

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПОИСКА ЭКСТРЕМУМА ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ ДВУХ ПЕРЕМЕННЫХ

AUTOMATING THE PROCESS OF ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING USING THE METHODS MULTIPARAMETER OPTIMIZATION

**O. Avdeyeva
A. Semenov**

Summary. It is proposed to use the method for searching the extremes of two variables based on the recursive procedure of least squares method, which resulted in not only increased productivity, process stability electroerosive profiling diamond grinding wheels, but also precision machined surfaces.

Keywords: extremal control, an objective function, electro-discharge machining.

Авдеева Ольга Викторовна

*К.т.н., Пензенский государственный университет
rasuma@mail.ru*

Семенов Анатолий Дмитриевич

Д.т.н., доцент, Пензенский государственный университет

Аннотация. Предлагается использовать метод поиска экстремума двух переменных на основе рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов, в результате которого не только повышается производительность, стабильность процесса электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов, но и точность обрабатываемых поверхностей.

Ключевые слова: экстремальное управление, целевая функция, электроэрозионная обработка.

Электроэрозионное профилирование широко применяется в различных отраслях машиностроения. Основные недостатки электроэрозионной обработки — низкая производительность и стабильность [1]. Использование экстремального регулирования при данной обработке позволяет в значительной степени устранить эти недостатки.

Однако применение экстремального регулирования ограничивается стохастическим характером электроэрозионной обработки, особенно это относится к процессу профилирования алмазных кругов. Сложный неоднородный микрорельеф обрабатываемой поверхности, наличие токонепроводящих включений: алмазных зерен, нежелательность их графитизации под действием электрического разряда, высокая точность профилирования предъявляют повышенные требования к системе управления процессом электроэрозионного профилирования и требует использования высокоточных алгоритмов экстремального регулирования, работающих в условиях помех.

Сущность метода электроэрозионного профилирования заключается в следующем (рис. 1). На первом этапе (рис. 1, а) алмазному шлифовальному кругу задается вращение. Затем профилирующий электрод и алмазный шлифовальный круг сводятся до тех пор, пока

не начнутся между ними электрические разряды. После чего не вращающийся профилирующий электрод производит электроэрозионное врезание в алмазный круг. Величина врезания равна глубине профиля фасонного электрода. На втором этапе (рис. 1, б) электроду задается медленная круговая подача и профилирование выполняется за один оборот профилирующего электрода.

Разработка экстремальной системы относится к задачам усовершенствованного управления (*APC-систем — Advanced Process Control & Optimisation*), в основе которых лежат идеи оптимизации управляемых процессов (рис. 2).

Рис. 3. Организационная структура АСУ ТП электроэрозионного профилирования

Анализ методов управления технологическим процессом электроэрозионного профилирования [2] позволил установить, что причиной снижающей производительность, стабильность данного процесса является невысокое значение мощности выделяющейся в межэлектродном зазоре, поскольку значение этой мощности напрямую влияют на эти характеристики. На рис. 3 представлена организационная структура АСУ ТП электроэрозионного профилирования.

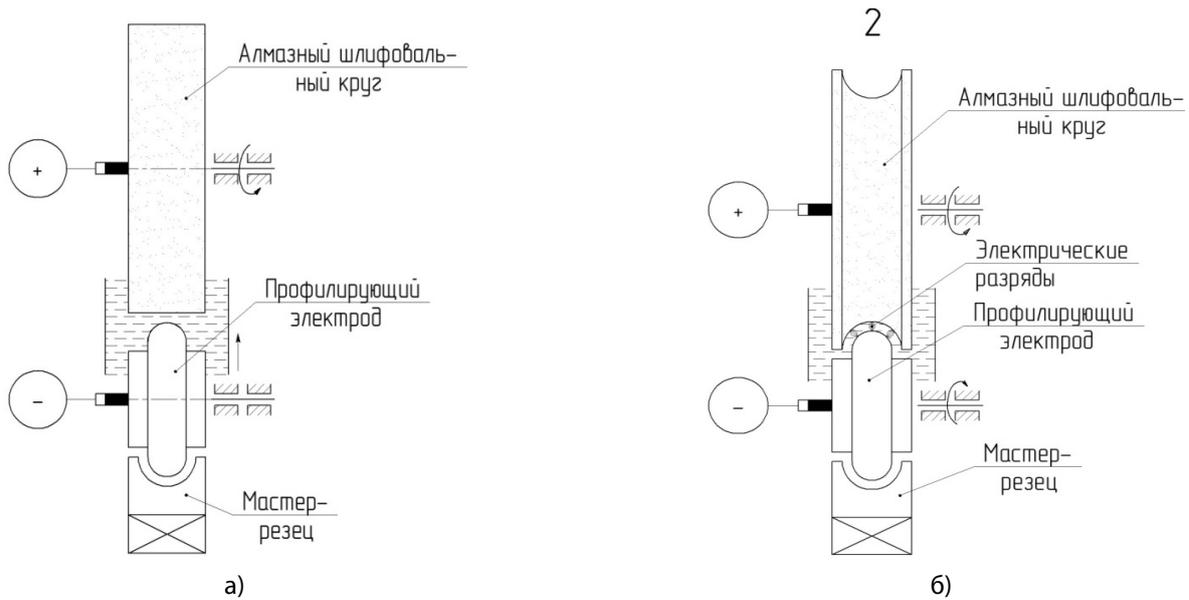


Рис. 1. Метод электроэрозионного профилирования: а) электроэрозионное врезание профилирующего электрода в алмазный круг; б) сообщение круговой подачи профилирующему электроду

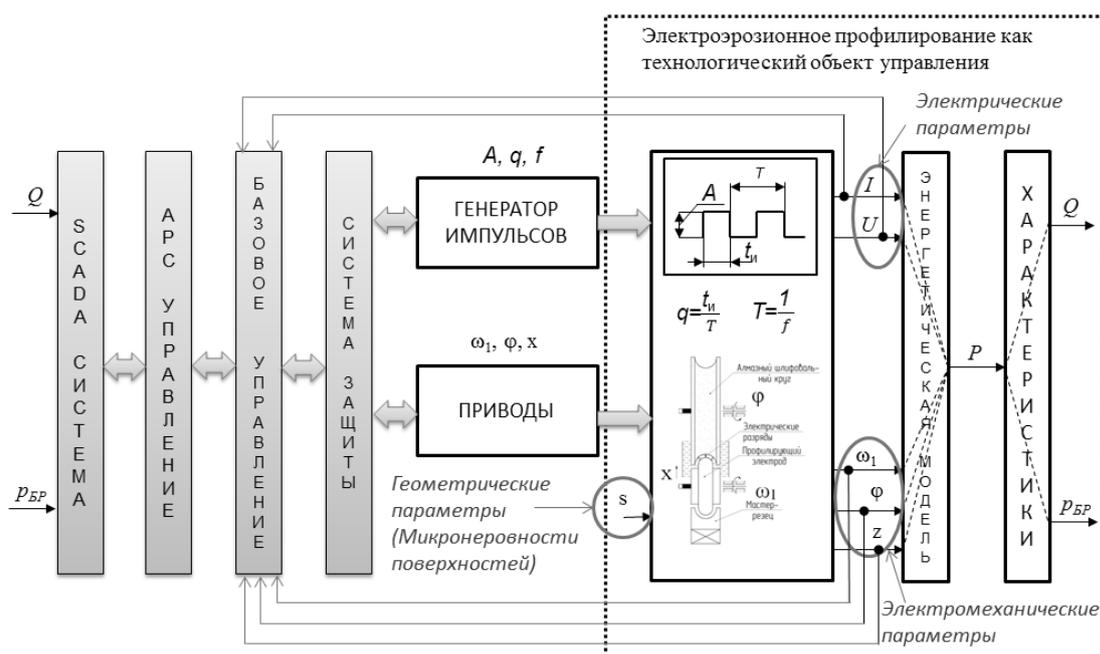


Рис. 2. Место оптимального управления в системе ЧПУ

Основное влияние на мощность, выделяемую в межэлектродном зазоре, оказывают как электрические, так и электромеханические параметры, которые, в свою очередь, напрямую зависят от управляющих параметров процесса электроэрозионного профилирования. Определяющими факторами, влияющие на технологические показатели, является оптимальное поддержание

межэлектродного зазора и амплитуды напряжения генератора импульсов.

Разработку алгоритмов предлагается осуществлять с использованием традиционных систем защиты и базового управления, дополняя их усовершенствованным управлением (APC-управлением) с использованием ме-



APC- Advanced process control (усовершенствованное управление);
 SCADA — Supervisory control and data acquisition (Диспетчерское управление и сбор данных);
 z — межэлектродный зазор; I — ток, выделяемый в межэлектродном зазоре;
 U — напряжение, выделяемое в межэлектродном зазоре;
 ω_1 — скорость вращения электрода инструмента;
 φ — угол поворота алмазного круга; x — линейное перемещение алмазного круга;
 Q — производительность (съем материала); $p_{БП}$ — стабильность процесса

тодов поиска экстремума максимума управляемого параметра (мощности в межэлектродном зазоре), интегрируя их в SCADA — систему.

Организационная структура АСУ ТП электроэрозионного профилирования позволяет разбить обобщённую модель этого процесса на три подмодели:

- ◆ топологическую модель поверхности алмазного круга,
- ◆ электромеханические модели приводов,
- ◆ электрическую модель межэлектродного зазора.

Для построения топологической модели использовались режущие профили рабочей поверхности алмазного круга. Было проведено ее сканирование профилографом-профилометром «Сейтроник». Далее было проведено выделение регулярной и случайной составляющих этого профиля. Выделение регулярной составляющей осуществлялось методом сингулярного разложения [3], а выделение случайной составляющей — методом формирующего фильтра [4].

На рис. 4, а показан фрагмент смоделированной поверхности алмазного круга, на рис. 4, б — фрагмент профиля этой поверхности, непосредственно взаи-

модействующего с профилем электрода-инструмента. В результате моделирования и экспериментальных исследований были получены профили поверхности круга различной зернистости, непосредственно влияющие на значение межэлектродного зазора в процессе электроэрозионной обработки. Результирующий профиль получается в результате многократного наложения большого количества отдельных микропрофилей, имеющих примерно одинаковые масштабы, что удовлетворяет условию центральной предельной теоремы. Исходя из этой теоремы, следует, что результирующий профиль поверхности круга будет подчинен нормальному закону распределения. Что подтвердилось последующей проверкой этой гипотезы по критерию Колмогорова-Смирнова. Очевидно, что максимум мощности будет приходиться на середину предельного зазора, при котором еще возникают электрические разряды: в этом случае вероятности возникновения коротких замыканий и холостых ходов равны, что обеспечивает максимальный коэффициент использования импульсов, а, следовательно, и максимальную мощность, выделяемую в межэлектродный зазор.

Разработана модель электропривода вертикальной подачи профилирующего электрода на основе обобщен-

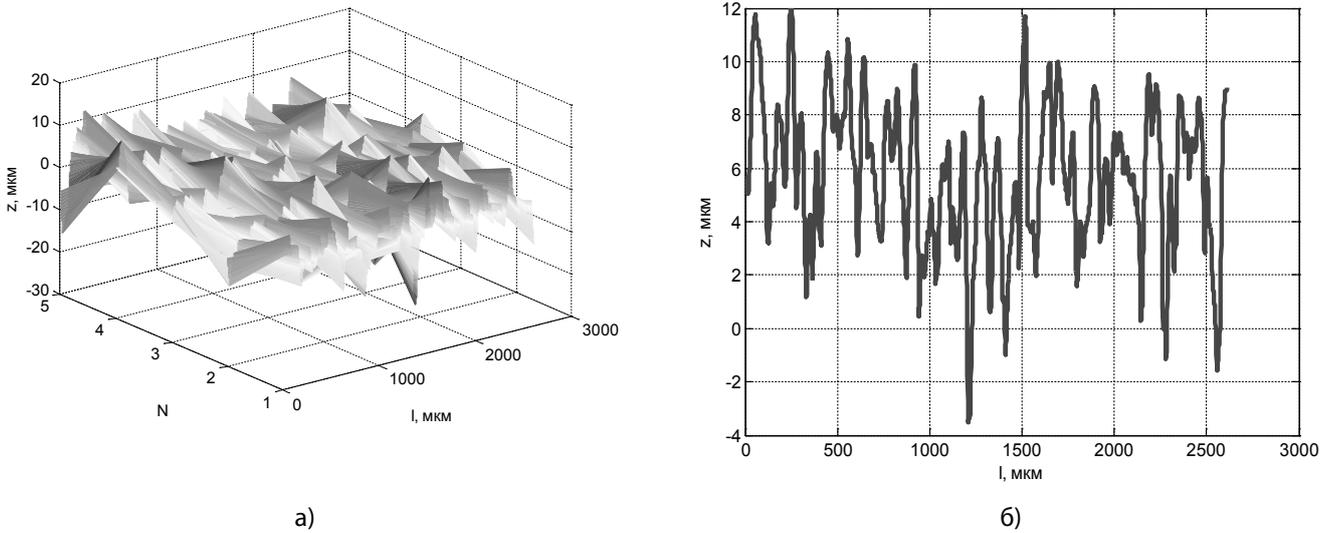


Рис. 4. Фрагмент модели поверхностей алмазного круга (а) и фрагмент профиля модели алмазного круга (б)

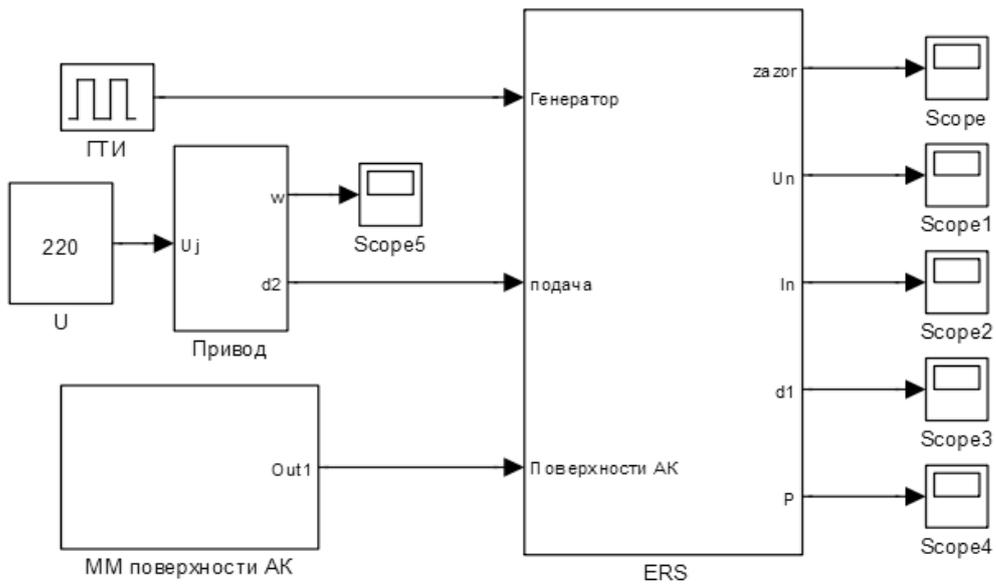


Рис. 5. Структурная схема динамической Simulink-модели процесса электроэрозионного профилирования

щенной теории электрических машин. Механическая часть привода представлена двухмассовой упругодиссипативной моделью.

Параметры электрической схемы замещения межэлектродного зазора определялись исходя из осциллограмм токов и напряжений, экспериментально снятых при разных значениях межэлектродного зазора с последующей их обработкой с помощью пакета System

Identification Tool, входящего в Matlab. В результате этого получены параметры T-образной схемой замещения, учитывающей полное выходное сопротивление генератора рабочих импульсов и межэлектродного зазора.

Найденные значения параметров схемы замещения позволили получить модель, описывающую электрические процессы в межэлектродном зазоре. Разработана обобщенная динамическая модель процесса профили-

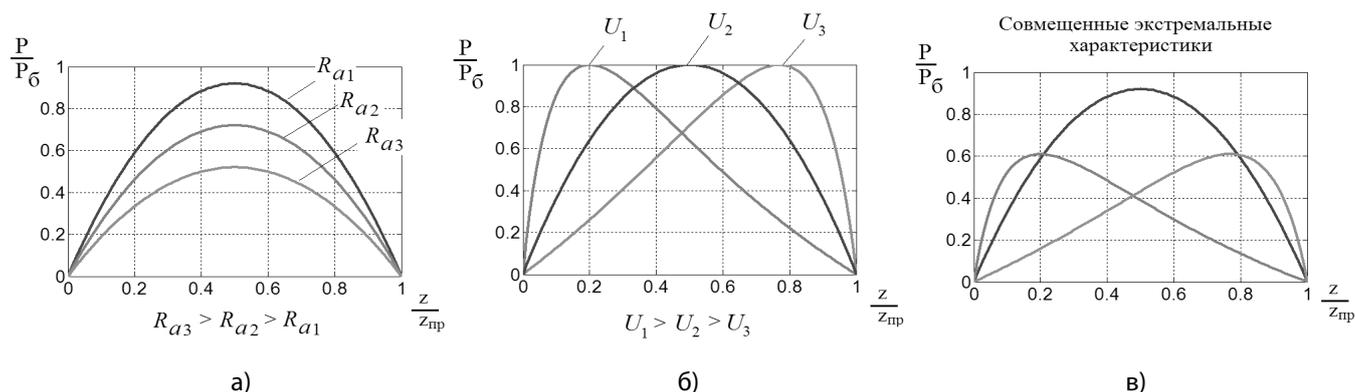


Рис. 6. Смещение экстремальной статической характеристики: характеристика при различных шероховатостях R_a кругов (а); характеристика при различных значениях амплитуды напряжений генератора рабочих импульсов U (б); совмещенная кривая (в)

рования алмазных шлифовальных кругов, учитывающая его электродинамические и технологические особенности, которая включает в себя три модели: топологическую модель, описывающую геометрию поверхности алмазных шлифовальных кругов, построенную на основе сингулярного разложения и метода формирующего фильтра; электромеханическую модель, построенную на основе обобщенной теории электрических машин; электрическую модель, описывающую электрические процессы в межэлектродном зазоре во время процесса электроэрозионного профилирования алмазных шлифовальных кругов.

Структурная схема динамической модели процесса электроэрозионного профилирования (*Simulink*-модель) представлена на рис. 5.

В результате моделирования установлено, что основные характеристики процесса являются экстремальными. Наблюдается дрейф экстремума мощности, как по величине, так и по положению, который в первую очередь зависит от значения межэлектродного зазора [2] и от амплитуды генератора технологических импульсов и его частоты.

Абсолютное значение экстремума достигается при выборе оптимальных значений амплитуды, частоты напряжения генератора импульсов, межэлектродного зазора и требует двух координатного экстремального регулирования по мощности, выделяемой в межэлектродном зазоре (рис. 6).

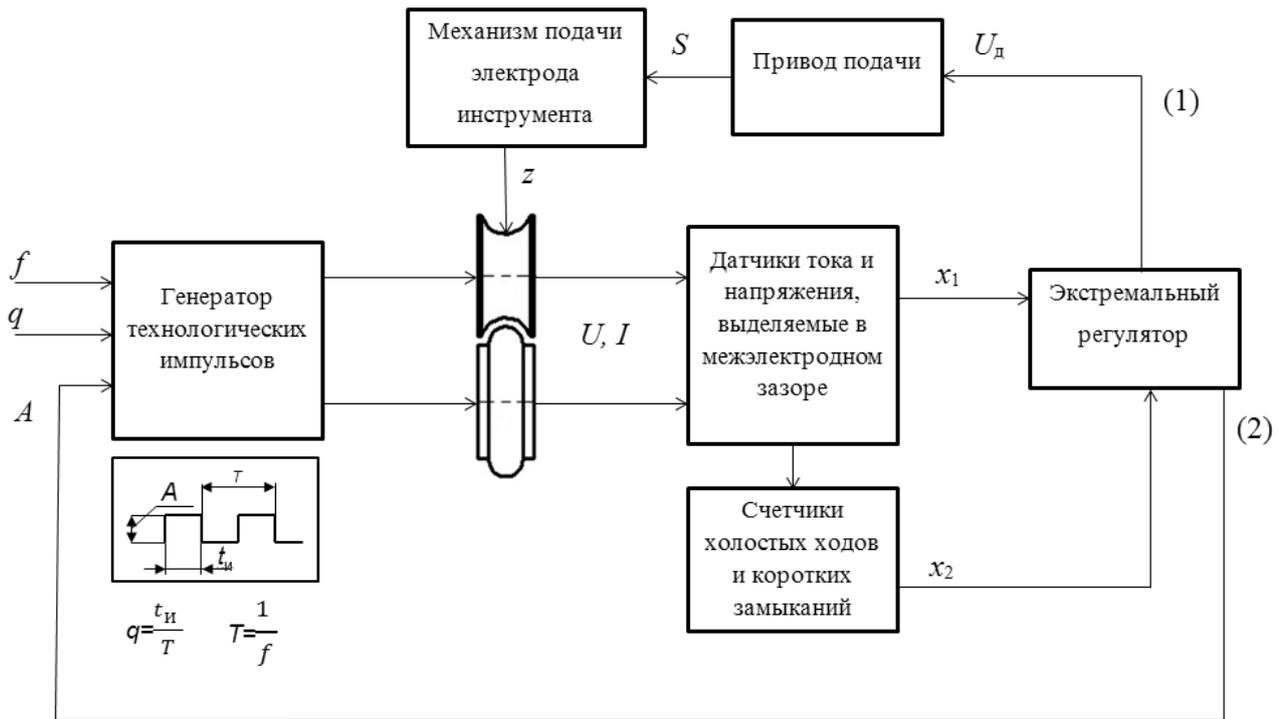
Для совмещения экстремумов необходимо регулировать амплитуду импульсов напряжения генератора рабочих импульсов. Для исследования экстремальной системы управления процессом электроэрозионной обработки разработанная динамическая модель была

аппроксимирована редуцированной инерционной моделью с экстремальной характеристикой. С наибольшей точностью данную модель можно представить моделью типа Гаммерштейна, которая используется при разработке алгоритма поиска экстремума для достижения максимального значения средней мощности, обеспечивающего повышение производительности, стабильности процесса.

Для обеспечения устойчивости системы предлагается использовать рекуррентный алгоритм метода наименьших квадратов, с помощью которого вычисляется коэффициент передачи экстремального объекта по изменению его входной и выходной величины с последующим поиском нулевого значения этого коэффициента. Алгоритм экстремального регулирования состоит из следующих этапов [5]:

- 1) считывание входного и выходного сигналов с экстремального объекта;
- 2) вычисление коэффициентов АРСС-модели по рекуррентному методу наименьших квадратов;
- 3) вычисление коэффициента передачи объекта;
- 4) поиск управляющего воздействия, обеспечивающего нулевое значение коэффициента передачи с использованием прямых методов поиска нуля функций.

В результате моделирования работы алгоритма установлено, что он обеспечивает сходящиеся значения оценки коэффициента передачи, устойчиво удерживая объект в окрестности точки экстремума даже при наличии сильных возмущений. Относительная погрешность в определении коэффициента передачи объекта не превышает 5%, отклонение системы от точки экстремума не более 24% при отношении сигнал/шум, близком к единице. Время поиска экстремума соизмеримо со временем переходного процесса объекта регулирования.



1) контур регулирования межэлектродного зазора
 2) контур регулирования амплитуды напряжения генератора технологических импульсов

Рис. 7. Структура системы с использованием двух координатного управления

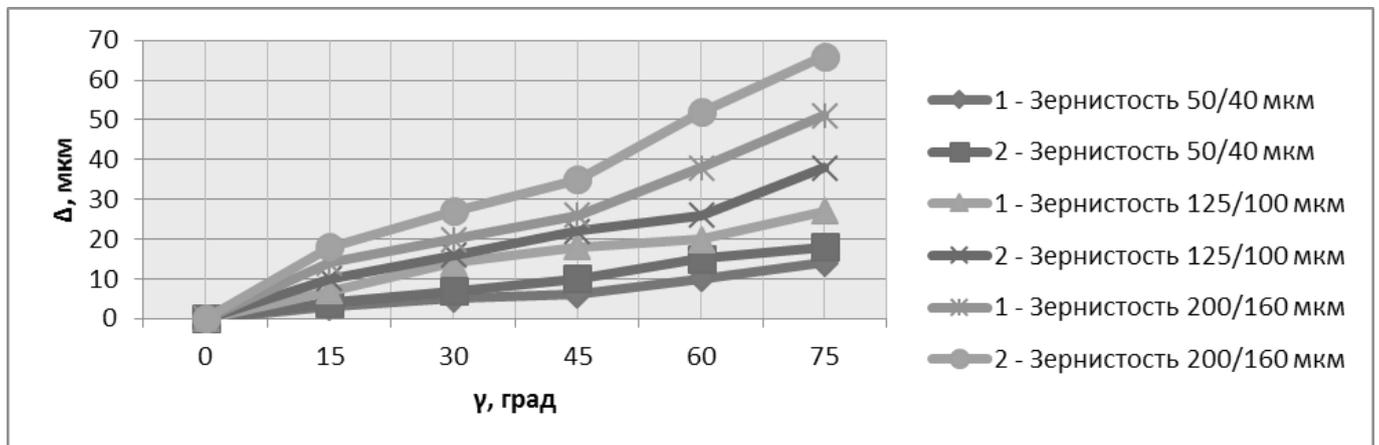


Рис. 8. Зависимость погрешности профилирования алмазных кругов различной зернистости 100% концентрации от угла наклона местной нормали с круговой подачей электрода: 1 — из условия достижения максимальной величины средней мощности; 2 — со средней величиной круговой подачи

Для обеспечения двухкоординатного управления предлагается использовать метод покоординатного подъема (метод Гаусса-Зейделя): это модификация метода градиента с постоянным шагом, позволяющая сократить общий объем вычислений при некотором увеличении числа членов минимизирующей последовательности за счет меньшего количества вычислений. Каждая из ко-

ординат рассчитывается по рекуррентному методу наименьших квадратов. Структура экстремальной системы двух координатного управления представлена на рис. 7.

Экспериментальные исследования проводились на предложенных режимах с круговой подачей профилирующего электрода из условия достижения максимальной

величины средней мощности, выделяемой в межэлектродном промежутке, а также со средним значением круговой подачи. Исследования показали, что профилирование с экстремальным двухкоординтным регулированием обеспечивает повышение точности обработки до 23% (рис. 8).

Так же исследования показали, что стабильность экстремальной системы электроэрозионного профилирования с двухкоординтным управлением возросла на 13%, точность поддержания экстремума — на 15%, производительность возросла на 22%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электроэрозионная обработка изделий авиационно-космической техники / Ю. С. Елисеев, Б. П. Саушкин; под ред. Б. П. Саушкина. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. — 437 с.
2. Авдеева, О. В. Автоматизация процесса электроэрозионной обработки с использованием методов экстремального комбинированного управления / О. В. Авдеева, Д. В. Артамонов, А. Д. Семенов, А. С. Никиткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2013. — № 4 (28). — С. 212–224.
3. Александров Ф. И. Автоматизация выделения трендовых и периодических составляющих временного ряда в рамках метода «Гусеница»-SSA / Ф. И. Александров, Н. Э. Голяндина // Exponenta Pro. Математика в приложениях. — 2004. — вып. 3–4. 54–61 с.
4. Семёнов, А. Д. Идентификация объектов управления. / А. Д. Семёнов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. — Пенза: ПГУ, 2005. — 211 с.
5. Семенов, А. Д. Алгоритм экстремального регулирования на основе рекуррентной процедуры метода наименьших квадратов / А. Д. Семенов, О. В. Авдеева, А. С. Никиткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. — 2012. — № 1. — С. 3–11.

© Авдеева Ольга Викторовна (rasuma@mail.ru), Семенов Анатолий Дмитриевич.

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

