

В. М. Давыдов, Д. Д. Якуба, Е. А. Ледков, С. Н. Химухин

АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

Электроискровое легирование (ЭИЛ) является сложным процессом обработки поверхностей изделий. На стабильность ЭИЛ влияет большое количество факторов, например: перегрев анода и катода, нестабильность процесса во времени, человеческий фактор. Но ЭИЛ можно использовать при восстановлении деталей машин, для нанесения покрытий с заданными свойствами (жаростойкость, коррозионная стойкость, сопротивление абразивному износу), в труднодоступных местах, на шельфах, морских судах, в «полевых» условиях. Для стабилизации и исключения влияния человеческого фактора при ЭИЛ стоит задача разработать адаптивную систему управления процессом. *Адаптивная система; электроискровое легирование; синергетика; автоматизация; искусственный интеллект; нейронная сеть; управление процессом; катод; анод; стабильность процесса*

Одной из причин того, что электроискровое легирование до сих пор не автоматизировано, является плохая повторяемость результатов экспериментальных данных, полученных разными исследователями. Это объясняется тем, что существующие методики исследования не позволяют сравнивать научные результаты в виду отсутствия общих оценочных критериев. В большинстве работ [2–6] приводятся данные лишь о режимах обработки и используемых материалах, что не учитывает многопараметричность процесса и существование других параметров, оказывающих существенное влияние на результаты обработки. Это затрудняет возможность автоматизации и объединения уже существующей и вновь получаемой информации в единую базу знаний, на основе которой технологи промышленных предприятий могли бы назначать наиболее целесообразные режимы обработки.

На данный момент не существует завершеного подхода к процессу управления ЭИЛ. Для решения этой задачи необходимо использование новых подходов для исследования, проектирования и широкого внедрения технологии.

Процесс ЭИЛ включает в себя совокупность протекания энергетических, тепловых и газодинамических процессов. Целесообразно при исследовании таких сложных систем пользоваться синергетикой [10, 11].

Синергетика определяет структуру системы как состояние, возникающее в результате многовариантного и неоднозначного поведения, которое не упрощается к стандартному усреднению, а развивается вследствие открытости, притока энергии извне. Такие системы обладают нелинейностью внутренних процессов, по-

явлением особых режимов с обострением и наличием более одного устойчивого состояния.

Самоорганизация может произойти лишь в системах достаточного уровня сложности, обладающих определенным количеством взаимодействующих между собой элементов, имеющих некоторые критические параметры связи и относительно высокие значения вероятностей случайных отклонений. Именно к таким системам можно отнести процесс ЭИЛ.

На данный момент в промышленности наиболее распространены модели, основанные на эмпирических зависимостях выходных параметров процесса ЭИЛ от входных [1–4]. К недостаткам такой модели можно отнести неудовлетворительную точность и отсутствие адекватного отклика на изменяющиеся условия протекания процесса (возмущения) вне заложенного проектировщиком диапазона.

Для ЭИЛ не существует диагностической модели процесса, способной хотя бы частично охватить все многообразие параметров, которые стремятся вывести систему из равновесия.

Для автоматизации процесса ЭИЛ предлагается использовать адаптивную систему на основе нейросетевого моделирования, которая способна моделировать нелинейные многопараметрические процессы, а так же функционировать в условиях «зашумленности» поступающих данных.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ СВЯЗИ ЭИЛ

Автоматизацию ЭИЛ можно реализовать, используя различные технологические параметры системы. В общем случае возможные структурно-параметрические схемы реализации системы адаптивного управления (САДУ) пред-

ставлены на рис. 1. После определения объекта управления выбираются средства управления, т. е. тип управляющего воздействия. Для ЭИЛ – это режим работы генератора тока, который подразумевает под собой величину тока, напряжения, энергию и частоту следования импульсов, а также скорость перемещения узлов станка, определяющих взаимное положение обрабатываемой детали и электрод-инструмента; частоту вибрации или вращения обрабатываемого электрода и др. При ЭИЛ трудно добиться повышения качества покрытия по всем показателям.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ О ПРОТЕКАНИИ ПРОЦЕССА ЭИЛ

Текущую информацию о протекании процесса ЭИЛ получают от ряда датчиков, контролирующих ряд ключевых параметров.

Поэтому необходимо находить оптимальное сочетание значений параметров, ориентируясь на технологическое назначение покрытия. Информация должна поступать непрерывно; информация должна обладать минимальным временем запаздывания; информация должна быстро преобразовываться из аналоговой в цифровую и обратно.

Во время обработки состояние системы оценивается рядом параметров, и образуют вектор ее состояния:

$$N = \begin{pmatrix} N, N_w, aca\{x_a, y_a, z_a, \alpha_a, \beta_a, \gamma_a\}, acc\{x_c, y_c, z_c\}, \\ t\{t_1, t_2, t_3\}, CG\{\rho_1, \rho_2 \dots \rho_m\}, or \\ \{v_x, v_y, v_z, v_\alpha, v_\beta, v_\gamma\}, n, prr, EI, S \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где N – общее число импульсов генератора в единицу времени; N_w – общее число рабочих импульсов генератора в единицу времени; $aca\{x_a, y_a, z_a, \alpha_a, \beta_a, \gamma_a\}$ – координаты, определяющие положение геометрического центра контактной поверхности анода, где x, y, z – линейные координаты, а α, β, γ – угловые координаты; $acc\{x_c, y_c, z_c\}$ – координаты, определяющие положение геометрического центра контактной поверхности катода; $t\{t_1, t_2, t_3\}$ – температуры в трех точках анода; $CG\{\rho_1, \rho_2, \rho_3\}$ – значения концентрации каждого элемента газовой среды; $or\{v_x, v_y, v_z, v_\alpha, v_\beta, v_\gamma\}$ – текущая скорость перемещения анода по каждой из координат; n – текущая частота вращения или вибрации анода; prr – текущая частота следования импульсов; EI – энергия импульса; S – площадь поверхности детали, обрабатываемой в единицу времени.

Основными возмущающими факторами, приводящими к нестабильности процесса ЭИЛ, и как следствие, неравномерности в распределении свойств покрытия по всей площади, являются:

- толщина обрабатываемой детали (при обработке мелкогабаритных деталей или тонкостенных элементов рис. 2, а);
- неоднородность исходной структуры материала обрабатываемой детали и обрабатывающего электрода;
- число импульсов, приходящихся на единицу площади за время обработки (без применения средств автоматизации и контроля эта величина будет различной).

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ

В процессе регулирования воздействие на технологическую систему осуществляется через переменные, к которым относятся: $CG\{\Delta\rho_1, \Delta\rho_2, \dots, \Delta\rho_m\}$ – вектор управления концентрацией каждого элемента газовой среды; $or\{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma\}$ – вектор поправок на скорость перемещения анода; Δn – поправка на частоту вращения или вибрации анода; Δprr – поправка на частоту следования импульсов, задаваемая генератором импульсов; ΔEI – поправка на величину энергии импульса, задаваемая генератором импульсов.

Указанные векторы образуют вектор управления:

$$A = \begin{pmatrix} CG\{\Delta\rho_1, \Delta\rho_2 \dots \Delta\rho_m\}, \\ or\{\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma\}, \\ \Delta n, \Delta prr, \Delta EI \end{pmatrix}. \quad (2)$$

В зависимости от требуемых параметров обработки, технологических возможностей системы, условий протекания процесса, на составляющие векторов N и A накладывают ограничения, которые либо определяют область допустимых значений, либо устанавливают дополнительные зависимости между переменными векторов состояния и управления.

В зависимости от выбранного алгоритма управления регулирование осуществляется по одному из параметров вектора A при постоянстве остальных составляющих вектора или же по нескольким параметрам, связанным определенной закономерностью. Для осуществления регулирования переменные состояния системы и ограничения представляют как функции от переменных управления.

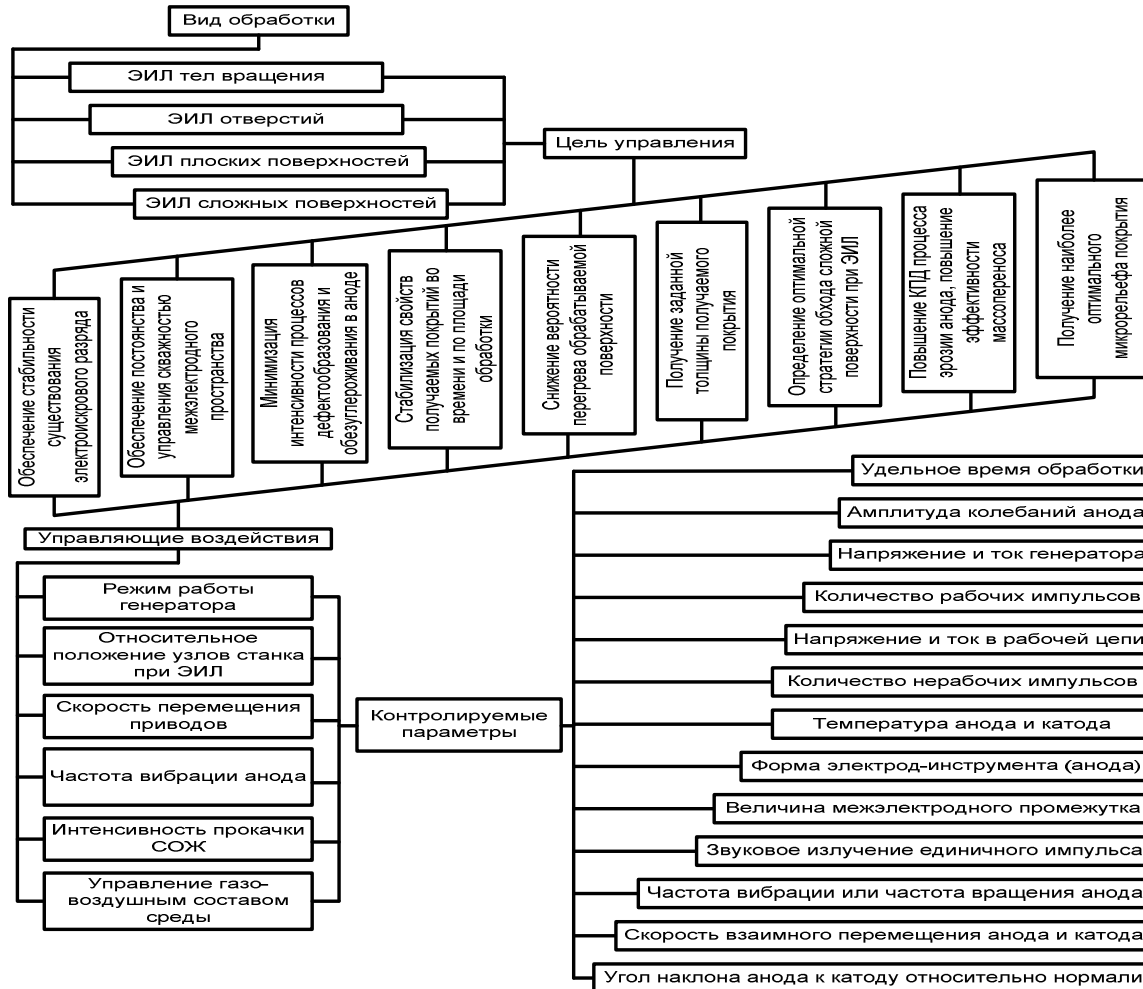


Рис. 1. Структурно-параметрические связи построения САУ ЭИ дестабилизирующие процессы

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Согласно ряду исследований [8–11], наиболее рациональным для автоматизации ЭИЛ является использование нейронных сетей. Подходящей структурой для управления нелинейными технологическими системами обладают многослойные нейронные сети. Система диссипативных процессов, описывающая протекание ЭИЛ представлена на рис. 3. Энергии этих процессов рассматриваются как компоненты системы, а значения тока, напряжения, температур и акустического сигнала являются мерой оценки внутреннего состояния системы. Каждая диссипативная подсистема описывается своим набором свойств и параметров и характеризуется определенным поведением при воздействии на нее извне. Система, представленная на рис. 3, является простой, так как ее состояние оценивается по сумме выходных сигналов каждой подсистемы, но процесс ЭИЛ нельзя разложить на

простые подсистемы, функционирующие отдельно друг от друга. Каждая подсистема тесно взаимосвязана с другими подсистемами.

Это приводит к тому, что результирующие (выходные) параметры системы не являются простой суммой свойств ее отдельных компонентов. При электроискровом легировании существует вероятность возникновения новых свойств, что нельзя предусмотреть, управляя каждой подсистемой отдельно.

ПОСТРОЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Построение нейронной сети происходит в два основных этапа [12]: выбор архитектуры сети и обучение сети. Для управления процессом ЭИЛ разработана нейронная сеть, которая в режиме реального времени отслеживает эффективность и устойчивость протекания процесса и формирует поправочные сигналы в случае возникновения различных отклонений в системе.

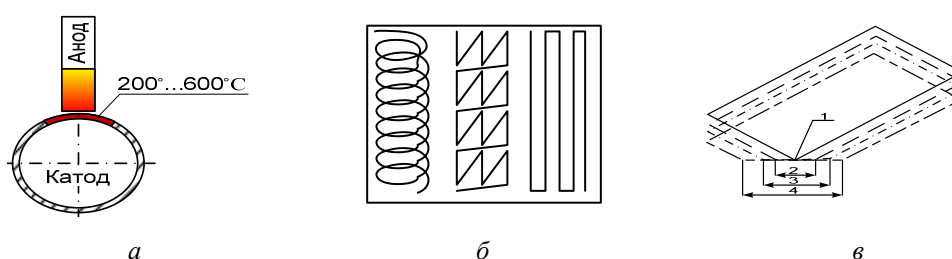


Рис. 2. Иллюстрация отдельных дестабилизирующих процессов:
а – локальный перегрев поверхности при обработке тонкостенной трубы;
б – варианты траектории движения анода при обработке одинаковой площади;
в – схема изменение площади контакта при ЭИЛ (1 – первая минута обработки, 2 – вторая минута и т.д.)

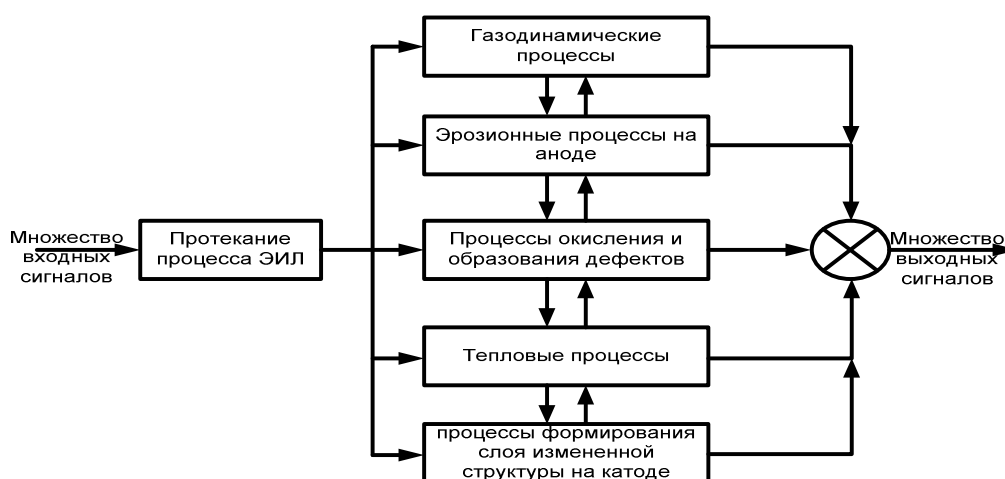


Рис. 3. Схема процесса ЭИЛ в виде системы диссипативных процессов

Оценка текущего состояния процесса осуществляется по степени нагрева анода, затратам энергии и акустическому сигналу от микрофона. Предполагается, что не каждый импульс при ЭИЛ сопровождается переносом материала с анода на катод. Акустический сигнал является свидетельством того, что произошел взрыв контактного мостика, и что импульс был полезен. Степень нагрева анода отражает интенсивность массопереноса, обезуглероживания, дефектообразования и энергозатрат в системе. Суммарный акустический сигнал характеризует интенсивность протекания ЭИЛ и является отображением внутреннего состояния процесса ЭИЛ.

Моделирование процесса сводится к созданию обучающей выборки, включающей в себя общее количество импульсов, количество рабочих импульсов, интегральный звук, а также распределение температуры по длине анода. Совокупность этих сигналов за выбранный промежуток времени характеризует текущую стадию

протекания процесса для единицы площади, а именно – стадии приработки, активного массопереноса и хрупкого разрушения. Кроме того, регистрируемые сигналы позволяют определить шероховатость и толщину получаемого покрытия.

В результате функционирования ИНС происходит обработка входных параметров системы с целью получения оптимального значения выходной величины, в условиях минимального количества априорной информации о характере процесса. Для повышения точности адаптивной системы, реализуемой на базе нейронных сетей, рекомендуется совместное использование ИНС и экспертных систем (баз данных), для дополнительной корректировки точности выходных сигналов. Экспертная система создается на базе уже имеющейся информации о ЭИЛ и постоянно дополняется в процессе совместной работы с ИНС на стадии внедрения новых материалов и технологий.

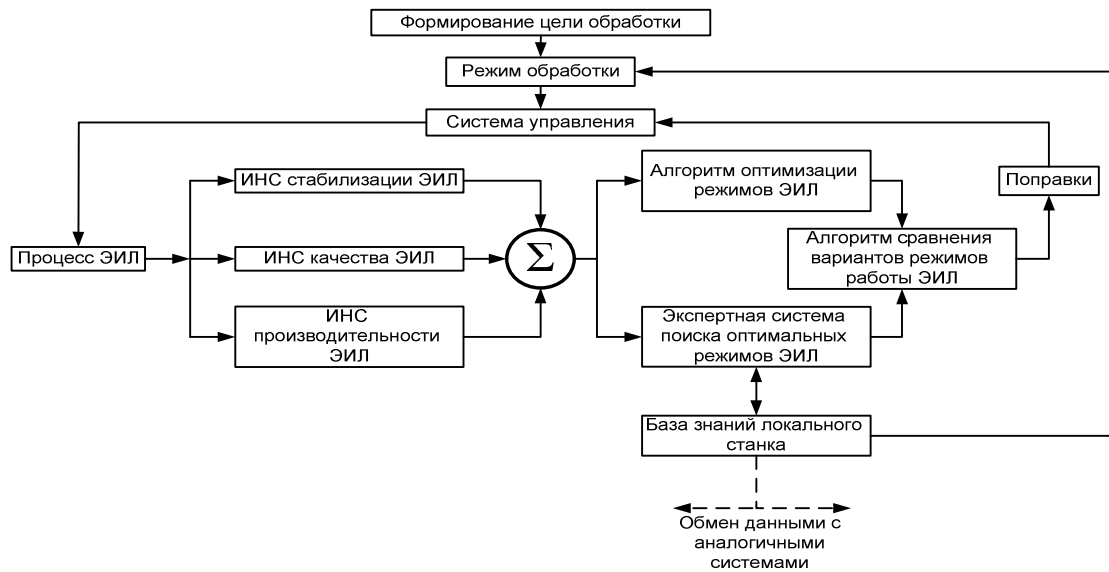


Рис. 4. Структурная схема системы адаптивного управления электроэрозионным станком, построенная на основе принципов искусственного интеллекта

На рис. 4 представлена структурная схема системы управления электроискровым станком с ЧПУ, построенная на основе принципов искусственного интеллекта, которая включает модуль диагностических ИНС, а так же модуль, реализованный в виде алгоритмов оптимизации режимов, позволяющий производить обработку в неизвестных условиях. Также система адаптивного управления располагает экспертной базой данных, роль которой заключается в накоплении и систематизации практического опыта обработки различных материалов для принятия решений о назначении начальных режимов обработки и текущей корректировки протекания процесса. Кроме всего прочего, данная система открыта для свободного обмена данными и может быть элементарной частью более крупной системы, которая объединяет в себе цех или участок.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Процессы импульсной обработки удобно рассматривать в трех масштабах времени: масштаб единичного импульса, масштаб серии импульсов и масштаб технологической операции [9].

Причиной снижения эффективности в масштабе единичного импульса является то, что импульс не совершает полезной работы. Условием возникновения импульса является совпадение по времени появления контакта оптимального сечения и импульса тока генератора,

которое определяется частотой вибрации анода, силой прижатия и частотой следования импульсов. Управляя этими параметрами, можно найти их оптимальное соотношение и обеспечить стабильность ЭИЛ на уровне единичного импульса. Эффективность в масштабе технологической операции, имеет место в случае сохранения баланса между величиной эрозии анода Δm_a и привеса катода Δm_k в течение длительного промежутка времени.

Условие устойчивости в этом случае выглядит следующим образом: $\frac{\Delta m_k}{\Delta m_a} \rightarrow \text{const}$, а в случае повышения эффективности и производительности: $\frac{\Delta m_k}{\Delta m_a} \rightarrow 1$.

Повысить устойчивость можно с помощью различных технологических приемов, например, управляя процессами образования дефектов и напряжений за счет принудительного охлаждения анода, предварительной активации поверхности или управления составом газовой среды межэлектродного промежутка и др.

С точки зрения адаптивного управления ЭИЛ, серия импульсов наиболее перспективна и информативна. Причиной неустойчивости в этом масштабе времени является то, что за одно и то же время количество импульсов, приходящихся на единицу обрабатываемой поверхности различно.

$$\overline{A_0} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} & A_{2n} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} & A_{3n} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} & A_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{m1} & A_{m2} & A_{m3} & A_{m4} & A_{mn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

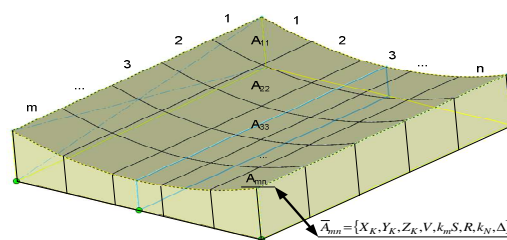


Рис. 5. Двумерный массив и схема представления обрабатываемой поверхности в виде элементарных участков

Можно выделить три вида импульсов: рабочий, в результате которого на поверхности катода формируется слой измененной структуры; импульсы короткого замыкания, характеризующиеся контактом, с такой площадью поперечного сечения, что энергии импульса генератора недостаточно для перегрева и «взрыва» материала в контакте; холостые импульсы, возникающие при несовпадении момента разряда генератора и контакта между анодом и катодом.

Для однозначной регистрации и классификации всех импульсных процессов за время обработки необходимо минимум четырехканальное регистрирующее устройство, фиксирующее данные тока I_i , напряжения U_i и акустические сигналы от микрофона, возникающие в процессе обработки ($I = 1, 2, \dots, n$), а также текущую температуру окружающей среды межэлектродного промежутка. Для создания оптимальных условий формирования покрытия, дополнительно, необходимо минимум три или больше регистрирующих канала. Исходя из этого, была спроектирована система адаптивного управления, основными задачами которой являются:

- созданию условий для максимального повышения эффективности процесса ЭИЛ, при которых серия импульсов состояла бы из максимально большого количества равномерно следующих рабочих импульсов;
- повышение равномерности нанесения покрытия по всей обрабатываемой площади;
- управление процессами дефектообразования, окисления и обезуглероживания, за счет контроля над распределением температур в системе и составом газо-воздушной среды межэлектродного промежутка;
- управление качеством покрытия и его свойствами.

Система адаптивного управления работает на нескольких временных интервалах. В качестве элементов временного ряда использовалось количество полезной энергии, приходящейся на единицу обработанной площади, а также частота

опроса формируемого массива данных нейронной сетью, измеряемая длительностью серии импульсов.

Система адаптивного управления включает в себя: три нейронные сети; блок управления режимом обработки; блок управления составом газо-воздушной среды; блок управления узлами станка; блок слежения за температурой; блок распознавания типа импульса и определения его энергии; блок сравнения выходных данных с заданными.

Работа системы начинается с ввода исходных данных. Под исходными данными понимается следующая информация: трехмерная модель обрабатываемой детали с обозначением поверхностей, предназначенных для обработки ЭИЛ; материал заготовки и ее свойства: теплоемкость (C), теплопроводность (q), теплостойкость (μ), исходная твердость ($НВ$), исходная шероховатость ($R_a, R_k, R_{pk} \dots$ и т. д.); материал обрабатывающего электрода и свойства получаемого покрытия: требуемая толщина (S); твердость ($НВ$); шероховатость по выбранному параметру; допустимая концентрация дефектов в слое; управляющая программа для станка с ЧПУ. Исходная информация формируется технологом на стадии разработки техпроцесса обрабатываемой детали. Оператор станка вводит исходную информацию в систему, где происходит ее первичная обработка в специализированном модуле. Поверхности детали разбивают на элементарные участки одинаковой площади, величина которой определяется оператором в соответствии с технологическими требованиями. При этом, чем меньше площадь элементарного участка, тем точнее будет работать система адаптивного управления, и тем больше ресурсов системы для этого понадобится.

Каждый элементарный участок обладает своей собственной толщиной, определяемой моделью изделия. По этим данным вычисляется объем и масса каждого элементарного участка. В результате проделанных операций обрабаты-

ваемая поверхность \bar{A}_0 представляется в виде сетки или двумерного массива рис. 5 (3), каждый элемент которой служит исходными данными для нейронной сети II, которая непрерывно анализирует 4096 последних значений тока, которого характеризуется вектором параметров \bar{A}_{mn} , определяющим свойства покрытия по всей обрабатываемой площади (рис. 5).

В общем виде вектор \bar{A}_{mn} имеет следующий вид:

$$\bar{A}_{mn} = \{X_{K0}, Y_{K0}, Z_{K0}, V, k_m S, R, k_N, \Delta\},$$

где X_{K0}, Y_{K0}, Z_{K0} – координаты центра рассматриваемого элементарного участка в системе координат обрабатываемой детали; V – объем, рассматриваемого элементарного участка; k_m – параметр характеризующий физические свойства материала; S – номинальное значение заданной толщины покрытия на рассматриваемом участке; R – величина, описывающая необходимые параметры микрорельефа для рассматриваемого участка; k_N – коэффициент, характеризующий концентрацию остаточных напряжений в слое; Δ – коэффициент, определяющий поле допуска для значений параметров получаемого покрытия.

После формирования массива требуемых параметров покрытия, система обращается к локальной и сетевой базам данных и назначает начальные режимы работы генератора, состав газо-воздушной среды и интенсивность прокачки СОЖ для каждого участка. Далее оператор начинает обработку, одновременно с этим в работу включается блок распознания импульсов I (рис. 6), который производит опрос четырех каналов АЦП и анализирует данные о текущем токе I_i , напряжении U_i , акустическом сигнале Sound (I) и температуре окружающей среды t среды (I), а также ИНС I_i (рис. 6), управляющая процессом на уровне единичного импульса.

По текущим сигналам тока от АЦП формируется временной ряд I_1, I_2, \dots, I_n , который служит исходными данными для нейронной сети II, которая непрерывно анализирует 4096 последних значений тока. Сеть II синхронизирована с системой управления режимами обработки IX и системой управления станка VII и постоянно получает информацию о текущей частоте вращения (или вибрации) обрабатываемого электрода и межэлектродном промежутке. Блок распознания импульсов, анализируя получаемую информацию от АЦП, производит ее обработку, определяет общую энергию P каж-

дого импульса и долю энергии, затрачиваемую на обработку P_w , а также точные координаты приложения энергии. Значения энергии и каждого импульса (P, P_w), вместе с текущими координатами анода и данными об объеме и физических свойствах материала подаются на сумматор, который сопоставляет все данные и формирует массив текущего состояния обрабатываемой поверхности. Каждый элемент массива представляет собой вектор данных, описывающий текущее состояние каждого элементарного участка обрабатываемой поверхности. В общем виде вектор \bar{a}_{mn} имеет следующий вид:

$$\bar{a}_{mn} = \{X_K, Y_K, Z_K, V, T_v, k_m, P, P_{w\Sigma}\}, \quad (4)$$

где X_K, Y_K, Z_K – координаты центра рассматриваемого элементарного участка в системе координат обрабатываемой детали; V – объем рассматриваемого элементарного участка; T_v – температура элементарного участка; k_m – вектор характеризующий свойства материала элементарного участка; $P_{w\Sigma}$ – величина, характеризующая полезную энергию, затраченную на обработку элементарного участка. Массив текущего состояния обновляется в реальном режиме времени и достоверно отражает энергозатраты на единицу площади. С периодичностью в t опроса данные массива $\bar{A}_{\text{ТЕК}}$ поэлементно подаются на вход трехслойной нейронной сети III, результатом работы которой является вектор T_{mn} , следующего вида:

$$\bar{T}_{mn} = \{n, m, S, R, k_N\}, \quad (5)$$

где m, n – положение элементарного участка в массиве $\bar{A}_{\text{ТЕК}}$; V – объем элементарного участка; T_v – температура элементарного участка; k_m – вектор характеризующий свойства материала элементарного участка; $P_{w\Sigma}$ – величина, характеризующая полезную энергию, затраченную на обработку элементарного участка; который, в свою очередь, формирует массив данных, характеризующий текущие свойства получаемого покрытия:

$$\bar{A}_j = \left\{ \begin{array}{ccccc} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} & T_{2n} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} & T_{34} & T_{3n} \\ T_{41} & T_{42} & T_{43} & T_{44} & T_{4n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ T_{m1} & T_{m2} & T_{m3} & T_{m4} & T_{mn} \end{array} \right\}. \quad (6)$$

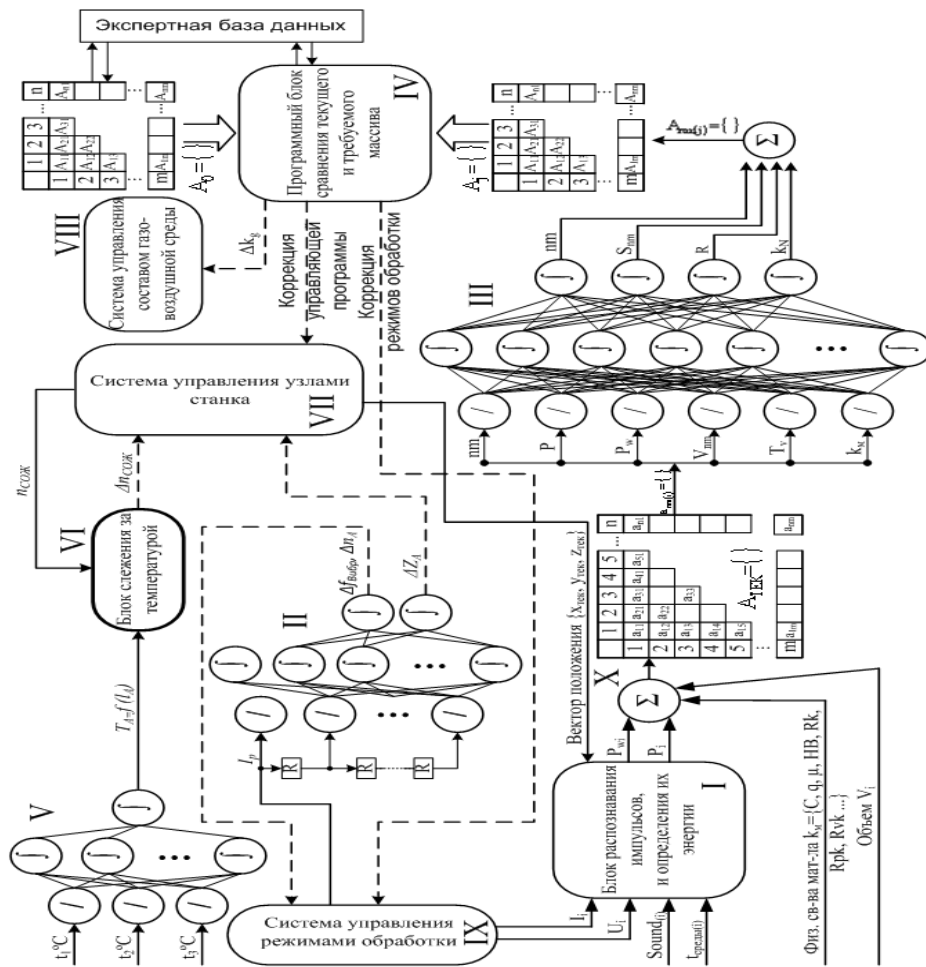


Рис. 6. Адаптивная система управления процессом ЭИЛ. Нейронная сеть I управляет устойчивостью обработки в масштабе времени единичного импульса, сеть III контролирует устойчивость процесса в масштабе времени технологической операции, а сеть V контролирует температуру анода

Далее происходит сравнение массива \bar{A}_1 с заданным массивом \bar{A}_0 , для чего предусмотрен отдельный программный блок IV, который поэлементно сравнивает два массива и, используя информацию из экспертной базы данных, выдает корректировочные сигналы для системы управления станком, корректируя траекторию обработки, и подстраивая режимы обработки в соответствии с текущим состоянием поверхности.

Степень нагрева анода контролируется тремя термопарами, сигналы от которых ($t = 1^{\circ C}$, $t = 2^{\circ C}$, $t = 3^{\circ C}$) с периодичностью t опроса, подаются на вход нейронной сети V (рис. 6), которая имеет один выход – функцию распределения температуры по длине анода $T_A = f(I_A)$. Полученная функция анализируется блоком слежения за температурой VI, и, после сравнения текущей температуры катода с необходи-

мой, производится корректировка на интенсивность подачи охлаждающей жидкости через систему управления станком. Тем самым, температура обрабатываемого электрода поддерживается в оптимальном диапазоне, который задается экспертной базой данных. Также это позволяет предотвратить перегрев технологического оборудования и избежать его вынужденных остановок и поломок.

Дополнительно в САДУ электроискровым станком с ЧПУ предусмотрена система управления газовой средой, которая регулирует концентрацию газов в межэлектродном промежутке. Начальный состав среды определяется согласно накопленному опыту (экспертная база знаний), а текущие корректировочные сигналы поступают из программного блока сравнения IV, которые формируются из данных получаемых от ИНС III.

ВЫВОДЫ

Описанная адаптивная система реализует управления устойчивостью процесса ЭИЛ в масштабе времени серии импульсов, что позволяет стабилизировать процесс ЭИЛ за счет: равномерного распределения энергозатрат по обрабатываемой площади, прогнозирования свойств получаемого слоя, контроля за температурой анода и катод, а так же управления составом газо-воздушной среды. Дополнительно происходит повышение производительности процесса за счет подбора оптимальных режимов обработки, относительного положения электрод-инструмента и траектории его перемещения. Данная система должна реализовываться на станке типа обрабатывающий центр с числовым программным управлением PCNC (Personal computer numerical system). Для обработки плоских поверхностей достаточно трех управляемых координат, для обработки сложных криволинейных поверхностей рекомендуется использовать 4- и 5-координатные станки.

Важным достоинством данной системы управления является то, что для ее реализации не нужно проектировать новый станок, так как она реализована в виде универсальной электроискровой головки, которая закрепляется в шпинделе станка, использует его систему управления, с незначительной модернизацией, а СОЖ и газы подаются через шпиндель станка (если это предусмотрено его конструкцией) и систему обдува зоны резания соответственно. Кроме электроискровой головки в комплект устройства входит генератор импульсов, АЦП и ЦАП, а программные блоки управления и ИНС реализуются программным образом в системе ЧПУ станка. Дополнительно станок оснащается датчиками температуры (термопары), тока и напряжения, микрофоном и промышленным тепловизором.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Верхотуров А. Д.** Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.
2. **Бородин И. Ф., Судник Ю. А.** Автоматизация технологических процессов. М.: КолосС, 2004. 344 с.
3. Основы автоматики и автоматизации производственных процессов / С. М. Хлытчиев [и др.]. М.: Радио и связь, 1985. 288 с.
4. **Хольм Р.** Электрические контакты. М.: Иностранная литература, 1961. 464 с.
5. **Ковальчук Е. Р.** Основы автоматизации машиностроительного производства. М.: Высшая школа, 1999. 312 с.
6. **Козырев Ю. Г.** Промышленные роботы: справочник. М.: Машиностроение, 1983. 376 с.
7. **Гавриш А. П.** Гибкие робототехнические системы. К.: Вицшак. Головное изд-во, 1989. 407 с.
8. **Данилов Ю. А., Кадомцев Б. Б.** Что такое синергетика? // Нелинейные волны. Самоорганизация. М.: Наука, 1983.
9. **Сарилов М. Ю.** Повышение эффективности электроэрозионной обработки и качества обработанной поверхности на основе подходов искусственного интеллекта: дисс. д-ра техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 2008. 315 с.
10. **Уоссермен Ф.** Нейрокомпьютерная техника: теория и практика. М.: Мир, 1992. 184 с.
11. **Давыдов В. М.** Основы построения нейронных сетей. Хабаровск: Изд-во Хабар. гос. техн. ун-та, 2005. 67 с.
12. **Ледков Е. А.** Исследование процессов стабилизации электроискровой обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2009. № 4. С. 63–71.
13. **Гиль А. В.** Влияние нагрева электродов на изменение их массы при электроискровой обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3 С. 26–30.

ОБ АВТОРАХ

Давыдов Владимир Михайлович, проф., зав. каф. технологической информатики и информационных систем Тихоокеанск. гос. ун-та. Д-р техн. наук по технол. и оборудованию механической и физ.-техн. обработки (КНАГТУ, 2004). Иссл. в обл. автоматизации производственных процессов.

Якуба Дмитрий Дмитриевич, асп., преп. той же каф. технологической информатики и информационных систем. Дипл. инженер по технологии машиностроения (ТОГУ, 2010). Иссл. в обл. электроискрового легирования.

Ледков Евгений Александрович, ст. преп. той же каф. Канд. техн. наук по технол. и оборудованию механической и физ.-техн. обработки (КНАГТУ, 2010) Иссл. в обл. автоматизации процессов ЭИЛ.

Химухин Сергей Николаевич, сотр. ИМХНЦ. Д-р техн. наук.