

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРЯДНО-ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Л.Е. Овчинникова, С.С. Козырев

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина
Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова,
пр. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, 54025, Украина, skozyrev@gmail.com*

Проведено исследование разрядно-импульсной технологии как объекта управления, построена инверсная модель электровзрывного преобразования энергии на базе экспериментальных данных с использованием метода fuzzy-аппроксимации, основанного на теории нечетких множеств. На основе нечеткой инверсной модели синтезирована адаптивная система управления электровзрывным преобразованием энергии, которая дает возможность обеспечить заданные режимы обработки на всем пространстве состояний объекта управления в условиях неопределенности технологических параметров, характеристик среды и действия случайных внешних возмущений. Применение адаптивного управления позволило повысить эффективность разрядно-импульсных технологий на 15–20%.

УДК 681.51: 537.528

ВВЕДЕНИЕ

В технологиях разрядно-импульсной обработки материалов и изделий применяют подводный электровзрыв (электровзрывное преобразование энергии) как источник концентрированного, дозированного воздействия в заданных локальных объемах с высокими удельными энергетическими показателями. В канале высоковольтного разряда в жидкости энергия электрического поля заряженной конденсаторной батареи превращается в механическую работу расширения канала разряда, который является элементом нагрузки разрядного контура генератора импульсных токов (ГИТ). Импульс давления, возникающий вследствие мгновенного расширения канала разряда под действием энергии высокой плотности, используется в качестве основного фактора технологического воздействия на объекты обработки в разрядно-импульсных технологиях очистки литья, обработки металлов давлением, разрушения и измельчения негабаритов и скальных пород, снятия остаточных напряжений сварных швов, интенсификации процессов кристаллизации металлов и др. Техническим средством для реализации электровзрывного преобразования энергии в канале подводного высоковольтного разряда, возникающего между электродами или электродом и изделием в технологических устройствах, служат электрогидроимпульсные установки (ЭГУ) [1].

Основные преимущества электровзрывного технологического воздействия – это возможность достижения высоких удельных энергетических показателей и заданной локализации, а также обеспечения управляемости процесса, поскольку электровзрыв, в отличие от других видов взрывных процессов, управляем. Реализация основного преимущества управляемости нуждается во всестороннем изучении электровзрыва и его формализации, то есть построении математической модели для синтеза автоматических систем управления.

Существующие устройства регулирования ЭГУ не обеспечивают эффективного управления режимом разряда из-за стохастичности процессов формирования канала разряда, неопределенностей параметров среды, объектов обработки и возмущающих воздействий, которые возникают на разных технологических этапах обработки. Стохастический характер процесса формирования и расширения канала разряда в жидкости требует учета его статистических характеристик, которые зависят от параметров разрядного контура и параметров среды, изменяющихся в процессе работы. Неопределенности на этапе технологической обработки возникают при разрядах на обрабатываемый объект, в процессе движения электрода над поверхностью обработки. Непредсказуемый рельеф обрабатываемой поверхности образуется в результате разрушения формовочных смесей при очистке отливок и случайных изменениях формы измельчаемых негабаритов.

По результатам системного анализа электровзрывного преобразования энергии в канале высоковольтного разряда в жидкости как объекта управления подводный электровзрыв отнесен к многомерным дискретно-непрерывным нормальным стохастическим системам с выходными координа-

тами в виде случайных функций нестационарных по математическому ожиданию [2]. Задача синтеза систем управления объектами такого класса, которые работают в условиях неопределенности параметров среды и возмущающих воздействий, не может быть эффективно разрешена традиционными методами и требует применения элементов искусственного интеллекта для создания современных интеллектуальных систем управления. Цель работы – повышение эффективности разрядно-импульсной обработки путем синтеза адаптивной системы управления электровзрывным преобразованием энергии на основе использования нечетких инверсных моделей объекта управления для обеспечения заданных технологических режимов с учетом стохастического характера процесса, неопределенностей параметров среды, объектов обработки и возмущающих воздействий.

СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Система управления электровзрывным преобразованием энергии является подсистемой многоуровневой иерархической системы управления ЭГУ для разрядно-импульсных технологий, относящихся к сложным техническим системам, процессы в которых существенно различаются по скоростям и параметрам [3]. Координаты состояния и критерии оптимальности на отдельных стадиях функционирования различные. На основе анализа выделены следующие структурные части ЭГУ:

– вспомогательные технологические механизмы, алгоритмы работы которых задаются технологическими циклограммами и изменяются при переходе от одной технологии к другой, что требует обеспечения автоматической перенастройки алгоритма управления. На этапе выполнения вспомогательных технологических операций переменными состояниями объекта управления служат положения механизмов и устройств ЭГУ, а их координатами – состояния датчиков положения. Управляющими воздействиями являются сигналы включения исполнительных механизмов (ИМ). Для модели этой стадии пространство состояний и пространство управлений представляют собой два множества, или две матрицы (матрица состояния и матрица управления), их элементами будут соответственно состояния датчиков положения механизмов ЭГУ и команды включения исполнительных механизмов. Задача системы управления – это обеспечение соответствия элементов множеств, которое задается циклограммой технологических операций и диаграммой состояния датчиков;

– зарядное устройство (ЗУ) генератора импульсных токов имеет сложную структуру, в нем протекают многомерные нелинейные процессы заряда емкостных накопителей. Во время заряда происходит промежуточное преобразование частоты. Процессы, которые происходят в ЗУ при зарядке конденсаторов, также имеют неопределенности: добротность зарядного контура изменяется в процессе заряда; резонансная частота зависит от нагрузки, которая также изменяется в процессе заряда накопителя. К задачам управления относится обеспечение компромиссного режима заряда с поддержанием квазирезонансной частоты с помощью адаптивного алгоритма управления зарядом накопителя;

– разрядный контур ГИТ, кроме постоянных элементов разрядной цепи, включает канал разряда, образующийся между электродом и объектом обработки, в котором происходит электровзрывное преобразование энергии с генерацией волны давления, обеспечивающей необходимые параметры технологического воздействия. Неопределенность в канале разряда вызывают стохастические процессы его формирования и расширения. Статистические характеристики предпробивной стадии разряда зависят от параметров разрядного контура и параметров среды, например электропроводности жидкости и др. К задачам управления относится обеспечение необходимого режима разряда, гарантирующего выполнение определенных технологических требований;

– подвижная электродная система обеспечивает необходимую локализацию технологического воздействия при обработке объектов сложной формы. Неопределенность в процессе движения электрода над поверхностью объекта вызывает непредсказуемый рельеф, образующийся вследствие разрушения формовочных смесей при очистке отливок и изменения формы измельчаемых негабаритов. Задачей управления является поддержание такой траектории движения, которая обеспечит заданную локализацию и интенсивность обработки.

Управление объектами такого класса – сложная многокритериальная задача, требующая применения метода декомпозиции (разделение на несколько задач разного уровня). В результате этого система автоматического управления ЭГУ для разрядно-импульсных технологий должна иметь иерархическую структуру, в которой можно выделить несколько уровней управления и несколько автономных подсистем (рис. 1).

Локальный уровень – это системы управления отдельными исполнительными механизмами, которые обеспечивают оптимизацию переходных процессов при отработывании последними управляющих сигналов, синтезированных на высших уровнях, и включают датчики для сбора информации

о ходе технологического процесса, обрабатываемой локальными контроллерами, имеющими унифицированный интерфейс, и передаваемой на высший уровень для синтеза, управляющего воздействия.

Подсистемы адаптивного управления структурными частями ЭГУ – это относительно автономные подсистемы, обеспечивающие оптимальные режимы на отдельных этапах разрядно-импульсной обработки с учетом всех неопределенностей и ограничений, работа которых согласовывается по параметрам во времени системой высшего уровня. Синтез этих подсистем нуждается в анализе математических моделей процессов, обобщении задач управления, выявлении и исследовании неопределенностей и ограничений.

Система управления высшего уровня обеспечивает принятие оптимальных управляющих решений и согласование работы всех подсистем. Сложность и многокритериальность задач, стоящих перед этой системой, требуют разработки соответствующего аппаратного и программного обеспечения. В качестве центральной системы управления используется ПЭВМ типа IBM PC со специально разработанным программным продуктом, ориентированным на обеспечение интерфейса между диспетчером и системой управления, возможности оперативного формирования и коррекции программы технологической обработки, а также содержит базы оперативных данных и базы алгоритмов. Управляющая ПЭВМ обеспечивает оперативное управление и отображение текущего состояния объекта управления, взаимосвязь между отдельными подсистемами и локальными управляющими модулями, функционирование ЭГУ в оптимальных режимах.



Рис. 1. Архитектура иерархической системы управления ЭГУ

С целью создания подсистемы управления режимом электровзрыва проведено теоретическое и экспериментальное исследования дискретного процесса с периодом T , электровзрывного преобразования энергии в разрядном контуре ГИТ как объекта управления [2]: $\mathbf{Y}(nT) = \mathbf{A} \mathbf{X}(nT)$, n – текущая реализация процесса. Координатами входного вектора $\mathbf{X}(nT)$ являются параметры разрядного контура: U – зарядное напряжение накопителя; C – емкость батареи конденсаторов; L – индуктивность разрядного контура, $l(nT)$ – величина разрядного промежутка. Выходной вектор $\mathbf{Y}(nT)$ – результат электровзрывного преобразования энергии в канале разряда, характеризуется случайными импульсными функциями: $i(\tau)$ – разрядного тока, $u(\tau)$ – напряжения на разрядном промежутке, $p(\tau)$ – давления в канале разряда, где τ – длительность разряда ($\tau \ll T$). В качестве координат выходного вектора $\mathbf{Y}(nT)$

приняты функционалы этих случайных импульсных функций, количественно и однозначно их характеризующие: максимальные значения разрядного тока $i_m[n]$ и давления $p_m[n]$, пробивное напряжение $u_{пр}[n]$. Эти функционалы являются дискретными случайными функциями с нормальным законом распределения и могут быть представлены в виде: $y_m[n] = M_y[n] + y^0$, где $M_y[n]$ – математическое ожидание выходной координаты, y^0 – помеха – стационарная случайная величина с законом распределения Гаусса. Оператор объекта A множеству входных состояний X ставит в соответствие множество Y функционального пространства возможных реализаций выходных функций.

По результатам исследования статистических характеристик и корреляционных отношений координат выходного вектора в качестве информационной статистически эффективной координаты системы управления принята их линейная комбинация [4]: $\Sigma[n] = i_m[n] + k u_{пр}[n]/i_m[n]$. Каналом управляющего воздействия определена величина разрядного промежутка $l(t)$, которую можно целенаправленно изменять с помощью исполнительного механизма, обеспечивающего заданное перемещение электродной системы. Основным возмущением, влияющим на режим электровзрывного преобразования энергии при разрядно-импульсной очистке литья и измельчении негабаритов, является изменение величины разрядного промежутка в результате разрушения формовочных смесей и изменения формы негабаритов. При этом возмущение по координате $l(t)$ можно считать аддитивным, оно поступает на вход объекта управления и прибавляется к текущему значению координаты.

Существующие системы управления, блок-схема которых показана на рис. 2, построены на основе линеаризации модели объекта управления ОУ с использованием принципа разделения, что позволяет свести задачу синтеза оптимального управления к двум независимым задачам: задаче синтеза регулятора P , вырабатывающего управляющий сигнал для исполнительного механизма ИМ при полной и точной информации [5], и задаче синтеза блока оптимальной статистической обработки информационного сигнала Φ [6]. Такие системы обеспечивают управление только в окрестности точки номинального режима при незначительных возмущениях и неизменных параметрах среды.

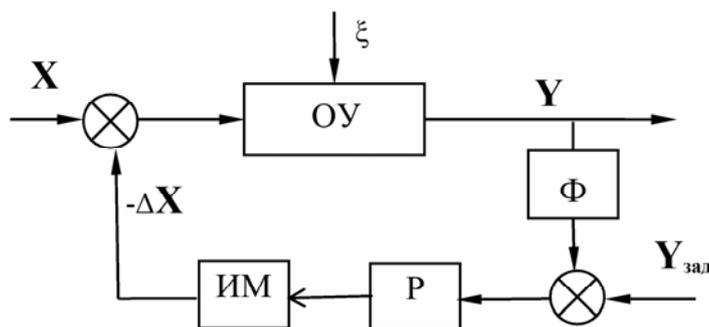


Рис. 2. Блок-схема традиционной системы управления

Принятые допущения при синтезе приведенной системы управления работают для очень узкого класса задач. В реальных условиях существует значительное количество неучтенных возмущений, существенно влияющих на режим разряда. К ним относится уменьшение удельного сопротивления жидкости ρ , в которой происходит высоковольтный электрический разряд, за счет загрязнения остатками формовочных смесей. Скорость изменения ρ определяется составом формовочных смесей, интенсивностью режимов обработки. При отсутствии систем регенерации пренебрегать изменениями удельного сопротивления невозможно, поскольку значение ρ влияет на оператор объекта управления и статистические характеристики информационных координат, поэтому необходимо рассматривать дополнительную координату входного вектора $\rho[n]$. Предположение о линейности возмущения по координате $l[n]$ также действует только при обработке поверхностей с незначительными перепадами высот и в окрестности точки номинального режима. Поэтому для расширения зоны управляемости объекта, повышения точности поддержания оптимальных режимов в реальных условиях, что повысит эффективность разрядно-импульсных технологий, необходимо вносить коррективы в закон управления в процессе работы в соответствии с изменениями координат объекта управления, то есть предусматривать механизмы адаптации [7].

Механизм адаптации объектов такого класса можно обеспечить, используя системы управления на основе нечетких инверсных моделей, которые генерируют реакцию на возмущение, вычисляя значение управляющего воздействия, обеспечивающее необходимое значение выходной координаты. Достоверность инверсной модели обеспечивается точностью и полнотой описания свойств объекта и его статистических характеристик. Построение инверсной модели предполагает получение обратной

функции объекта управления, то есть функции нахождения такого значения управляющего воздействия по координате $l[n]$, которое обеспечит заданное значение выходной координаты $i_m[n]$ или $\Sigma[n]$, а значит, и заданного режима электровзрывного преобразования энергии, обеспечивающего необходимое технологическое воздействие, при текущем состоянии контролируемых параметров объекта, в данном случае удельного сопротивления жидкости ρ :

$$l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n]).$$

Электровзрывное преобразование энергии как объект управления является стохастическим процессом, поэтому задачи управления им решаются на основе принципа разделения, когда задача управления разделяется на две независимые: задачу управления в среднем при детерминированных значениях координат и задачу оптимальной статистической оценки информационного сигнала. Поэтому инверсную модель строим, используя в качестве информационных координат их математическое ожидание M_Σ . Для учета стохастичности процесса необходимо построение дополнительной модели зависимости статистических характеристик информационных координат объекта, таких как среднестатистическое отклонение σ_Σ , от изменения координат входного вектора $\mathbf{X} < l[n], \rho[n] >$ на всем пространстве состояний:

$$\sigma_\Sigma = F(l[n], \rho[n]).$$

Аналитически прямую и инверсную модель электровзрывного преобразования энергии построить непросто, так как физические процессы, происходящие в канале разряда, очень сложные, недостаточно изучены, плохо поддаются формализации [8]. Поэтому предложено для получения этих зависимостей применить современные методы fuzzy-аппроксимации, используя базы экспериментальных данных для построения нечетких моделей управления.

С целью получения базы экспериментальных данных для построения нечеткой инверсной модели процесса электровзрывного преобразования энергии проведено экспериментальное исследование зависимости выходной статистически эффективной информационной координаты $\Sigma[n]$ и ее статистических характеристик σ_Σ от изменений координат входного вектора $\mathbf{X} < l[n], \rho[n] >$ на всем пространстве состояний. Для этого поставлен дробный факторный эксперимент при одновременном варьировании всех независимых переменных на всех выбранных уровнях значений с использованием методов планирования эксперимента [9].

База экспериментальных данных для построения инверсной модели приведена в табл. 1 и 2. Значения информационной координаты $\Sigma[n]$ и ее среднеквадратичного отклонения σ_Σ даны в относительных единицах, за базовое значение принято амплитудное значение разрядного тока при коротком замыкании $I_{кз}$.

Таблица 1. Значения управляющей координаты $l[n]$, м

Σ	ρ , Ом·м				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,40	0,047	0,050	0,056	0,094	0,100
0,45	0,040	0,042	0,048	0,081	0,090
0,50	0,032	0,035	0,038	0,069	0,082
0,55	0,025	0,027	0,030	0,052	0,065

Таблица 2. Среднеквадратичное отклонение σ_Σ координаты $\Sigma[n]$

l , м	ρ , Ом·м				
	6,0	7,5	10,0	15,0	20,0
0,025	0,027	0,024	0,023	0,015	0,009
0,050	0,037	0,036	0,035	0,014	0,012
0,075	0,042	0,040	0,039	0,015	0,013
0,100	0,074	0,069	0,043	0,016	0,015
0,125	0,085	0,072	0,055	0,032	0,024

Синтез инверсной модели электровзрывного преобразования энергии проводим, используя fuzzy-аппроксимацию на основе экспериментальных данных (табл. 1, 2). В качестве лингвистиче-

ских переменных fuzzy-аппроксимации принимаем координаты $\rho[n]$, $\Sigma[n]$. Количество термов (лингвистических значений) для каждой переменной выбираем равным количеству уровней значений по плану факторного эксперимента. В данном случае количество термов для $\rho[n]$ равно 5 и для $\Sigma[n]$ – 4. Функции принадлежности (ФП) mf_i координат вектора состояния $\rho[n]$, $\Sigma[n]$ аппроксимируем треугольной функцией (рис. 3).

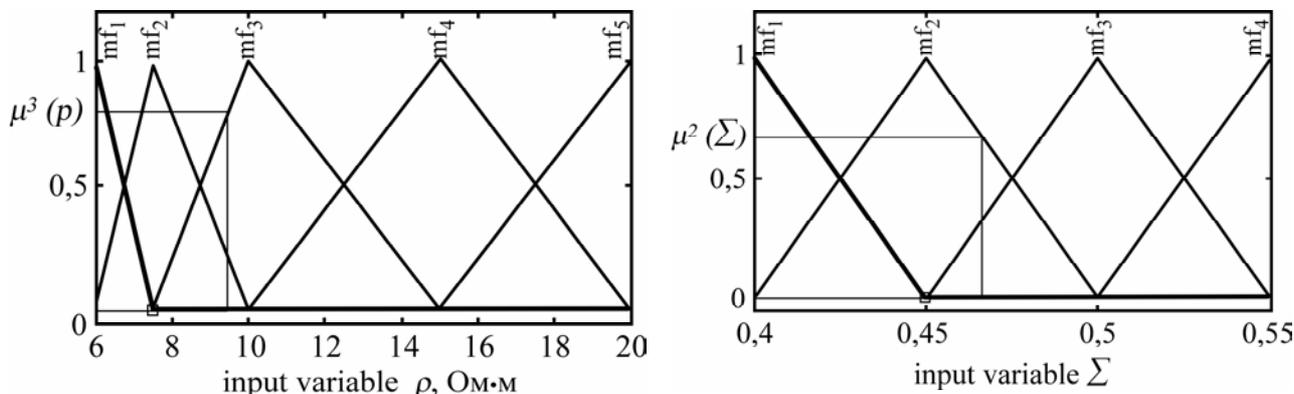


Рис. 3. Функции принадлежности $\rho[n]$, $\Sigma[n]$

База правил формируется на основе базы знаний, в качестве которой используем экспериментальные данные. База правил в виде нечетких логических уравнений, например:

если ($\rho = \text{trimf}[5,5 \ 6 \ 7,5]$) и ($\Sigma = \text{trimf}[0,35 \ 0,4 \ 0,45]$), то ($l = 0,047$), иначе ...

позволяет связать выходную переменную инверсной модели $l[n]$, которая является управляющим сигналом, и функции принадлежности координат вектора состояния $\rho[n]$, $\Sigma[n]$, в результате чего получим лингвистические значения управляющего воздействия.

Моделирование fuzzy-аппроксиматора проводим в среде MATLAB, используя пакет Fuzzy Logic Toolbox [10], который имеет простой интерфейс для проектирования и диагностики нечетких моделей. Графические средства Fuzzy Logic Toolbox дают возможность интерактивно отслеживать поведение системы. Результаты нечеткой аппроксимации инверсной модели электровзрывного преобразования энергии и зависимости статистических характеристик информационной координаты от положения объекта в факторном пространстве представлены на рис. 4 и 5.

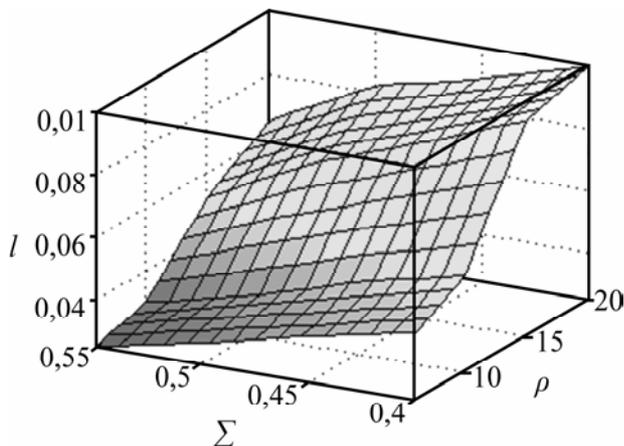


Рис. 4. Инверсная модель $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$

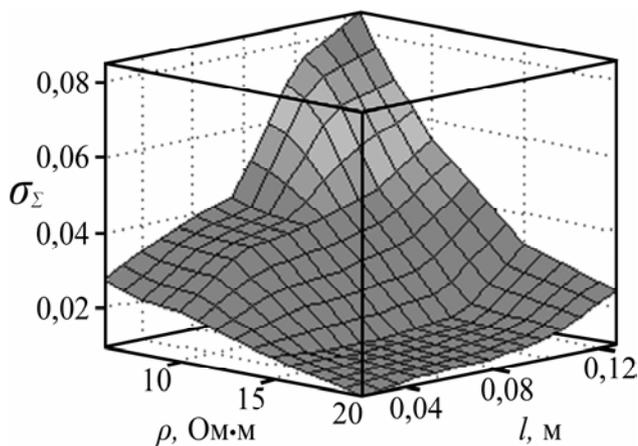


Рис. 5. Зависимость $\sigma_\Sigma = F(l[n], \rho[n])$

Структура адаптивной системы управления, синтезированной на основе инверсной модели, которая обеспечивает эффективное управление электровзрывным преобразованием энергии в условиях неопределенности внешних возмущений и параметров среды, показана на рис. 6. Система управления обеспечивает заданный режим работы объекта управления ОУ следующим образом. Из базы данных центральной системы управления высшего уровня в подсистему адаптивного управления электровзрывным преобразованием энергии поступает заданное для выбранного режима работы значение информационной координаты $\Sigma_{\text{зад}}$, которое необходимо поддерживать для обеспечения технологического результата в условиях действия внешних возмущений, поступающих по управляющему каналу $l_b(t)$ и ненаблюдаемых ξ . Нечеткая инверсная модель $l[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$ вычисляет и подает на регулятор Р необходимое значение управляющего воздействия, которое с помощью исполнитель-

ного механизма ИМ локального уровня обеспечит соответствующее значение координаты l при текущем состоянии контролируемых параметров объекта, в данном случае – удельного сопротивления жидкости ρ , значение которого поступает от датчика системы локального уровня на вход инверсной модели.

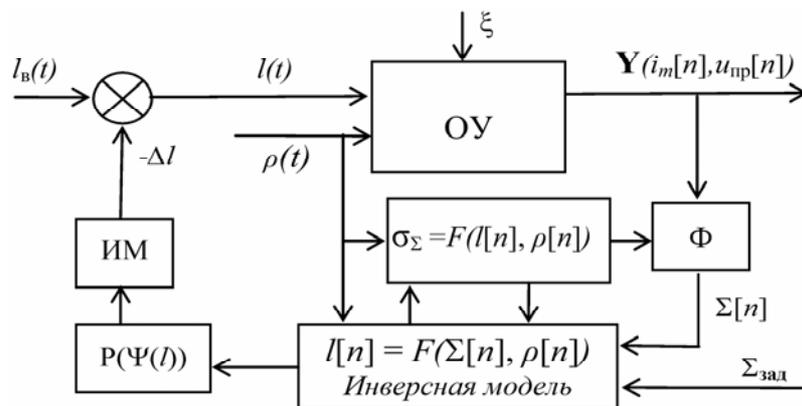


Рис. 6. Блок-схема адаптивной системы управления на основе инверсной модели

С целью учета допустимого для текущего состояния объекта управления отклонения информационной координаты $\Sigma[n]$ за счет стохастического характера процесса в систему управления введена дополнительная модель статистических характеристик информационных координат объекта, которые зависят от текущего положения объекта в пространстве состояний $\sigma_{\Sigma} = F(l[n], \rho[n])$. На вход этой нечеткой модели подаются значения координат входного вектора: $l[n]$ – с выхода инверсной модели, $\rho[n]$ – с датчика системы локального уровня. Допустимое для данного режима значение среднеквадратичного отклонения σ_{Σ} информационной координаты, вычисленное с помощью модели, поступает на вход адаптивного устройства оценки выходного сигнала Φ для корректировки алгоритма обработки информационного сигнала $\Sigma[n]$ с целью уменьшения дисперсии. Из регулятора P сигнал поступает на локальный уровень управления исполнительным механизмом ИМ, который обеспечит соответствующее значение координаты $l[n]$ при текущем состоянии контролируемых параметров объекта и действии внешних возмущений.

Важным свойством системы управления на базе инверсной модели является то, что она обеспечивает необходимые режимы при любом положении объекта в пространстве состояний.

Подсистема управления электровзрывным преобразованием энергии в разрядном контуре ГИТ на базе нечеткой инверсной модели реализована на промышленных контроллерах фирмы Атмел – ATmega16, которые имеют удовлетворительное соотношение показателей быстродействие / энергопотребление. Разработанная адаптивная система управления внедрена на электрогидроимпульсных установках для удаления формовочных смесей из тонко- и толстостенных стальных, чугуновых, алюминиевых отливок любой степени сложности массой от 100 г до 200 т, созданных в Институте импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований электровзрывное преобразование энергии, используемое в разрядно-импульсных технологиях, отнесено к многомерным дискретно-непрерывным нормальным стохастическим системам с выходными координатами в виде случайных функций, нестационарных по математическому ожиданию, которые действуют в условиях неопределенности параметров среды и внешних возмущений. Стохастический характер процесса, зависимость статистических характеристик от технологических параметров и параметров среды, наличие неопределенностей внешних возмущений показало необходимость и актуальность задач синтеза адаптивных систем управления электровзрывным преобразованием энергии на основе использования элементов искусственного интеллекта, а именно с использованием инверсных нечетких моделей для обеспечения механизма адаптации.

Синтезирована нечеткая инверсная модель электровзрывного преобразования энергии на основе fuzzy-аппроксимации с использованием экспериментальных данных в качестве базы знаний для формирования базы правил, которая гарантирует нахождение такого значения управляющего воздействия по координате $l[n]$, которое обеспечивает необходимое значение выходной координаты $\Sigma[n]$ для заданного режима работы в условиях неопределенности внешних возмущений, при текущем состоя-

нии контролируемых параметров объекта, в данном случае – удельного сопротивления жидкости ρ : $I[n] = F(\Sigma[n], \rho[n])$.

Построена нечеткая модель зависимости статистических характеристик электровзрывного преобразования энергии, а именно среднестатистического отклонения информационной координаты σ_Σ от положения объекта в пространстве состояний $\sigma_\Sigma = F(I[n], \rho[n])$, использование которой в системе управления дает возможность расширить зону управляемости и повысить точность, придает системе управления свойство адаптивности.

Синтезирована адаптивная система управления электровзрывным преобразованием энергии на основе нечеткой инверсной модели объекта управления, позволяющей обеспечить заданные режимы в условиях неопределенности при изменении технологических параметров, параметров среды и действия внешних возмущений во всем пространстве состояний объекта управления. Благодаря внедрению разработанной адаптивной системы управления удалось повысить производительность разрядно-импульсной технологии очистки литья, в которой используется электровзрывное преобразование энергии, на 15–20%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Научные основы разрядно-импульсных технологий*. Киев: Наук. думка, 1990. 208 с.
2. Вовк И.Т., Овчинникова Л.Е., Назарова Н.С., Козырев С.С. Синтез модели управления режимом высоковольтного разряда в жидкости. *Сб. научных трудов. УДМТУ*. 2000, (1), 128–135.
3. Козырев С.С. Адаптивна система керування високовольтним електротехнічним комплексом з ієрархічною архітектурою для розрядно-імпульсних технологій. *Праці Луганського відділення Міжнародної Академії інформатизації*. 2007, (15), 78–81.
4. Вовченко А.И., Козырев С.С., Назарова Н.С. Корреляционный анализ процессов предпробойной стадии электроимпульсного преобразования энергии. *Техн. електродинаміка*. 2005, (4), 3–7.
5. Блинцов В.С., Козырев С.С. Автоматическое управление электродной системой электрогидроимпульсной установки с асинхронным электроприводом. *Електромашинобудування та електрообладнання. Тем. вип. «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика»*. Київ: Техніка, 2006, (66), 88–89.
6. Назарова Н.С., Козырев С.С. Разработка адаптивного фильтра информационного сигнала системы управления электрогидроимпульсной установки. *Збірник наукових праць НУК*. 2004, (4), 124–130.
7. Блинцов В.С., Козырев С.С. Регулирование электрогидроимпульсных установок при изменяющейся электропроводности жидкости. *Збірник наукових праць НУК*. 2006, (3), 141–146.
8. Кривицкий Е.В., Шамко В.В. *Переходные процессы при высоковольтном разряде в воде*. Киев: Наук. думка, 1979. 208 с.
9. Володарский Е.Т., Малиновский Б.Н., Туз Ю.М. *Планирование и организация измерительного эксперимента*. Киев: Вища школа, 1987. 280 с.
10. Леоненков А.В. *Нечеткое моделирование в среде MATLAB и FuzzyTECH*. СПб.: БХВ-Петербург, 2003. 736 с.

Поступила 30.09.11

Summary

The research of discharge pulse technology as an object of control was done. The fuzzy inverse model of control of discharge energy conversion was developed. The model is based on experimental data with fuzzy approximation. The fuzzy inverse model provides adaptability of control system under variable technological parameters and external conditions. Application of developed adaptive control system provides enhancement of efficiency of discharge pulse technology up to 15–20%.