

УДК ???

В. В. АТРОЩЕНКО, Р. Х. ГАНЦЕВ**ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССАМИ ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ**

Рассмотрены пути построения современных систем управления процессами электрообработки на базе интегрированных систем, позволяющих унифицировать применяемые программные и аппаратные средства. Проанализирована иерархическая многоуровневая структура интегрированной системы управления.

Системы управления; электрообработка; унификация; нейросети

**ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ
ЭЛЕКТРООБРАБОТКИ. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ****ВВЕДЕНИЕ**

Процессы электрообработки металлов включают в себя большую группу методов обработки, основанных на тепловом, электрохимическом и комбинированном воздействии электрического тока на металл. В настоящее время разработаны и используются в промышленности более 20 видов технологических процессов электрообработки для решения различных технологических задач. Использование большого числа разновидностей процессов электрообработки вызвано особенностями обрабатываемости различных сплавов, жесткими требованиями к качеству обработанной поверхности, широким диапазоном решаемых технологических задач.

Широкое применение новых конструкционных материалов, постоянное ужесточение требований к точности, качеству и структуре обработанной поверхности требуют ускоренной разработки и внедрения нового электротехнологического оборудования. В последнее время, из-за несоответствия современным требованиям обработки, все большее значение приобретает проблема модернизации существующего парка электротехнологического оборудования. Все это делает актуальной задачу разработки нового и модернизации существующего электротехнологического оборудования (90% которого составляет оборудование, выпущенное в 70–80 гг.). Эффективное решение данной задачи возможно за счет оснащения используемого оборудования, для управления процессами электрообработки, электротехнологическими интегрированными системами.

Оборудование представляет собой функциональное сочетание механических, гидравлических, электрических и электронных систем, построенных на единой станочной базе (рис. 1).

Механические и гидравлические системы здесь подобны применяемым для механообработки, однако, по жесткости к ним предъявляются более мягкие требования, так как при электрообработке практически отсутствуют усилия резания. Специфическими являются требования по коррозионной стойкости (для электрохимического оборудования), пожаробезопасности, очистке рабочей жидкости и утилизации отходов.

Электрическая система электротехнологического оборудования состоит из двух основных частей:

1. Электроавтоматика. Обеспечивает сопряжение механических и гидравлических систем с электронными блоками и аналогична электроавтоматике механообрабатывающего оборудования,

2. Силовая часть технологических источников питания. Обеспечивает реализацию требуемых временных и амплитудных параметров тока и напряжения на нагрузке в процессе электрообработки. Эта часть электрической системы специфична для каждого вида обработки. Однако, в соответствии с современными тенденциями развития оборудования, силовая часть является линейным преобразователем (усилителем по мощности, току, напряжению), реализующим временную диаграмму изменения тока (напряжения) на нагрузке, задаваемую системой управления процессом.

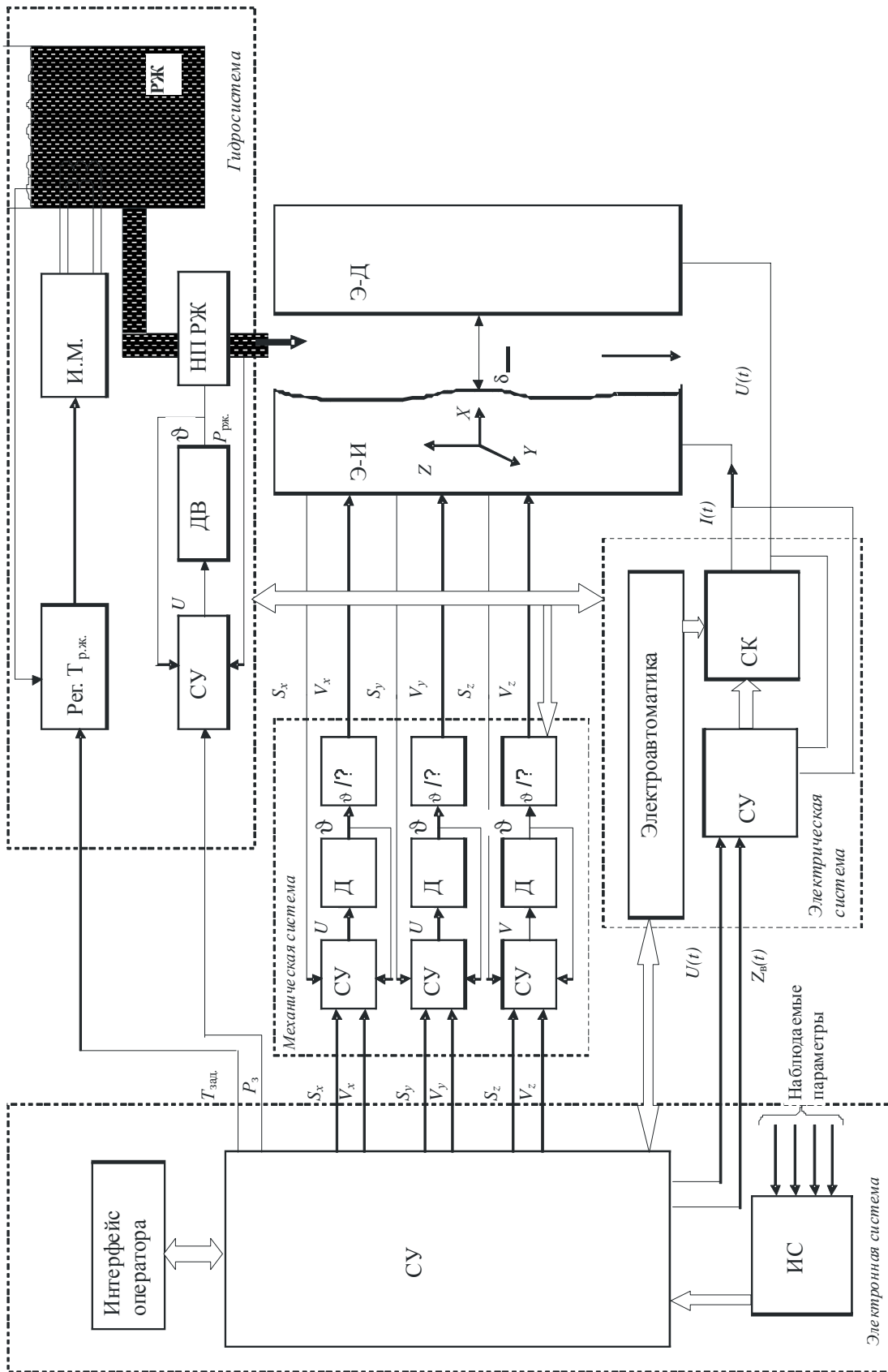


Рис. 1 . Функциональная схема оборудования для электрообработки

Электронная система оборудования в общем случае состоит из трех подсистем:

1. Подсистема управления пространственным перемещением электрода-инструмента (ЭИ) относительно поверхности обрабатываемой детали, реализуется на базе специальных микропроцессоров устройств числового программного управления (ЧПУ). Использование стандартных систем ЧПУ затруднено в силу следующих причин:

- необходима доработка системного программного обеспечения (ПО) ЧПУ для согласования с системой управления технологическим процессом обработки, что не всегда возможно. Системное ПО является закрытым для пользователей;
- требуется модернизация аппаратной части для обеспечения помехозащищенности, так как процессы электрообработки сопровождаются очень высоким уровнем электромагнитных помех;
- функционально и аппаратно ЧПУ избыточны и, соответственно, имеют высокую стоимость.

2. Подсистема управления электроавтоматикой оборудования и интерфейс связи с оператором. Эта подсистема реализуется на базе стандартных узлов (PLC-контроллеры, промышленные ЭВМ) и требует доработки существующего программного обеспечения для его адаптации к конкретному виду оборудования и специфике используемого технологического процесса. Имеющиеся в настоящее время программные средства (SCADA-системы, системы программирования PLC-контроллеров) позволяют решать эту задачу с минимальными затратами.

3. Подсистема управления технологическим процессом. Обеспечивает многосвязное управление движением ЭИ, источником питания и расходом рабочей жидкости. Для достижения цели электрообработки подсистема реализует алгоритм управления технологического процесса и задает значения решаемых параметров обработки в соответствии с решаемой технологической задачей. Качество работы этой подсистемы во многом определяет результат обработки, поэтому при разработке и отладке нового оборудования на нее приходится 70–80% общих интеллектуальных затрат.

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ

В настоящее время известно большое количество алгоритмов и способов управления

процессами электрообработки, разработанных для решения отдельных технологических задач [1]. Общими недостатками существующих систем являются нестабильность результатов обработки партии деталей и необходимость прямого участия оператора в корректировке работы системы управления в процессе обработки.

Следовательно, необходимо разработать принципы построения принципиально новых интегрированных систем управления технологическими процессами электрообработки, позволяющих адаптироваться к конкретному виду оборудования и используемому технологическому процессу. Современные системы управления процессами электрообработки должны, помимо реализации принципов интеграции, обеспечивать повышение качества управления.

Рассмотрим особенности интегрированного управления процессами электрообработки, определяющие эффективность работы системы управления.

Интегрированное управление процессами заключается в одновременном решении следующих задач:

- реализация обобщенной целевой функции управления;
- обеспечение устойчивости протекания процесса обработки;
- предотвращение аварийных ситуаций.

Целевая функция управления для общего случая размерной электрообработки формулируется следующим образом: достижение максимальной производительности и минимального износа электрода-инструмента при условии обеспечения заданных значений точности обработки и качества формируемой поверхности с ограничениями на развитие аварийных ситуаций.

Решение этой задачи требует:

- реализации возможности модификации вида целевой функции на различных стадиях обработки деталей с целью оптимизации конечного результата. Процесс обработки детали можно разделить на следующие стадии: черновая обработка — «врезание», сьем основной массы металла, вскрытие отверстия (для операции перфорирования) и чистовая доводка. Для достижения цели управления на каждой стадии должна реализовываться своя целевая функция. Существующие системы управления процессами электрообработки частично решают эту проблему, но не учитывают изменение значений всех показателей качества обработки [2]: возможности оцени-

вать в процессе обработки производительности, точности и качества формируемой поверхности.

Под производительностью обычно понимается скорость съема металла во время активной фазы обработки, зависящей от величины энергии, вводимой в зону обработки. Если определить производительность как величину, обратную времени, затрачиваемого на осуществление любой из названных стадий обработки, то производительность будет зависеть и от других параметров, например, отношения времени активной фазы обработки к времени промывки [3].

Точность детали в процессе электрообработки зависит от геометрии ЭИ и режимных параметров обработки. В настоящее время точность детали характеризуют точностью воспроизводства стандартных геометрических элементов (радиус острых кромок, конусность боковой поверхности и т. д.). В процессе обработки эти элементы не могут быть измерены, а их специфичный характер не позволяет использовать их оценки для управления процессом. Необходимо определить обобщенный параметр, характеризующий точность формообразования для широкого круга деталей и допускающий возможность измерений в процессе обработки.

Качество формируемой поверхности оценивается по шероховатости, структуре и химическому составу поверхностного слоя в зависимости от назначения, условий эксплуатации и дальнейшей обработки детали.

Необходима оценка текущих значений показателей качества непосредственно в процессе обработки по измерению косвенных параметров, функционально связанных со значениями показателей качества.

Обобщенный вид целевой функции управления для разных процессов электрообработки можно получить с помощью известных формальных процедур, основываясь на значениях частных целевых функций управления. Необходимы дополнительные исследования для автоматизированного построения границ области существования процессов обработки в пространстве входных (управляющих) воздействий (области устойчивых режимов обработки). Границы этой области меняются как во время процесса обработки детали, так и при смене постановочной части и решаемой технологической задачи. Для эффективной реализации обобщенной целевой функции управления необходимо использо-

вание экспертной системы «автоматический технолог».

Обеспечение устойчивого протекания процесса обработки — одна из сложных задач интегрированного управления. Для процессов электрообработки существенную роль играют динамические свойства системы управления. При скорости съема металла $\sim 2-4$ мкм/с, частота выдачи решений по каналу управления скоростью подачи ЭИ должна быть не менее 100 Гц, а по каналу управления источником питания — 100 кГц.

В настоящее время не существует общепринятого определения понятия устойчивости режима обработки. Есть ряд вербальных описаний, основанных на эмпирических знаниях, полученных на основе наблюдений за процессом обработки. Например, для случая электрохимической размерной обработки скорость подачи ЭИ должна быть равной скорости съема металла при минимально возможном межэлектродном зазоре, в то же время для электроэрозионной обработки скорость движения ЭИ должна изменяться плавно, без резких скачков. Реализация этих условий на практике обеспечивает наилучшие технологические результаты. Но для этого система управления должна производить оценку степени устойчивости процесса и, используя модели, описывающие зависимости степени устойчивости процесса от управляющих воздействий и технологических параметров, формировать оптимальные управляющие воздействия. Построение этих моделей традиционными способами затруднительно и экономически неэффективно. В силу нелинейности, нестационарности, многосвязности и существенной зависимости от условий обработки (вид, траектория движения ЭИ, материал детали и инструмента и т. п.), необходимо строить модель практически для каждой технологической операции. Такой подход, по условиям адаптации, неприемлем при построении интегрированной системы управления процессами электрообработки.

Основной причиной аварийных ситуаций в процессе электрообработки является неуправляемый (случайный) переход режимных параметров из зоны устойчивых режимов обработки в зону аварийных режимов. Как правило, это связано с накоплением ошибок управления и случайными изменениями каких-либо технологических факторов (появление токопроводящих мостиков из частиц шлама или посторонних механических фрагментов в зазоре при электрохимической обработке, изменение структуры материала дета-

ли при электроэрозионной обработке). При этом вероятность возникновения аварийных режимов не может быть снижена до «нуля» за счет повышения качества управления процессом обработки. Поэтому в интегрированной системе управления необходимо предусматривать автономные быстродействующие каналы обнаружения развития аварийных ситуаций. При этом обеспечивается автоматическая защита ЭИ, детали и источника питания от возможных разрушений и восстановление рабочего цикла процесса обработки. Современная аппаратная реализация источников питания позволяет минимизировать их негативные последствия для электродов и силовых элементов источников питания. Решение задачи предотвращения аварийных ситуаций в процессе обработки связано с изменением алгоритмов управления процессом. Поэтому система управления должна иметь возможность коррекции алгоритма управления процессом обработки.

Анализ современных достижений в области построения интегрированных систем показал, что наиболее перспективным направлением является использование иерархических структур и интеллектуальных принципов обработки информации и управления.

Иерархическая структура интегрированной системы управления процессом электрообработки позволит:

- унифицировать связи между подсистемами, их аппаратную и программную реализацию,
- разделить задачи управления по сложности алгоритмов управления, объему входной информации и временным циклам выдачи решений,
- адаптировать с минимальными затратами аппаратную часть системы управления к требованиям решаемых технологических задач и используемому станочному оборудованию.

Интеллектуальные алгоритмы обработки информации управления позволят:

- автоматизировать построение моделей процессов электрообработки как объектов управления и моделей оценки технологических показателей,
- автоматически выстраивать (корректировать) модели в процессе электрообработки,
- сохранять и учитывать в процессе управления предисторию — технологические результаты обработки предыдущих деталей.

На рис. 2 приведена структурная схема интегрированной системы управления процес-

сами электрообработки. Система имеет три уровня управления.

Нижний уровень. Состоит из локальных контроллеров-регуляторов параметров обработки, обрабатывающих управляющие воздействия и интерполятор траектории.

Регуляторы поддерживают в реальном масштабе времени заданные значения скоростей перемещения ЭИ, давления, температуры рабочей жидкости, внутреннего сопротивления источника питания, а также формируют требуемую временную диаграмму напряжения (тока). Они являются цифровыми, быстродействующими (частота выдачи решений до 10^3 – 10^5 кГц) устройствами, реализующими простые алгоритмы управления.

Интерполятор траектории производит изменение во времени и пространстве значений управляемых координат значений параметров обработки. Это устройство переводит по оптимальной траектории процесс обработки из текущей точки в заданную. Критерием оптимальности является минимум времени перехода, при условии сохранения устойчивого (безаварийного) характера протекания процесса обработки. Кроме того, интерполятор производит согласование временных циклов выдачи решений между уровнем локальных контроллеров и уровнем оперативного управления.

К входам локальных контроллеров-регуляторов подключен выход блока обнаружения аварийных ситуаций. По сигналу с этого блока локальные контроллеры с максимальным быстродействием реализуют программу обработки аварийных ситуаций, защищая электроды и оборудование от последствий аварий.

Нижний уровень локальных контроллеров-регуляторов инвариантен к виду решаемых технологических задач и используемому станочному оборудованию. Программная настройка коэффициентов регуляторов обеспечивает адаптацию системы к динамике процесса электрообработки и чувствительности исполнительных устройств. Алгоритмы настройки известны и широко применяются в практике станкостроения [4]. Интерполятор траектории, при изменении технологической задачи, требует задания границ устойчивого протекания процесса в пространстве параметров обработки. Алгоритм работы блока обнаружения аварийных ситуаций зависит от вида реализуемого технологического процесса. В настоящее время разработано большое количество устройств, обеспечивающих досто-

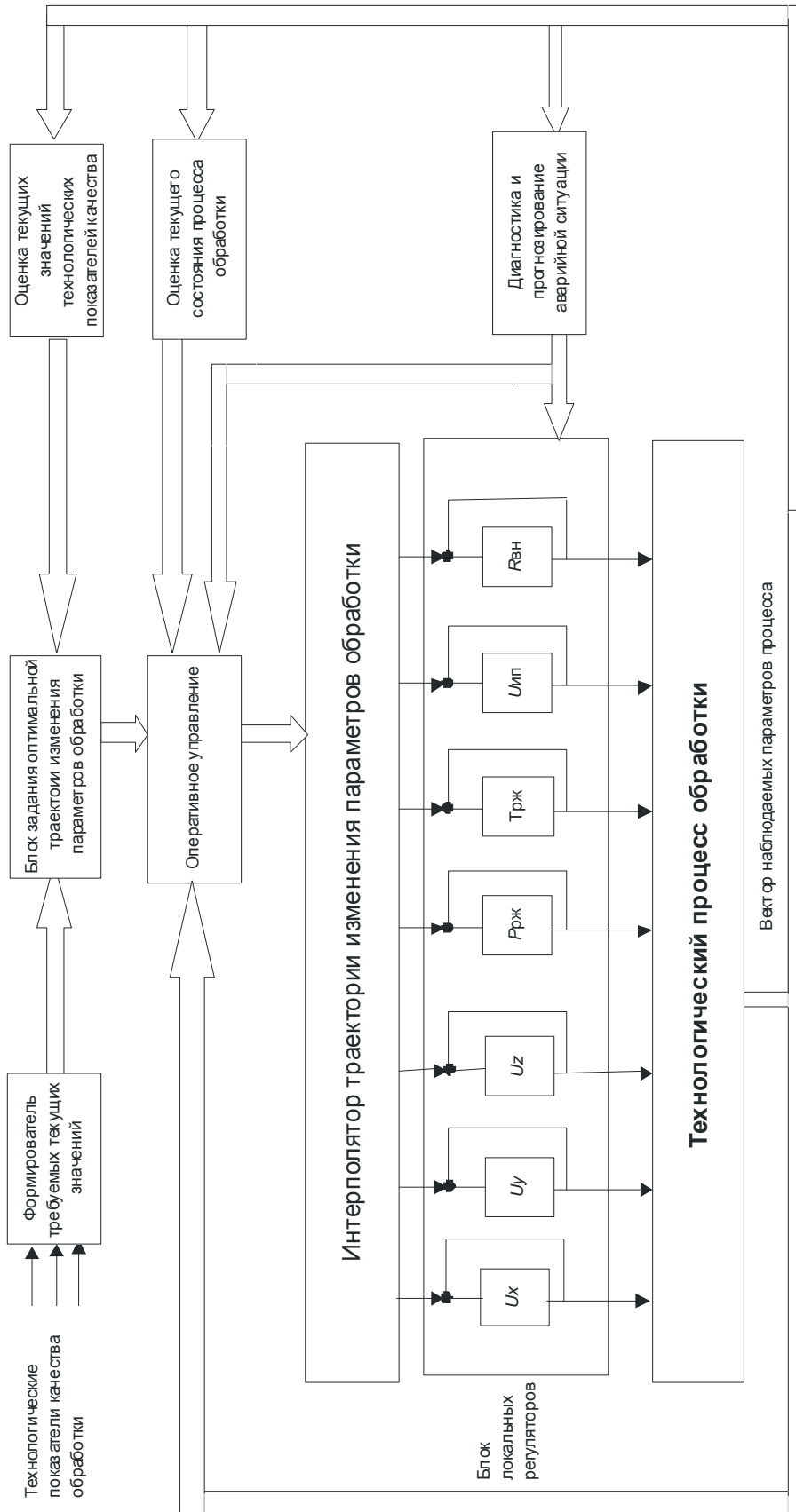


Рис.2. Структурная схема интегрированной системы управления процессами электрообработки

верное обнаружение аварийных ситуаций [6]. Они эффективно могут быть использованы в составе интегрированной системы управления.

Средний уровень — уровень оперативного управления.

Здесь производится изменение параметров электрообработки с целью обеспечения требуемых технологических показателей.

Верхний уровень. Заданные значения параметров определяются на верхнем уровне управления. Входом этого уровня является N -мерный вектор наблюдаемых параметров процесса, а выходом — M -мерный вектор управляющих воздействий. Управление на верхнем уровне требует построения обратной модели объекта управления, связывающей управление воздействия и управляемые величины. Модель должна учитывать нелинейность, нестационарность объекта и адаптироваться к виду решаемой технологической задачи. Для построения блока оперативного управления наиболее рационально использовать искусственные нейронные сети (нейросети). Свойство нейросетей — аппроксимировать с высокой точностью многомерные нелинейные динамические функции при рациональной организации процесса обучения, позволяет автоматически адаптировать нейросетевую модель к конкретному виду технологической задачи и к последующему изменению модели в процессе обработки.

Работа и обучение нейронных сетей в реальном масштабе времени, при ограниченных временных и аппаратных ресурсах, требует оптимизации алгоритма обучения, архитектуры сети и структуры регулятора. Анализ известных сетей показал, что оптимальным является применение инверсно динамической структуры нейроконтроллера с использованием трехслойной нейросети и алгоритма обратного распространения ошибки [5]. Для ускорения сходимости процесса обучения модели необходим дополнительный критерий качества обучения — информационный параметр, характеризующий устойчивость протекания процесса обработки. В качестве такого параметра предлагается использовать уровень высокочастотных колебаний напряжения на электродах, параллельно подключенных к МЭЗ. Как показано в работах [1, 6], появление высокочастотных колебаний свойственно как для обработки, основанной на использовании электрохимического, так и теплового воздействия электрического тока. Причины возникновения колеба-

ний, их параметры и связь с условиями обработки различны для электрохимической и эрозионной обработки. Существует уровень мощности этих колебаний, при котором условия обработки являются оптимальными [7]. Для методов эрозионной обработки, в качестве такого параметра могут использоваться температура ЭИ и степень загрязненности рабочей жидкости в зазоре. Для электрохимической обработки, устойчивость процесса можно оценить по значениям проводимости электролита и минимального локального зазора. Информационный параметр, характеризующий устойчивость протекания процесса, используется на том же уровне управления автономным контуром управления устойчивостью процесса обработки. Здесь текущее значение информационного параметра сравнивается с величиной, определяемой на верхнем уровне. По результату сравнения корректируются заданные значения режимных параметров с целью предотвращения выхода процесса обработки в зону аварийных режимов. Использование нейроконтроллера позволяет обеспечить инвариантность работы уровня оперативного управления решаемой задачи.

Верхний уровень управления реализует целевую функцию управления, обеспечивая максимальную производительность и минимальный износ при заданных значениях точности и качества поверхности. Решаются следующие задачи оптимизации процесса обработки:

- оптимизация траектории изменения показателей качества обработки в реальном масштабе времени,
- формирование на уровне оперативного управления требуемых значений параметров обработки,
- коррекция траектории изменения технологических показателей в зависимости от наличия аварийных ситуаций и текущих результатов обработки.

Для решения задач верхнего уровня требуется построение моделей оценки текущих значений технологических показателей. В настоящее время известны способы оценки текущих значений показателей качества обработки [1]. Границы устойчивых режимов обработки задаются на основе эмпирических зависимостей. Для автоматизации процесса построения этих моделей необходимо использовать экспертные системы, позволяющие использовать накопленные и вновь получаемые эмпирические данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время на базе рассмотренного подхода разработаны интегрированные системы управления двусторонними электрохимическими и электроэрозионными станками. В этих системах реализовано управление нижнего уровня и оперативное управление приводами подачи. Управление на верхнем уровне реализовано в части определения оптимальной траектории изменения параметров с целью повышения производительности электрообработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Атрощенко, В. В.** Автоматическое управление и диагностика технологических процессов электрообработки / В. В. Атрощенко, Р. Х. Ганцев. М. : Машиностроение, 2000. 203 с.
2. **Саушкин, Б. П.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Б. П. Саушкин. М. : ООО «Дрофа», 2002. 655 с.
3. **Длугач, Д. Я.** Вопросы оптимизации циклического процесса ЭХО / Д. Я. Длугач, Г. И. Криштафович // Электронная обработка материалов. 1980. № 2. С. 35–41.
4. **Седькин, Ф. В.** Оборудование для размерной электрохимической обработки деталей машин / Ф. В. Седькин. М. : Машиностроение, 1980. 277 с.
5. **Васильев, В. И.** Автоматизация управления процессом электрообработки с использованием нейросетевых моделей / В. И. Васильев, Р. Х. Ганцев, А. М. Стрельцов // Мехатроника, автоматизация, управление : сб. тр. 2-й

Всерос. науч.-техн. конф. Уфа, 2005. Т. 1. С. 58–64.

6. **Атрощенко, В. В.** Автоматическая система защиты от коротких замыканий в электрохимических станках / В. В. Атрощенко // Электрофизические и электрохимические методы обработки : науч. техн. реф. сб. М. : НИИ-Маш., 1981. Вып. 12. С. 9–10.
7. **Атрощенко, В. В.** К вопросу о выделении высокочастотного сигнала при управлении дискретным процессом ЭХРО / В. В. Атрощенко // Электронная обработка материалов. 1980. № 5. С. 68–71.

ОБ АВТОРАХ



Атрощенко Валерий Владимирович, проф., зав. каф. обор. и технол. свар. пр-ва. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1974). Д-р техн. наук по системам авт. упр-я (ЛЭТИ, 1991). Иссл. в обл. автоматизации технол. процессов в машиностроении.



Ганцев Рустем Халимович, докторант той же каф. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1978). Канд. техн. наук по эл-там авт. устройств (УАИ, 1987). Иссл. в обл. автоматизации технол. процессов электрообработки.