 2.** Форма и параметры разрядных импульсов ГИ:

- а – идеальные прямоугольные импульсы;
- б – прямоугольные импульсы вместе с поджигающими;
- в – импульсы, идущие в пакетном режиме;
- г – «гребенчатые» импульсы

**Рис. 3.** Разновидности разрядных импульсов:

- а – холостые;
- б – рабочие;
- в – короткозамкнутые;
- г – фиктивные

### СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОПИРОВАЛЬНО-ПРОШИВОЧНЫМ СТАНКОМ

Протекание процесса электроэрозионной обработки (ЭЭО) довольно подробно изучено [4, 5], установлено наибольшее влияние режимов работы контроллера сервопривода подачи, системы прокачки и генератора импульсов на выходные характеристики процесса: производительность съема материала, точность обработки, качество обработанной поверхности и износ электрода-инструмента. Следовательно, система автоматического управления процессом ЭЭО может быть построена с использованием трех контуров управления: генератором импульсов, сервоприводом и системой прокачки рабочей жидкости. На рис. 4 представлена схема предлагаемой цифровой системы автоматического управления копировально-прошивочным станком для электроэрозионной обработки.

Оператор задает требуемые технологические параметры процесса, а именно: средний рабочий ток, среднее значение напряжения и глубину обработки. Цифровой ПИД-регулятор принимает на свои входы сигналы рассогласования заданных параметров  $\varepsilon$  и подсчитанное значение коэффициента использования импульсов генератора  $\eta$ . Для достижения желаемых параметров процесса ПИД-регулятор выдает управляющие воздействия на генератор импульсов, контроллер сервопривода и систему прокачки рабочей жидкости. Данная система управления является замкнутой. В качестве датчика обратной связи по координате  $z$  положения

электрода-инструмента используется датчик положения, совмещенный в одном корпусе с контроллером сервопривода. В качестве датчика тока через межэлектродный промежуток использован датчик на основе эффекта Холла. В качестве датчика напряжения на межэлектродном промежутке используется блок нормирующего усилителя. Сигналы с датчиков обратной связи по току и напряжения поступают в блок АЦП для их оцифровки и дальнейшего использования в цифровой части системы. Блок анализа импульсов представляет собой электрическую цепь, содержащую микроЭВМ для анализа формы разрядных импульсов, определения времени задержки пробоя, количества дуговых, разрядных, короткозамкнутых импульсов за определенный интервал времени и расчета коэффициента использования импульсов генератора  $\eta$ .

### ОПЫТНЫЙ ОБРАЗЕЦ СИСТЕМЫ

На производственных площадях АО ИНТЦ «Искра» разработан и протестирован копировально-прошивочный электроэрозионный станок, функциональная схема которого приведена на рис. 5. Управление каждым из трех контуров осуществляется микроконтроллером, на котором реализован ПИД-регулятор, в зависимости от текущих значений, поступающих от датчика тока и нормирующего усилителя, согласующего уровни напряжения на МЭП и напряжения питания микроконтроллера.

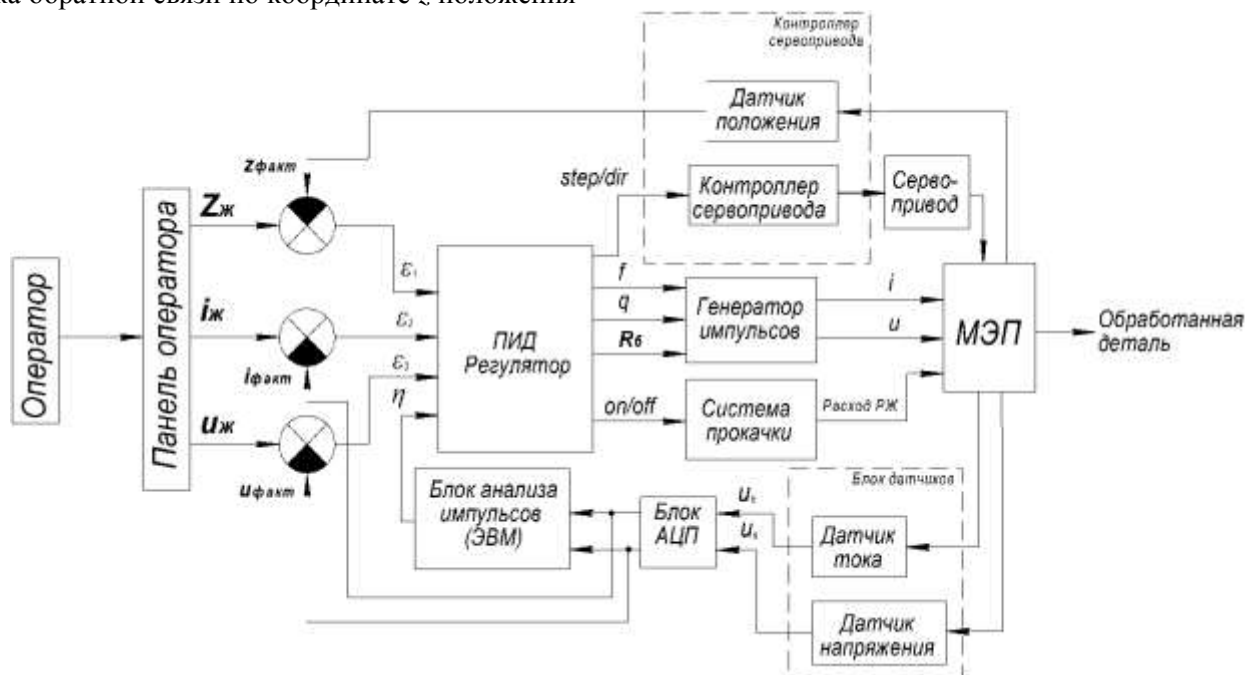


Рис. 4. Структурная схема САУ ТП ЭЭО

Состояние процесса ЭЭО определяется по алгоритму, реализованному в микроконтроллере. Суть алгоритма заключается в цифровой обработке сигналов тока и напряжения, анализ их формы и классификация по типам разрядных импульсов. Расчетными величинами являются: время задержки пробоев (ВЗП), коэффициент использования импульсов генератора:

$$\eta = \frac{K_p}{K_o},$$

где  $K_p$  – количество рабочих импульсов за 1с,  $K_o$  – общее количество выработанных генератором импульсов за 1с.

Для реализации алгоритма управления используется микроконтроллер STM32f303VCT6 (STMicroelectronics), имеющий 32-разрядную архитектуру и тактовую частоту 72 МГц. Микроконтроллер поддерживает встроенные функции цифровой обработки сигналов, что создает задел для перспективного развития системы управления. Для установки требуемых технологических параметров обработки и отображения их текущих значений используется операторская панель «MT3070A (WEINTEK)». Интерфейс панели оператора представлен на рис. 6.

Микроконтроллер задает следующие параметры ГИ: сила тока, частота, скважность и амплитудное значение разрядных импульсов, а также длительность пакета и паузы между группами импульсов. Опорные импульсы генератора формируются таймером микроконтроллера. Параметры ГИ, как правило, в ходе обработки не изменяются.

Управление сервоприводом происходит для поддержания оптимальной величины межэлектродного промежутка для обеспечения максимального значения коэффициента эффективности использования импульсов и, как следствие, высокой производительности процесса. Для его расчета определяется время задержки пробоя

(ВЗП) – равное разнице во времени между поступлением импульса напряжения и моментом пробоя МЭП. ВЗП характеризует эффективность процесса ЭЭО, с его уменьшением увеличивается коэффициент использования импульсов и рабочий ток. Однако если это время снижается ниже некоторого минимального значения, амплитуда напряжения начинает уменьшаться из-за увеличения проводимости МЭП, что свидетельствует о его аномальном состоянии. ВЗП является функцией времени паузы между разрядами, загрязненности МЭП, скорости рабочей жидкости, скорости подачи и носит вероятностный характер. На рис. 7 приведены осциллограммы тока и напряжения при возникновении пробоя МЭП. Как видно из рисунка, для группы пробойных импульсов ВЗП не является постоянной величиной.

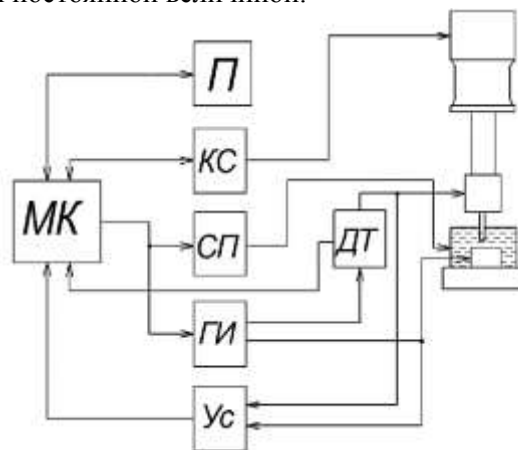


Рис. 5. Функциональная схема электроэрозионного станка:

МК – микроконтроллер, П – панель оператора, КС – контроллер сервопривода, СП – система прокачки, ГИ – генератор импульсов, Ус – нормирующий усилитель, ДТ – датчик тока

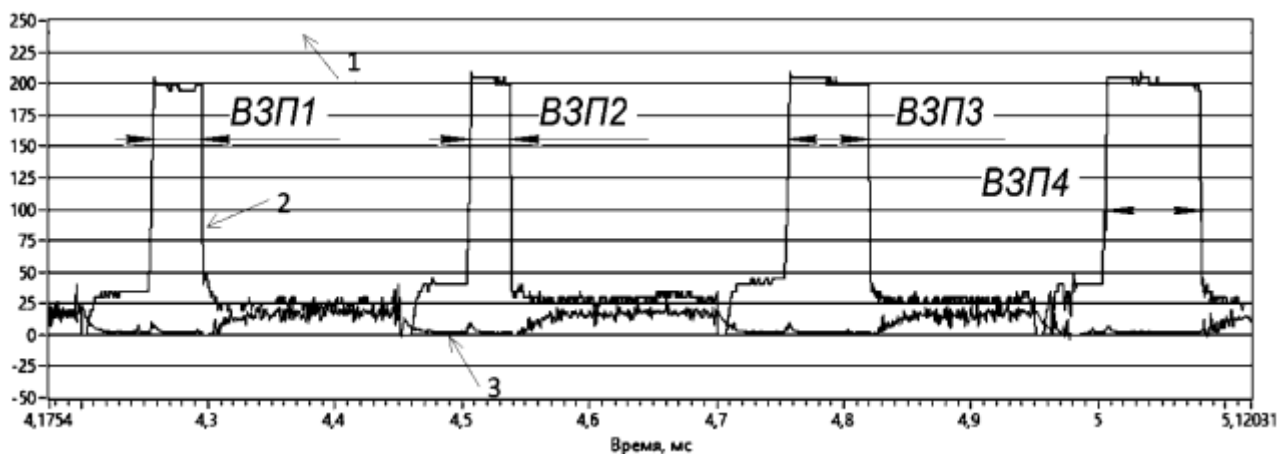


а



б

Рис. 6. Интерфейс панели оператора: а – лицевое окно; б – окно задания технологических параметров



**Рис. 7.** Осциллограммы тока и напряжения при пробойных импульсах:  
1 – опорный сигнал генератора импульсов, 2 – напряжение, 3 – ток

Данный эффект объясняется тем, что на стадии электрического разряда, когда происходит полезный съем металла, протекают процессы разложения рабочей среды, окисления, полимеризации и конденсации углеводородов, накапливаются смолистые и асфальтовые сгустки (шлам), коллоидальный кокс-сажа, различные соли, кислоты, частицы обрабатываемого материала [3]. При ухудшенном удалении продуктов эрозии из МЭП количество короткозамкнутых и фиктивных разрядов резко увеличивается, что может вызвать дугообразование. Фиктивные импульсы, концентрируясь на участке поверхности с большой плотностью продуктов эрозии, приводят к перегреву и повреждению электродов [2].

Управление расходом рабочей жидкости осуществляется путем изменения работы насосов системы прокачки для создания наиболее благоприятных условий для эвакуации продуктов эрозии из межэлектродного промежутка. В разработанной программе управления реализованы способы улучшения эвакуации продуктов эрозии из рабочей зоны: за счет управления положением сервопривода – релаксации ЭИ (амплитуда 1–2 мм, частота 0,1–1 Гц) и вибрации ЭИ (амплитуда 50–100 мкм, частота 10–50 Гц).

#### ТЕСТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

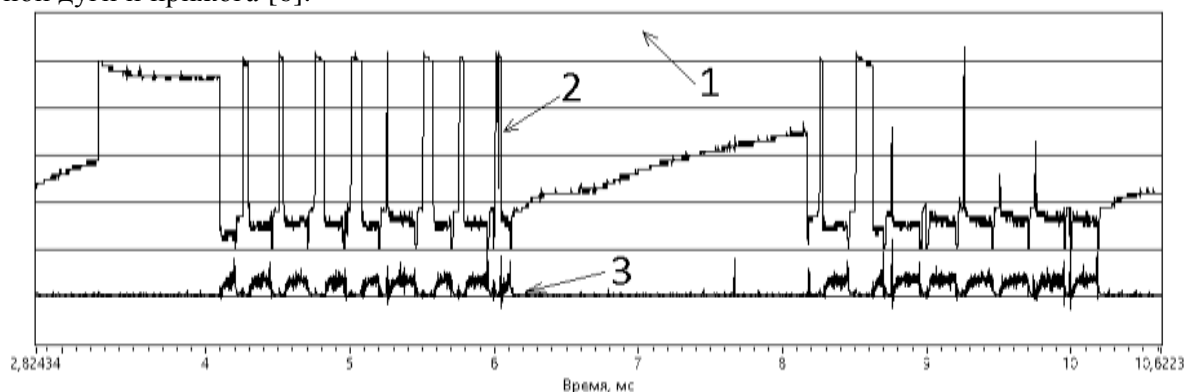
В ходе проведения испытаний разработанной системы управления были получены осциллограммы токов и напряжений во время процесса ЭЭО. На рис. 8 представлена осциллограмма, полученная во время стабильного процесса ЭЭО в самом начале обработки. Как видно из рисунка, импульсы с генератора импульсов шли в пакетном режиме и количество рабочих импуль-

сов за пакет превышало количество холостых импульсов, что свидетельствует о благоприятных условиях протекания процесса вследствие небольшой глубины внедрения. В этих условиях образующиеся частицы вымываются из зоны обработки, и производительность эрозионного процесса любых полостей находится на одном уровне.

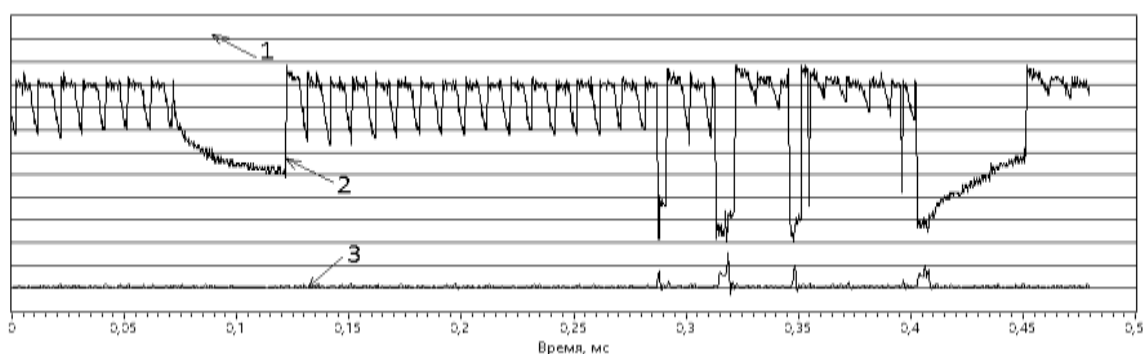
С увеличением глубины внедрения удаление шлама затрудняется. Как правило, электроэрозионное сверление отверстий производится с вертикальной подачей ЭИ сверху вниз и постепенным внедрением в деталь с образованием соответствующего профиля отверстия. Под действием силы тяжести появляющиеся частицы, особенно крупные, спускаются вниз в зону обработки. Так как частицы – это мельчайшие капельки расплавленного и застывшего материала токопроводящих электрода-инструмента и детали, то в зоне МЭП образуется взвесь из таких частиц в рабочей среде.

В результате этого в зоне обработки нарушается электрическая прочность рабочей среды, которой она обладает изначально для локального прохождения электрического разряда с образованием эрозионных лунок на обрабатываемой поверхности. При постепенном загрязнении межэлектродного промежутка в процессе обработки все большая часть энергии электрического разряда, направленная на оплавление материала детали, тратится на разложение присутствующих частиц, и возникают фиктивные разряды. С увеличением глубины количество фиктивных разрядов увеличивается. При этом происходит падение производительности. В итоге на определенной глубине насыщенность частиц достигает таких величин, что процесс электроэрозионной обработки прекращается с образованием ко-

ротких замыканий, возникновением стационарной дуги и прижога [6].



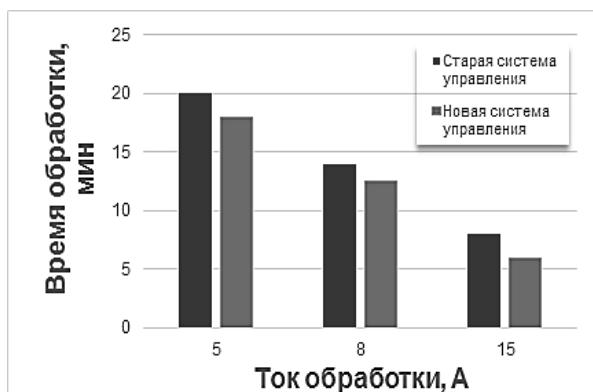
**Рис. 8.** Осциллограммы тока и напряжения при стабильном режиме работы:  
1 – опорный сигнал генератора импульсов; 2 – напряжение; 3 – ток



**Рис. 9.** Осциллограммы тока и напряжения при прижоге:  
1 – опорный сигнал генератора импульсов; 2 – напряжение; 3 – ток

На рис. 9 приведена осциллограмма тока и напряжения при возникновении прижога. Как видно из рисунка, процесс обработки практически остановился, резко снизилось количество рабочих импульсов в пакете и практически все импульсы являются холостыми. Данное состояние системы отслеживается микроконтроллером, который выдает соответствующие сигналы для изменения положения сервопривода и изменения параметров прокатки.

Сравнительные испытания старой и новой системы управления проводились на операции одновременной перфорации множества отверстий в детали-заготовке.



**Рис. 10.** Результаты тестовых испытаний

Деталь представляет собой лопатку из титанового сплава ВТ6. В качестве ЭИ использовалось 10 медных стержней диаметром  $d=0,5$  мм. Требуемая глубина перфорации отверстий составляла  $L=7$  мм. Для достижения наибольшей справедливости эксперимента технологические режимы генератора импульсов для обеих систем управления были выбраны одинаковыми и составили: частота импульсов  $f=8$  кГц, скважность  $q=1,6$ , длительность пакета 1000 мкс, длительность паузы 1000 мкс. На рис. 10 приведены зависимости длительности обработки для обеих систем управления при различных значениях тока обработки, показывающие повышение эффективности ЭЭО на 10–15%.

## ВЫВОДЫ

Таким образом, на основе анализа механизма процесса электроэрозионной обработки предложена структурная схема цифровой трехканальной системы автоматического управления копировально-прошивочным станком. Рассмотрены основные блоки системы и разработан опытный образец системы управления. Проанализированы осциллограммы токов и напряжения для различных состояний процесса ЭЭО,

что позволило по величинам времени задержки пробоя и коэффициента использования импульсов генератора оптимизировать процесс.

Проведены тестовые испытания разработанной системы управления, полученные результаты показали увеличение производительности обработки на 10–15%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abbas N. M., Solomon D. G., Bahari M. F.** A Review on Current Research Trends in Electrical Discharge Machining (EDM) // *Int. J. of Machine Tools & Manufacture*. 2007. Vol. 47. P. 1214–1228.

2. **Ганцев Р. Х.** Оптимизация управления параметрами разрядных импульсов в процессе электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра // *Вестник УГАТУ*. 2008. Т. 10, №2 (27). С. 42–47. [R.H. Gantsev, "Optimization of control parameters the discharge pulses in the electrical discharge machining of small diameter holes," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 10, no. 2 (27), pp. 42–47, 2008. ]

3. **Серебrenицкий П. П.** Современные электроэрозионные технологии и оборудование. СПб.: Лань, 2013. 352 с. [P.P. Srebnitsky, *Modern Electro-technology and equipment*, (in Russian). St. Petersburg.: Lan, 2013]

4. **Kunieda M., Lauwers B., Rajurkar K. P., Schumacher B. M.** Advancing EDM through Fundamental Insights into the Process // *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 54(2). P. 599–622.

5. **Muthuramalingam T., Mohan B.** A Review on Influence of Electric Process Parameters in EDM Process // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 15. P. 87–94.

6. **Макаров В. Ф., Абзаев Р. С., Владыкин А. В.** Оптимизация процесса скоростной электроэрозионной обработки отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. 2014. №2 (32). С. 16–20. [V.F. Makarov, R.S. Abzaev, A.V. Vladikin, Optimization of high-speed electrical discharge machining of small diameter holes in parts of the high-temperature alloys (in Russian), in *High technologies in mechanical engineering*, no. 2(32), pp. 16-20, 2014. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**АДАМОВСКИЙ Владимир Владимирович**, асп. каф. теор. основ электротехн. Маг. в обл. информ.-измерит. техн. (УГАТУ, 2015).

**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. моделирования, диагностики и управления технол. процессами электрообработки.

**ГАНЦЕВ Рустем Халимович**, Директор АО ИНТЦ «Искра». Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1978). Канд. техн. наук по элем. автоматич. устр. (там же, 1987). Иссл. в обл. автоматиз. технол. процессов электрообработки.

#### METADATA

**Title:** Control system for electric discharge machining process.

**Authors:** V.V. Adamovsky<sup>1</sup>, E. V. Parfenov<sup>2</sup>, R.H. Gantsev<sup>3</sup>.

**Affiliation:**

<sup>1,2</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>3</sup> Innovation Scientific Technological Center "ISKRA", Russia.

**Email:** evparfenov@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** *Vestnik UGATU* (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 1 (75), pp. 3-10, 2017. **ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).**

**Abstract:** A structure of the EDM process is presented. Major elements of die-sinking EDM machine are analyzed. A block diagram of an automated EDM control system which has three control channels is proposed. The results of developed control system tests in comparison with its previous generation show performance improvement by 10–15%.

**Key words:** Electrical discharge machining; die-sinking EDM machine; tool electrode; pulse generator.

**About authors:**

**ADAMOVSKY, Vladimir Vladimirovich**, PhD student, Dept. of Theoretical Basis of Electrical Engineering. M.Sc. in Information and Measurement Technologies (UGATU, 2015).

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

**GANTSEV, Rustem Halimovich**, Director of JSC ISTC "Iskra". DI. Eng. in Electromechanics (UAI, 1978). Ph.D. in Engineering (UAI, 1987). Research in the area of automation for electrical technological processes.