

УДК 621.9.047

В. А. Полетаев, И. С. Сыркин

РАЗРАБОТКА И УПРАВЛЕНИЕ ХОДОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Электроэрозионная обработка (ЭЭО) в машиностроении является одним из наиболее прогрессивных и экономически выгодных процессов. Процесс формирования при ЭЭО осуществляется наиболее прогрессивным методом по сравнению с процессами механической обработки резанием. При ЭЭО инструмент снимает припуск одновременно со всей обрабатываемой поверхности площадью S . В этом случае скорость обработки соответствует линейной скорости снятия припуска v_s , то есть производительность обработки выражается зависимостью $Q = v_s S \text{ мм}^3/\text{мин}$. Кроме этого, ЭЭО позволяет проводить обработку любых электропроводящих материалов независимо от их твердости, формы и расположения обрабатываемых поверхностей, что выгодно отличает ее от механической обработки резанием.

Наряду с большим комплексом положительных технических, технологических и экономических показателей ЭЭО присущи свои области применения и недостатки либо ограничения, обусловленные ее физической природой. Основным недостатком ЭЭО является повышенная энергоемкость по сравнению с обработкой резанием деталей простых форм из обычных конструкционных материалов при тех же производительности и качестве обрабатываемых поверхностей.

ЭЭО экономически выгодно применять при обработке деталей сложной формы, труднообрабатываемых поверхностей методами пластического деформирования и резания. С помощью ЭЭО можно получить поверхности, которые принципиально невозможно изготовить другими методами обработки.

Таким образом, у ЭЭО существует ряд неоспоримых преимуществ, благодаря которым расширяет область своего применения при производстве изделий машиностроения.

Процесс ЭЭО довольно подробно изучен, выявлены влияния различных технологических режимов обработки на точность, шероховатость обрабатываемых поверхностей и производительность ЭЭО [1, 2]. Однако разработка и управление ходом технологического процесса ЭЭО до сих пор недостаточно formalизованы ввиду сложности взаимосвязей технологических параметров.

При разработке технологического процесса (ТП) решается задача определения оптимальных параметров, обеспечивающих минимальные затраты при соблюдении заданных технических условий на деталь. Эта задача в общем случае разделяется на частные: разбиение общего припуска на пооперационные и выбор параметров режима на каждой операции.

Исходными данными для проектирования ТП являются: материал детали, определяющий теплофизические свойства; геометрические характеристики обрабатываемой полости; припуск на обработку; шероховатость R_a обработанной поверхности; допустимая глубина δ измененного слоя; точность обработки (допуски на размер) и допустимый износ инструмента ω инструмента.

При обработке сложнопрофильных полостей ТП в общем случае состоит из следующих операций (или переходов): предварительная, получистовая и окончательная обработка.

Цель предварительной обработки – удаление основной части припуска за минимальное

время при ограничениях, накладываемых износом инструмента.

Цель получистовой обработки – получение заданной точности изготовления и уменьшение высоты неровности поверхности и толщины измененного слоя после предварительной обработки в соответствии с требованиями по шероховатости поверхности, величина которой определяет длительность доводки.

Цель окончательной обработки – получение заданной шероховатости поверхности за минимальное время.

Таким образом, суммарный припуск на ЭЭО составляет:

$$\sum_{j=1}^n z_j = z_1 + z_2 + z_3, \quad (1)$$

где Z_1 – припуск на предварительную обработку, зависящий от геометрии обрабатываемой поверхности; Z_2 – припуск на получистовую обработку, зависящий от параметров точности и шероховатости на предыдущей (предварительной, черновой) обработке, требуемой точности согласно чертежа детали, необходимой величины снятия измененного слоя после предварительной обработки; Z_3 – припуск на окончательную (доводочную) обработку, зависящий от требуемых по чертежу параметров шероховатости и их величин после предыдущей (получистовой) операции.

Необходимость удаления измененного слоя определяется его физико-механическими свойствами, влияющими на эксплуатационные свойства поверхности.

В свою очередь, шероховатость, измененный слой зависит от режимов ЭЭО, износа электродов – инструментов, по-

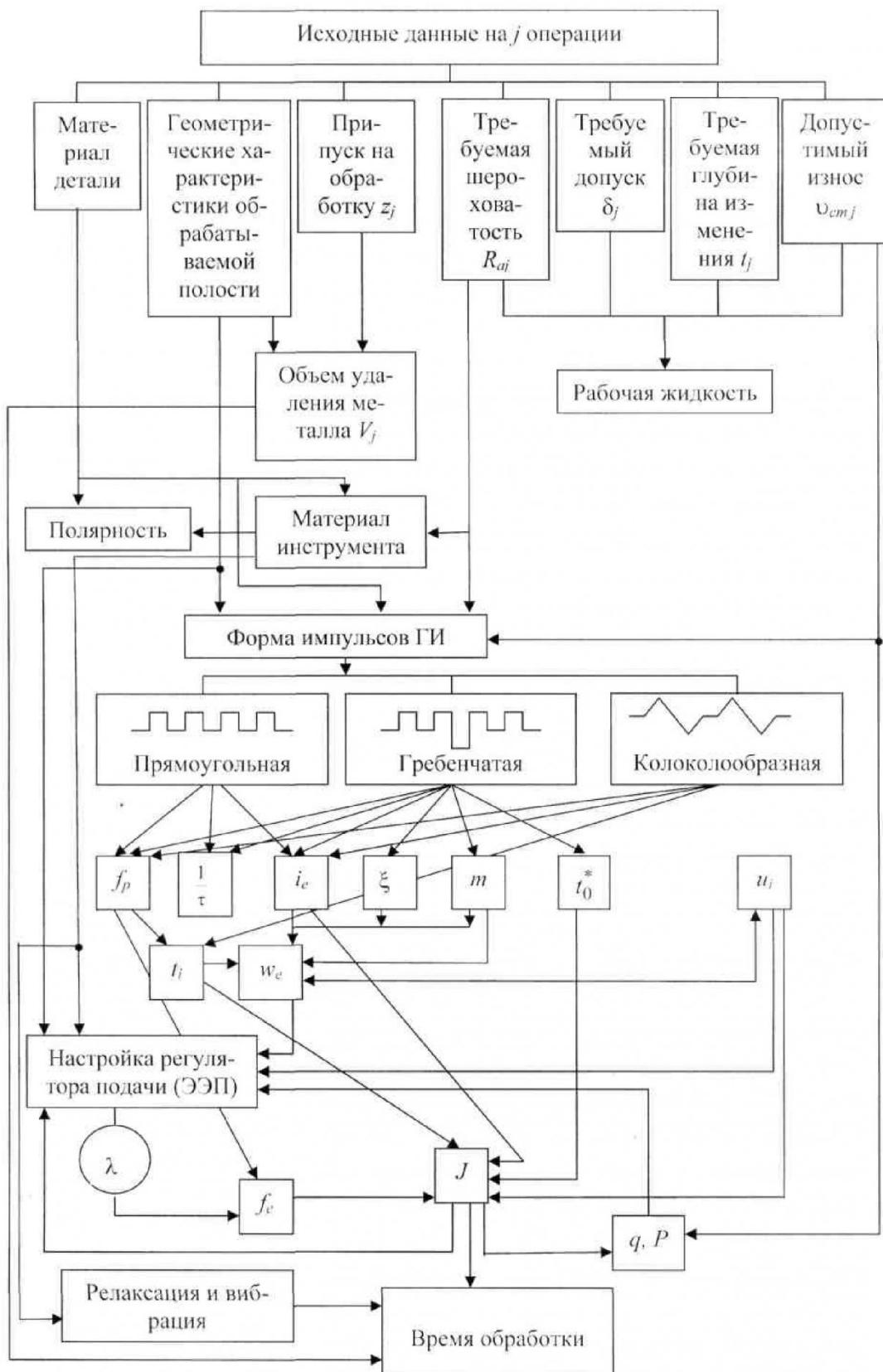


Рис. 1. Схема взаимосвязи исходных данных на j операции с технологическими параметрами ЭЭО

грешностей обработки и других факторов [1, 2]. Поэтому разделение общей задачи на частные является весьма условным по-

шаговым процессом, позволяющим упростить решение общей задачи.

На характер протекания и

результаты процесса ЭЭО оказывают влияние различные факторы: полярность и материал электродов; электрические и

временные параметры подводимых к электродам импульсов напряжения и тока (форма, частота, скваженность, полярность и т.д.); конструктивно-технологические особенности электродов; характеристики рабочей жидкости; характер окружающей среды. В результате многочисленных исследований [1, 2] получены расчетные и экспериментальные зависимости, позволяющие выбрать режимы обработки в зависимости от технологической операции, качества и производительности обработки и спроектировать технологический процесс.

Для разработки последовательности ТП и алгоритмов обработки представим схему взаимосвязи исходных данных с параметрами ЭЭО исходя из теоретико-экспериментальных зависимостей, описывающих процесс ЭЭО [1, 2] в виде следующей схемы (рис. 1), где f_p – частота следования импульсов; $1/t$ – скваженность; i_e – амплитуда импульсов тока; ξ – отношение пьедестала i_{e2} – амплитуде i_{e1} токовых гребней; m – число гребней в каждом импульсе; t_0^* – величина групповой паузы; t_i – амплитуда тока; u_i – амплитуда импульсов напряжения; w_e – энергия импульсов; I – величина среднего рабочего тока; f_e – частота следования разрядов; q , P – расход и давление рабочей жидкости.

Необходимая технологическая схема ЭЭО реализуется в каждом конкретном случае посредством технологической системы СПИД (станок – приспособление – инструмент – деталь) и обеспечивается требуемая взаимосвязь электрического режима с технологическими показателями процесса.

Исходя из приведенной схемы разработка технологического процесса (операции) ЭЭО детали в общем случае осуществляется в следующей последовательности.

1. Разработка маршрута обработки.

- 1.1. Определение количества операций (переходов).

- 1.2. Разбиение общего припуска на обработку на составляющие операционные.

- 1.3. Определение требований к точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей после каждой операции (перехода).

2. Разработка операционного процесса.

- 2.1. Выбор оборудования.

- 2.2. Выбор инструмента-электрода.

- 2.3. Выбор режима обработки:

- выбор формы разрядных импульсов;

- выбор параметров импульсов;

- выбор параметров прокачки рабочей жидкости;

- выбор параметров релаксации и вибрации инструмента;

- определение величины межэлектродного зазора.

- 2.4. определение времени обработки.

На основании приведенной на рис. 1 схемы и последовательности проектирования технологического процесса (операции) разрабатывается общий алгоритм проектирования ТП(0) ЭЭО, состоящий из серии частных алгоритмов для определения припусков на обработку, требуемой точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, выбора оборудования и инструмента, выбора режимов обработки.

Алгоритм определения припусков на обработку определяется исходя из зависимости

$$z_{\min} = (H_a + T_a) + (\rho_a + \varepsilon_a) \quad (2)$$

где z_{\min} – минимальный припуск на выполняемый переход; H_a – высота микронеровностей; T_a – толщина дефектного слоя, оставшегося от предыдущей обработки; ρ_a – суммарное значение пространственных отклонений; ε_a – погрешность установки заготовок при выполненной операции.

Точность ЭЭО определяется факторами, во-первых, свойст-

венными любому методу размерной обработки и, во-вторых, характерными только для ЭЭО. Эти факторы определяют соответствующие первичные погрешности, совокупность которых создает суммарную погрешность [1].

Суммарная погрешность вертикальных размеров при ЭЭО полостей, слагается из первичных погрешностей, вызванных поточностью изготовления ЭИ, отклонениями МЭП от расчетной величины, неточной установки электродов, отклонением формы.

Погрешность горизонтальных размеров слагается из погрешностей, вызванных неточностью изготовления ЭИ и его вибрацией, геометрическими неточностями станка, температурными деформациями системы СПИД, отклонениями зазора от расчетной величины и искажениями конфигурации ЭИ вследствие его износа.

Профиль обработанной поверхности после ЭЭО представляет собой результат "наложения" друг на друга огромного числа лунок. Микрогеометрия обработанной поверхности зависит от условий ЭЭО, в том числе теплофизических свойств материалов ЭЗ, размеров обрабатываемой поверхности, типа рабочей жидкости и др. [2].

При ЭЭО на поверхности детали образуется тонкий слой (так называемый белый слой) обладающий по сравнению с основным материалом рядом отличительных свойств: повышенной (в несколько раз) твердостью, более высокой износостойкостью и др. Непосредственно под белым слоем наблюдается слой металла, претерпевшего только структурные изменения. Глубина измененного слоя зависит от свойств обрабатываемого материала и параметров импульсов [1].

В поверхностном слое детали возможно также возникновение остаточных напряжений, обусловленных тепловыми процессами. Общая картина напря-

женного состояния поверхностного слоя представляет собой результат суммарного воздействия растягивающих (сжимающих) напряжений, которые возникают вследствие кристаллизации и фазовых превращений обрабатываемого материала.

Процесс ЭЭО предполагает объединение в одно целое ГИ, систему автоматического регулирования МЭП и собственно электроэррозионного станка (ЭЭС), который должен обеспечить: требуемое взаимное расположение и закрепление обоих электродов: подключение электродов к ГИ; условия протекания электрических разрядов в рабочей жидкости; требуемое относительное движение электродов. Выбор ЭЭС определяется технологической схемой и режимами обработки. Выбор инструмента зависит от материала обрабатываемой заготовки и требуемой точностью и шероховатостью обработанной поверхности [1, 2].

Выбор режимов обработки зависит от вида обработки, производительности ЭЭО и требуемого качества поверхности. Для их выбора используют номограммы, таблицы и расчетные и экспериментальные зависимости [1, 2].

Величина МЭП устанавливается стадией пробоя для всех процессов после разряда. В итоге данной стадией определяются точность обработки и условия удаления продуктов из МЭП, а значит и производительность. Зазор, в свою очередь, определяется режимом обработки.

Наблюдается четкая тенденция возрастания зазора с увеличением энергии импульса или средней мощности ГИ. Межэлектродные зазора можно определить по интерполяционным моделям, для которых указаны, с учетом ошибки предсказания зазора, пробелы изменения параметров и рекомендуемые области применения [3]. Модель минимального зазора $S_{F\min}$ можно упростить до вида:

$$S_{F\min} = k \sqrt{J/q}, \quad (3)$$

где $J = 4-80 \text{ A}$; $q = 0,2-40 \text{ см}^3/\text{с}$; $k \approx (1,8-3)10^{-3}$ в зависимости от формы импульса.

Объемный расход жидкости, обусловленный самим процессом, составляет при этом для энергии импульсов $W_e = 0,045-1,5 \text{ Дж}$ соответственно $0,12-0,27 \text{ см}^3/\text{с}$.

Поскольку расход жидкости влияет на износ инструмента, величину q определяют из условия допустимого линейного износа инструмента $V_{I\max}$ и проверяется затем по условиям теплообмена в межэлектродной полости и эвакуации частиц.

Расход жидкости, удовлетворяющий допустимому износу инструмента, определим из выражения:

$$q = J^{1/3} \times \\ [(kP/a_2)(\vartheta_{\ell\max} - \vartheta_{\ell0})]^{2/3}, \quad (4)$$

где P – параметр проходного сечения; $\vartheta_{\ell0} = (0,2-1,0) \%$ для электродов сталь⁻ – медь⁺ и $f_p = 8-200 \text{ кГц}$.

Машинное время обработки с учетом времени разведения электродов при релаксации составляет:

$$T_{\text{ маш}} = \sum_{i=1}^N N \Delta_i A_i \frac{1+t_1/t_2}{J_i V_{WJ}}, \quad (5)$$

где N – число режимов обработки; Δ_i – припуск, снимаемый на i -м режиме; t_1 – время разведения электродов при релаксации; t_2 – время работы между двумя последовательными разведениями; V_{WJ} – скорость съема на единицу рабочего тока.

Таким образом, используя схему (рис. 1), последовательность проектирования номограмма, таблицы расчетные и экспериментальные зависимости проектируется общий алгоритм проектирования ТП(0) ЭЭО.

Для обеспечения нормаль-

ного процесса ЭЭО необходимо подвести к электродам импульсы технологического тока с требуемой формой и параметрами, а также ввести в МЭП поток диэлектрической жидкости для удаления продуктов обработки и охлаждения рабочей зоны. Кроме того, необходимо настроить сервопривод на поддержание оптимального размера эрозионного промежутка. В связи с изменением условий обработки как при переходе от одного этапа к другому, так и в пределах одного этапа выходные характеристики ЭЭО будут меняться. Это касается и качества и производительности обработки. Поэтому для достижения заданной (оптимальной) производительности и качества поверхности требуется управлять параметрами ЭЭО [3].

Регулируемые параметры ЭЭО можно разделить на установочные и оперативные. К установочным относятся параметры не подвергающиеся изменению в процессе заданной операции: положение электродов, проводимость рабочей жидкости и способ ее подачи, полярность электродов, форма импульсов, амплитуда поджигающих импульсов напряжения к оперативным, требующим настройки во время обработки в зависимости от условий в рабочей зоне и прямо влияющие на конечные результаты относятся параметры импульсов разрядного тока и параметры пространственного распределения разрядов: время паузы между импульсами, уровень эталонного сигнала и коэффициента усиления сервоусилителя, расход прокачиваемой рабочей жидкости, частота и длительность релаксации.

В связи с этим для повышения эффективности ЭЭО технологическим процессом следует управлять. При переходе с одной операции (перехода) на другую можно использовать СЧПУ, а в процессе реализации операции (перехода) использовать адаптивные системы

управления (САУ), работающие в функции нескольких управляющих сигналов.

Генератор импульсов является основным каналом регулирования режимов обработки, которое осуществляется через изменение параметров единичных импульсов и времени паузы между ними или группами импульсов. Поскольку параметры единичных импульсов определяют шероховатость поверхности и в значительной мере износ инструмента и зазор, целесообразно регулировать рабочий ток путем изменения времени паузы. Регулирование групповой паузы не увеличивает износ ЭИИ и позволяет стабилизировать процесс при более высоких значениях рабочего тока, поскольку степень рассредоточения разрядов и охлаждения поверхностей электродов зависит от абсолютного времени паузы [1, 3].

Регулятор подачи относится также к основному каналу регулирования, которое осуществляется путем поддержания требуемого коэффициента использования импульсов.

Изменением режима работы генератора импульсов устанавливается в первую очередь технологический режим обработки. Регулятор подачи автоматически подстраивает установленный (заданный, оптималь-

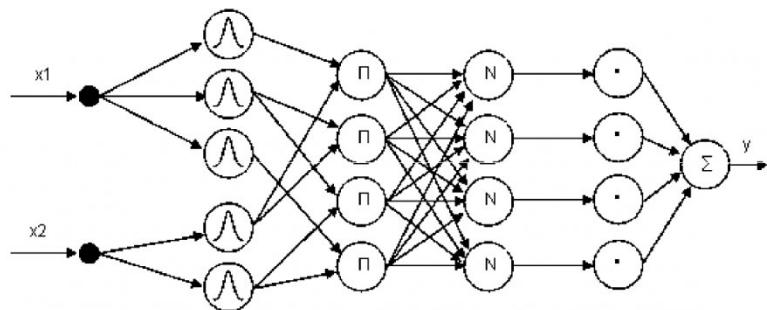


Рис. 2. Пример ANFIS – сети

ный) зазор между электродами. Блок снабжения рабочей жидкости подает ее в межэлектродную полость и ванну станка с регулируемым расходом.

Для управления процессами, математическая модель которых отличается невысокой точностью, либо вообще не может быть построена, используют нечеткие регуляторы. Даные регуляторы создаются на основе базы правил, предоставляемых экспертами. Для ускорения настройки параметров нечеткого регулятора требуется автоматизировать этот процесс. Одним из способов подстройки параметров нечеткого регулятора является применение искусственных нейронных сетей. Для создания системы управления процессом ЭЭ обработки предлагается использовать систему управления, построенную на основе теорий нечетких множеств и нейрон-

ных сетей [3].

В КузГТУ проведены исследования особенностей управления процессом ЭЭ обработки, в результате чего был создан нечерткий регулятор привода подачи электроэропионного станка и промоделирован процесс обработки.

Регулятор создан на основе ПИД-закона. Для улучшения показателей качества регулирования было предложено изменить закон регулирования в соответствии с формулой:

$$u(t)k_p(\varepsilon(t)) \times \left(\varepsilon(t) + \frac{1}{T_I(\varepsilon(t))} \times \int_0^t \varepsilon(t)dt + T_D(\varepsilon(t)) \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right) \quad (6)$$

Для моделирования нелинейных функций $f = \kappa_p(x)$; $f = T_I(x)$; $f = T_D(x)$ были примене-

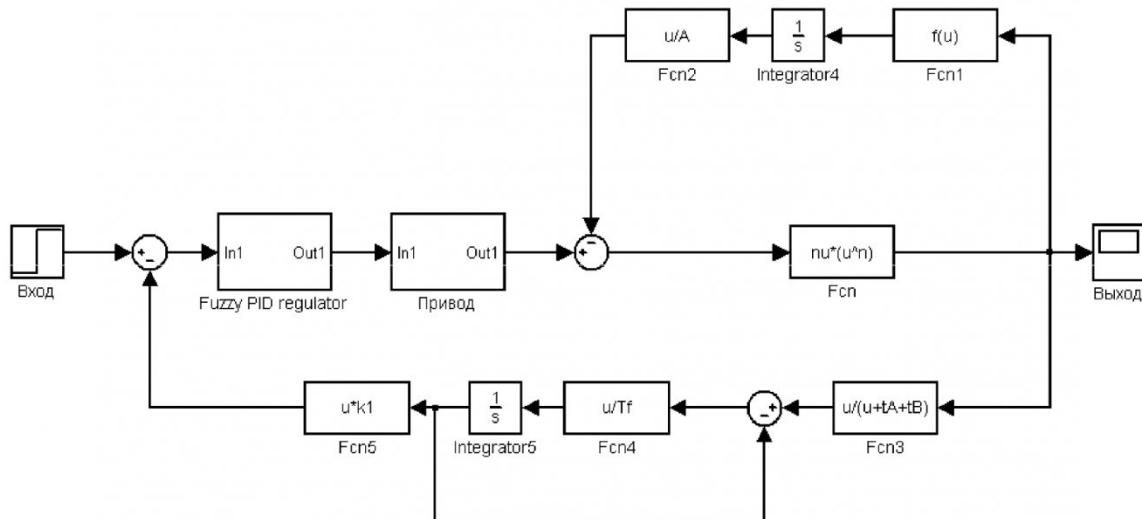


Рис. 3. Модель системы с нечетким ПИД-регулятором, основанном на измерении времени задержки искры (t_d)

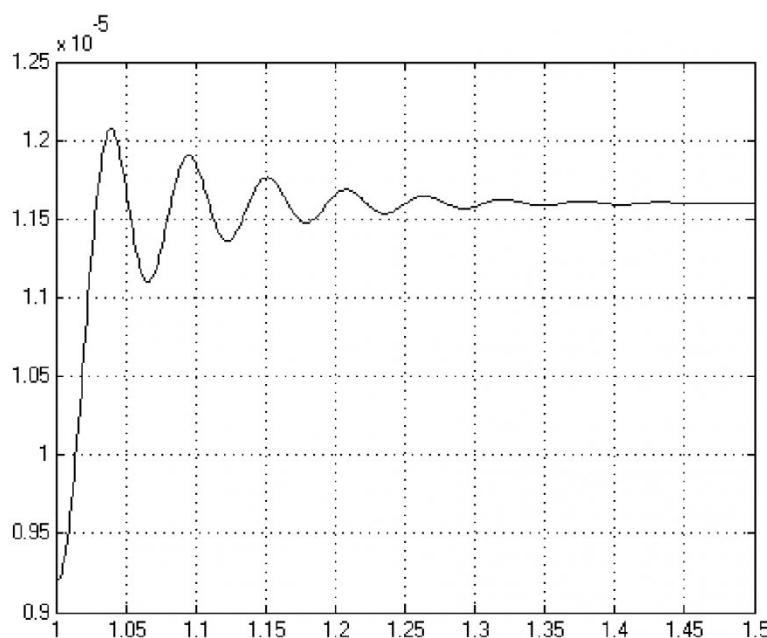


Рис. 4. Переходный процесс с ПИД-регулятором

ны адаптивные нейронные сети нечеткого вывода (AN-FIS) [3]. ANFIS реализует систему нечеткого вывода Сугено в виде пятислойной нейронной сети прямого распространения. Структура ANFIS приведена на рис. 2. Каждый слой этой имеет свое назначение: первый – термы входных переменных, второй – нечеткие правила, третий – нормализация степеней выполнения правил, четвертый – заключения правил, пятый – агрегирование результата, полученного по различным правилам. Обучение сети проводилось методом обратного распространения ошибки.

В проведенных исследованиях были смоделированы системы управления с регуляторами прямого действия и регуляторами, основанными на измерении времени задержки возникновения искры t_d . В качестве привода подачи использовались электромагнитный привод и привод, состоящий из двигателя постоянного тока и передачи "ходовой винт – гайка". Моделирование проводилось в среде MATLAB с применением пакета Simulink. Модели систем управления были основаны на модели процесса ЭЭ обработки, описанной в работе

[4]. Модель системы с регулятором, использующим косвенные критерии, приведена на рис. 3. Моделирование работы системы проводилось при еди-

регуляторе (рис. 5).

Анализируя полученные данные, можно утверждать, что нечеткий ПИД-регулятор обладает лучшими показателями качества регулирования независимо от применяемых типов приводов. Кроме этого отмечено, что нечеткий регулятор, использующий косвенные критерии, обеспечивает апериодический переходный процесс при подаче на вход системы единичного ступенчатого воздействия. Преимущества апериодического переходного процесса при управлении перемещением привода станка заключаются в уменьшении колебаний. Это приводит к уменьшению динамических нагрузок на детали привода, уменьшению знакопеременных нагрузок, приводящих к возникновению усталостных напряжений. Можно сделать вывод, что в данном случае долговечность привода будет наибольшей по сравнению с

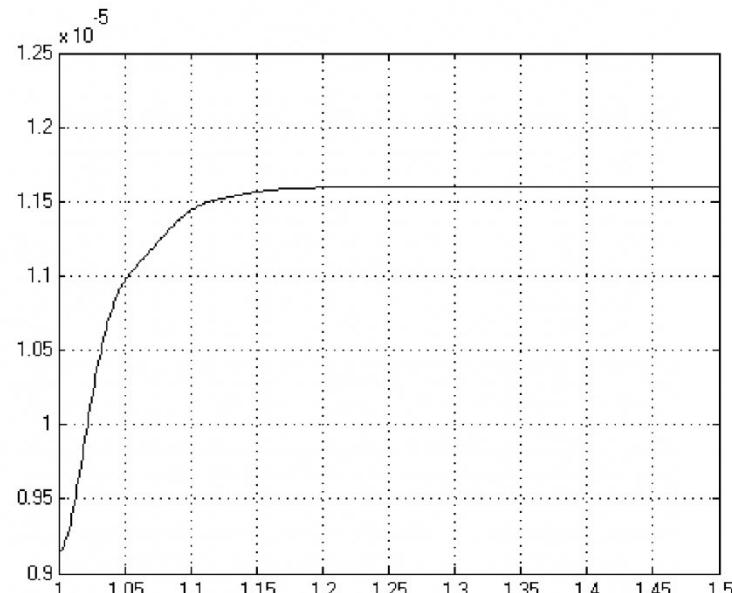


Рис. 5. Переходный процесс с нечетким ПИД-регулятором

ничном ступенчатом задающем воздействии. После проведения имитационных экспериментов были получены следующие результаты: переходный процесс, полученный с контроллером, основанном на ПИД-регуляторе (рис. 4); переходный процесс, полученный с контроллером, основанном на нечетком ПИД-

остальными рассмотренными случаями. Помимо увеличения срока службы привода подачи в течение большего времени межэлектродный зазор оптимальен. Это позволяет улучшить качество обработки, напрямую зависящее от величины межэлектродного зазора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Б. А. Размерная электрическая обработка металлов / Б. А. Артамонов, А. Л. Вишницкий, Ю. С. Волков, А. В. Глазков. – М.: Высш. школа, 1978.– 336 с.
2. Иоффе В. Ф. Автоматизированные электроэррозионные станки / В. Ф. Иоффе, М. В. Коренблум, В. А. Шавырин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1984. – 227 с.
3. Особенности управления процессом электроэррозионной обработки / Полетаев В. А., Сорокин А. В. // Вестн. СГУПСа. – Новосибирск, 2005. – Вып. 11. – С. 56-62.
4. Altpeter F., Cors J., Kocher M., Longchamp R. EDM modeling for control // 12th International Symposium For Electromachining, 1998. – Р. 149-155.
5. Сыркин И. С. О выборе регулятора в системе управления электроэррозионным станком. Научные труды магистрантов и соискателей. – Кемерово: КузГТУ, 2005. – С. 69-74.

Авторы статьи:

Полетаев
Вадим Алексеевич
- докт.техн.наук, проф., зав. каф.
информационных и автоматизиро-
ванных производственных систем

Сыркин
Илья Сергеевич
- аспирант каф.. информационных и
автоматизированных производст-
венных систем

УДК 616-001.3-02:611.853

В.Н. Дроботов, А.Н.Коротков

ПОВРЕЖДАЮЩИЕ ФАКТОРЫ ПРИ ТРАВМИРОВАНИИ КОСТНЫХ ТКАНЕЙ ДИСКОВЫМИ ФРЕЗАМИ

Особое место среди травм дистальных сегментов конечностей занимают тяжелые открытые сочетанные повреждения, которые, как правило, являются следствием нарушения техники безопасности при попадании кисти под циркулярную пилу, дисковую фрезу, спиральное сверло и другие движущиеся части станков. Такие повреждения характеризуются комплексными нарушениями анатомических образований и поэтому отличаются большой тяжестью.

Травму, полученную в результате воздействия на кисть врачающихся частей станков, характеризует наличие множественных рвано-лоскунтых ран, сопровождающихся скальпированием, скелетированием фаланг и пястных костей. При этом сосудисто-нервные пучки и сухожилия, попадая в механизм станка, наматываются на него, вытягиваются и оказываются поврежденными на значительном протяжении от краев кожной раны. В этих случаях сухожилия могут отрываться от места прикрепления к мышце, а

мощная тракция сосудисто-нервных пучков приводит к их разрыву и возникновению деструктивных изменений, значительно проксимальнее видимого уровня повреждения.[4,5]

При травме циркулярной пилой или дисковой фрезой возникают линейные раны различной глубины. Ширина раны, следовательно, и распространенность повреждения всех тканей, зависит от размера, ве-

личины развода зубьев фрезы и степени их износа. [1,3]. Кроме действия механического фактора дисковой фрезы на биологические ткани оказывают влияние и повышенная температура в месте контакта фрезы с тканями. Анализ литературы показывает, что сведения, посвященные изучению температурного повреждающего фактора на биологические ткани, практически отсутствуют.

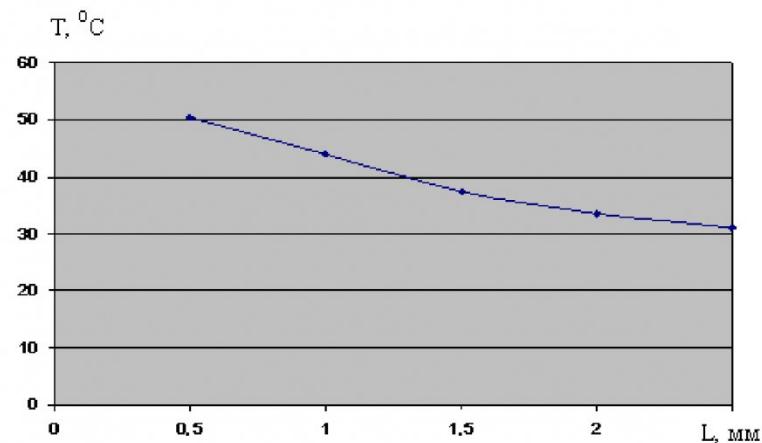


Рис.1. Динамика изменений температуры (T) в диафизарной части пястной кости при травмировании дисковой фрезой в зависимости от расстояния от зоны травмы (L)