

УДК 681.5

В. Ц. ЗОРИКТУЕВ, И. Ф. МЕСЯГУТОВ, С. Г. ГОНЧАРОВА**АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ
НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ**

Предложена модель для математического описания поведения процесса резания в пространстве состояния в условиях нечеткой исходной информации. Приведен синтез алгоритма оперативного принятия решений по выбору режимов механообработки в условиях нескомпенсированной неопределенности методами адаптивного управления. Проанализированы результаты имитационного моделирования работы адаптивной системы стабилизации главной составляющей силы резания при точении. *Автоматизация; управление в условиях неопределенности; адаптивная система управления; процесс механообработки; робастность; нечеткая модель*

Проблемы создания высокоэффективного автоматизированного механообрабатывающего производства обусловлены сложностью процесса резания (ПР) как объекта управления (ОУ) из-за стохастичности, нелинейности, нестационарности, многосвязности его моделей, многорежимности, неопределенности его поведения, дефицита априорной и апостериорной информации, возмущений, действующих в технологической системе.

Управление ПР, предназначенное для автоматической коррекции режимов, сталкивается с необходимостью решения двух задач:

- задачи снижения априорной неопределенности знаний об объекте за счет использования оперативной информации от средств измерения и построения контура адаптации;
- задачи формирования закона управления, гарантирующего устойчивость и заданные показатели точности и качества системы управления (СУ) в условиях нескомпенсированной (апостериорной) неопределенности.

Один из путей к преодолению указанных проблем состоит в развитии многоуровневых иерархических СУ, в основу которых заложена концепция сочетания методов адаптивного, робастного и интеллектуального управления.

**АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ РЕЗАНИЯ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Проведенный с помощью методологии SADT и стандарта IDEF1X системный анализ

показал, что проблемы управления ПР в информационном аспекте обусловлены неполнотой и недостоверностью априорных и апостериорных знаний о предметной области. При этом выявлены следующие виды неопределенностей моделей ПР: структурные, функциональные, параметрические, сигнальные и неопределенности начальных условий. Понятие параметрической неопределенности совпадает с общепринятым определением. Под сигнальными неопределенностями в работе следует понимать неопределенности всех сигналов в СУ, передающихся по каналам обратной связи и по каналам управления. Функциональные неопределенности — это неточно известные или неоднозначные статические характеристики моделей объектов. Структурные — это неопределенности порядка дифференциальных уравнений в динамической модели.

Сигнальные неопределенности определяются помехами в каналах при передаче информации, погрешностью измерения физических величин ПР и восстановления переменных вектора состояния ПР, дефицитом средств измерения, неполной наблюдаемостью СУ. Структурные, функциональные, параметрические неопределенности и неопределенности начальных условий обусловлены дефицитом, недостоверностью и противоречивостью исходных данных, применяемых для построения модели; неадекватностью модели в результате ее распространения на новый технологический процесс, при упрощении модели путем линеаризации, путем по-

нижения порядка дифференциальных уравнений, а также в результате сведения многомерной модели к одномерной с ограниченным числом учитываемых переменных ПР.

В настоящее время известен целый ряд методов управления неопределенными объектами. Однако область применения каждого из них ограничена определенными условиями. Так, например, применение в СУ ПР метода оптимального в среднем управления пучками траекторий, метода гарантирующего управления, метода оптимального управления с обратной связью по неполному вектору состояний [5] ориентировано на процессы с моделями, характеризующимися лишь одним из перечисленных видов неопределенностей. Реализация стохастических методов управления [3] упирается в проблему вариаций статистических характеристик случайных процессов, имеющих место в моделях ПР. Синтез регуляторов, в том числе И, ПИ закона, методами «жесткого управления», модифицированными интервальными вычислениями или функциями риска [3], эффективен в случае, когда структура модели априори известна, а параметры модели могут иметь отклонения от расчетных не более чем в два раза, в то время как для ПР характерны колебания коэффициента передачи и постоянных времени в 10 раз и выше.

При ограниченных уровнях сигнальных и параметрических возмущений можно прибегнуть к методам робастного управления [9]. Если же коэффициент передачи и постоянные времени ПР изменяются более чем в 2–3 раза, то эти методы не обеспечивают приемлемые показатели качества СУ и, следовательно, не применимы. Необходимо искать пути по снижению этой неопределенности.

Методы решения проблемы, связанной со снижением априорной неопределенности, сочетающие изучение и управление объектом, были получены в 70–80-х годах и приведены в работах [1, 3, 4] и др., ставших классикой адаптивного управления. На сегодняшний день синтез известных адаптивных СУ (АдСУ) ПР выполнен в классе беспереисковых самонастраивающихся систем. Классические беспереисковые методы [1, 3, 4] ориентированы на управление объектами, для моделей которых справедливы определенные допущения: отсутствует паразитная динамика, т. е. порядок дифференциальных уравнений модели соответствует динамике реального объекта, выходная координата объекта считается измеряемой, а весь вектор состояния — восстанавливаемым (наблюдаемым). Кроме то-

го, темпы процессов, происходящих в контуре адаптации и настраиваемом контуре, согласованы, т. е. считается, что при синтезированных алгоритмах адаптивного управления возмущения не могут привести к частичной потере координации работы контуров. Также предполагается, что сформированный закон управления полностью компенсирует априорные неопределенности, так что вся АдСУ в комплексе может рассматриваться как детерминированный объект, где нет места случайным процессам, а возмущения можно сравнить с неизвестными уравнений, которые однозначно разрешимы в процессе функционирования системы.

Однако нестационарные свойства моделей ПР, их переменная структура, значительные погрешности измерения выходных переменных указывают на то, что эти допущения выполняются не всегда.

В этом случае возникает необходимость в одновременном преодолении проблем снижения неопределенности знаний о ПР и сохранения работоспособности СУ в условиях неснятой неопределенности.

Один из возможных путей совместного решения указанных проблем открывают развивающиеся методы адаптивного робастного управления [4, 6]. Эти методы нацелены на формирование управляющего сигнала, который позволяет частично скомпенсировать априорные неопределенности; обеспечивает ограниченность всех сигналов в замкнутой системе; реализует выполнение критерия качества управления в виде целевого неравенства [4, 6]. Особенности постановки задачи робастного управления являются смягчающие требования к показателям устойчивости, точности и качества управления, которые предполагают не поиск экстремума целевой функции (или целевого функционала), а обеспечение сходимости значений целевой функции (или целевого функционала) в пределе к некоторому ограниченному инвариантному множеству.

В связи с этим синтез СУ ПР целесообразно реализовать в классе адаптивных робастных систем.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ О ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ

С целью возможности описания случайных величин и случайных процессов инвариантно к их закону распределения, с целью фиксации уровня дефицита информации, с

целью формализации знаний о ПР, характеризующихся преимущественно эмпирическими и эвристическими экспертными данными, а также с целью решения вопросов управляемости и наблюдаемости системы авторами предложена следующая математическая модель для описания поведения ПР [10].

Уравнения состояния:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 = \bar{z}_1 = \bar{F}_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u_1, u_2, \dots, u_m, \\ \bar{\theta}_1^1, \bar{\theta}_2^1, \dots, \bar{\theta}_r^1, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t), (\mu_{\bar{S}}(1)); \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_n = \bar{z}_n = \bar{F}_n(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, u_1, u_2, \dots, u_m, \\ \bar{\theta}_1^n, \bar{\theta}_2^n, \dots, \bar{\theta}_r^n, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t), (\mu_{\bar{S}}(n)). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_1 = \bar{G}_1(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \bar{\theta}_{(r+2)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1, \\ u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t); \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{y}_l = \bar{G}_l(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{\theta}_{(r+1)}^l, \bar{\theta}_{(r+2)}^l, \dots, \bar{\theta}_\rho^l, \\ u_1, u_2, \dots, u_m, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k, t). \end{aligned}$$

Начальные условия:

$$\bar{x}_1(0) = \bar{D}_1, \quad \bar{x}_2(0) = \bar{D}_2, \quad \dots \quad \bar{x}_n(0) = \bar{D}_n,$$

где $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n$ — нечеткие переменные [2] вектора состояния; u_1, u_2, \dots, u_m — управляющие переменные, принимающие четкие значения; $\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k$ — точно неизвестные возмущения со стороны внешней среды; $\bar{\theta}_1^1, \dots, \bar{\theta}_r^1, \dots, \bar{\theta}_1^n, \dots, \bar{\theta}_r^n, \bar{\theta}_{(r+1)}^1, \dots, \bar{\theta}_\rho^1, \dots, \bar{\theta}_{(r+1)}^l, \dots, \bar{\theta}_\rho^l$ — нечеткие параметры модели; $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_l$ — нечеткие выходные переменные; $\bar{F}_1, \bar{F}_2, \dots, \bar{F}_n, \bar{G}_1, \bar{G}_2, \dots, \bar{G}_l$ — нечеткие функции; t — время; $\mu_{\bar{S}}(1), \mu_{\bar{S}}(2), \dots, \mu_{\bar{S}}(n)$ — показатели структурных неопределенностей модели.

Переменные $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n, \bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_k$ и $\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_l$ отражают сигнальные неопределенности. Взаимосвязь между конкретной переменной и временем представлена нечеткими отношениями (НО): $\bar{x}_i(t) = \{t, x_i / \mu_{\bar{x}_i}(t, x_i)\}$, $\bar{f}_q(t) = \{t, f_q / \mu_{\bar{f}_q}(t, f_q)\}$, $\bar{y}_c(t) = \{t, y_c / \mu_{\bar{y}_c}(t, y_c)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, $q = 1, 2, \dots, k$, $c = 1, 2, \dots, l$, а разброс значений указанных переменных в фиксированный момент времени выражен нечеткими множествами (НМ): $\bar{x}_i = \{x_i / \mu_{\bar{x}_i}(x_i)\}$, $\bar{f}_q = \{f_q / \mu_{\bar{f}_q}(f_q)\}$, $\bar{y}_c = \{y_c / \mu_{\bar{y}_c}(y_c)\}$, где $\mu_{\bar{x}_i}, \mu_{\bar{f}_q}, \mu_{\bar{y}_c}$ — функции принадлежности (ФП), x_i, f_q, y_c — значения из универсальных множеств.

Параметрические неопределенности формализованы либо НМ $\bar{\theta}_j^i = \{\theta_j^i / \mu_{\bar{\theta}_j^i}(\theta_j^i)\}$,

$j = 1, 2, \dots, r$, если модель ПР рассматривается как стационарная, либо НО $\bar{\theta}_j^i(t) = \{t, \theta_j^i / \mu_{\bar{\theta}_j^i}(t, \theta_j^i)\}$, если имеет место нестационарная модель ОУ.

Функциональные неопределенности модели ПР формализованы в качестве НО

$$\bar{F}_i = \left\{ \begin{array}{l} z_i, (x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, \\ \theta_1^i, \dots, \theta_r^i, f_1, \dots, f_k) / \\ \mu_{\bar{F}_i}(F_i, z_i, x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, \\ \theta_1^i, \dots, \theta_r^i, f_1, \dots, f_k) \end{array} \right\}$$

и

$$\bar{G}_c = \left\{ \begin{array}{l} y_c, (x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, \\ \theta_{(r+1)}^c, \dots, \theta_\rho^c, f_1, \dots, f_k) / \\ \mu_{\bar{G}_c}(G_c, y_c, x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, \\ \theta_{(r+1)}^c, \dots, \theta_\rho^c, f_1, \dots, f_k) \end{array} \right\},$$

где F_i, G_c — четкие функции.

Неопределенности начальных условий описаны НМ $\bar{D}_i = \{x_i / \mu_{\bar{D}_i}(x_i)\}$, а структурные — НМ $\bar{S} = \{s / \mu_{\bar{S}}(s)\}$, где $s = 1, 2, \dots, n$ — порядковый номер переменной вектора состояния.

Наиболее эффективно функцию принадлежности (ФП) задать аналитической зависимостью [8]

$$\begin{aligned} \mu_{\bar{x}}(x) = \\ = \left\{ \left(b_{1\bar{x}}(a_{\bar{x}} - x) \right)^{v_{1\bar{x}}} \frac{\text{sign}(b_{1\bar{x}}(a_{\bar{x}} - x)) + 1}{2} + \right. \\ \left. + \left(b_{2\bar{x}}(x - a_{\bar{x}}) \right)^{v_{2\bar{x}}} \frac{\text{sign}(b_{2\bar{x}}(x - a_{\bar{x}})) + 1}{2} + \right. \\ \left. + 1 \right\}^{-1}. \quad (3) \end{aligned}$$

В формуле (3) коэффициент $a_{\bar{x}}$ представляет моду ФП, коэффициенты $b_{1\bar{x}}$ и $b_{2\bar{x}}$ задают ширину ФП, $v_{1\bar{x}}, v_{2\bar{x}}$ — наклон ФП к оси x , т. е. контрастность.

Параметрическое представление ФП позволяет получить любую форму ФП, количественно оценить нечеткость информации, повысить скорость и гибкость оперирования нечеткой информацией, обрабатывая при этом не все элементы НМ, а только пять параметров. В свою очередь, количественная оценка нечеткости априорной информации позволяет обоснованно подойти к выбору принципа и метода управления, а также является составной частью критерия качества СУ при

формировании управляющего воздействия на ПР.

Так, например, значения коэффициентов ФП переменных вектора состояния $b_{1\bar{x}i} = \infty, b_{2\bar{x}i} = \infty, v_{1\bar{x}i} = \infty, v_{2\bar{x}i} = \infty$ при $\forall i = 1, 2, \dots, n$ означают четкое множество, что указывает на полную наблюдаемость СУ без погрешности оценки состояния. В этом случае можно формировать закон управления с полной обратной связью по вектору состояния. При $\forall i = 1, 2, \dots, n, b_{1\bar{x}i} = 0, b_{2\bar{x}i} = 0$ СУ полностью ненаблюдаема, т.е. система является разомкнутой по состоянию. В этом случае применимо, например, оптимальное программное управление (принцип максимума Понтрягина). Условия $\exists(i = 1 \dots n, j = 1 \dots r) \frac{1}{b_{2\bar{\theta}j}^i |a_{\bar{\theta}j}^i|} > 1$ и $v_{2\bar{\theta}j}^i < 8$ или $b_{1\bar{\theta}j}^i |a_{\bar{\theta}j}^i| < 2$ и $v_{1\bar{\theta}j}^i < 8$ показывают, что значения параметров модели могут отклоняться от номинальных более чем в два раза. СУ ПР с таким уровнем параметрической неопределенности следует синтезировать в классе Ад-СУ. Если $\forall(i = 1 \dots n, j = 1 \dots r, \varsigma = 1 \dots l) b_{1\bar{\theta}j}^i = \infty, b_{2\bar{\theta}j}^i = \infty, v_{1\bar{\theta}j}^i = \infty, v_{2\bar{\theta}j}^i = \infty, b_{1\bar{F}i} = \infty, b_{2\bar{F}i} = \infty, v_{1\bar{F}i} = \infty, v_{2\bar{F}i} = \infty, b_{1\bar{G}\varsigma} = \infty, b_{2\bar{G}\varsigma} = \infty, v_{1\bar{G}\varsigma} = \infty, v_{2\bar{G}\varsigma} = \infty$, то модель ОУ детерминирована и вполне применимо «жесткое» управление.

Пример. В соответствии с формальным описанием ОУ (1), (2), (3) на основе эмпирических данных, полученных в УГАТУ, РГАТА, ЭНИМС [7], идентифицирована нечеткая модель течения (4), предназначенная для управления силой резания.

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_1 &= \bar{z}_1 = \bar{\theta}_1^1 \otimes \bar{x}_2, (\mu_{\bar{z}}(1) = 1); \\ \dot{\bar{x}}_2 &= \bar{z}_2 = \bar{\theta}_1^2 \otimes \bar{x}_1 \oplus \bar{\theta}_2^2 \otimes \bar{x}_2 \oplus \\ &\quad \oplus \bar{\theta}_3^2 \otimes u^* \bar{\theta}_4^2, (\mu_{\bar{z}}(2) = 1); \\ \bar{y} &= \bar{\theta}_5^1 \otimes \bar{x}_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Управляющей переменной u здесь является минутная подача, выходной переменной \bar{y} – главная составляющая силы резания, нечеткие параметры $\bar{\theta}_1^1, \bar{\theta}_1^2, \bar{\theta}_2^2, \bar{\theta}_3^2, \bar{\theta}_4^2, \bar{\theta}_5^1$ выражают изменяющиеся физико-механические свойства инструментального и обрабатываемого материалов, глубину резания, геометрию режущей части инструмента и его износ, жесткость системы «станок–приспособление–инструмент–деталь», марку СОЖ и т.д.

Для обрабатываемого материала ХН77ТЮР, инструментального материала Т15К6, геометрии реза: $\gamma = 5^\circ, \alpha = \alpha_1 = 10^\circ, \lambda = 0^\circ, \varphi =$

$= \varphi_1 = 45^\circ, r = 0,5$ мм при полустойковой обработке параметры НМ модели могут принимать значения:

$$\begin{aligned} a_{\bar{\theta}_1^1} &= a_{\bar{\theta}_5^1} = 1, & a_{\bar{\theta}_1^2} &= -307,7, \\ a_{\bar{\theta}_2^2} &= -47,7, & a_{\bar{\theta}_3^2} &= 20512,8, \\ a_{\bar{\theta}_4^2} &= 0,75, & b_{2\bar{\theta}_1^2} &= 0,056, \\ b_{1\bar{\theta}_1^2} &= 0,07, & v_{1\bar{\theta}_1^2} &= 7, \\ v_{2\bar{\theta}_1^2} &= 8, & b_{2\bar{\theta}_2^2} &= 0,37, \\ b_{1\bar{\theta}_2^2} &= 0,435, & v_{1\bar{\theta}_2^2} &= 7, \\ v_{2\bar{\theta}_2^2} &= 8, & b_{1\bar{\theta}_4^2} &= 50, \\ b_{2\bar{\theta}_4^2} &= 50, & v_{1\bar{\theta}_4^2} &= 8, \\ v_{2\bar{\theta}_4^2} &= 8, & b_{1\bar{\theta}_3^2} &= 0,000536, \\ b_{2\bar{\theta}_3^2} &= 0,000487, & v_{1\bar{\theta}_3^2} &= 10, \\ v_{2\bar{\theta}_3^2} &= 6, & b_{1\bar{\theta}_1^1} &= b_{2\bar{\theta}_1^1} = \\ &= b_{1\bar{\theta}_5^1} = b_{2\bar{\theta}_5^1} = \infty, & v_{1\bar{\theta}_1^1} &= v_{2\bar{\theta}_1^1} = \\ &= v_{1\bar{\theta}_5^1} = v_{2\bar{\theta}_5^1} = \infty, & b_{1\bar{x}1} &= 0,08, \\ b_{2\bar{x}1} &= 0,026, & b_{1\bar{x}2} &= 0,002, \\ b_{2\bar{x}2} &= 0,002, & d_{1\bar{F}2} &= d_{2\bar{F}2} = 0,02, \\ v_{1\bar{x}1} &= v_{2\bar{x}1} = v_{1\bar{x}2} = & v_{2\bar{x}2} &= \lambda_{1\bar{F}2} = \lambda_{2\bar{F}2} = 8, \\ d_{1\bar{F}1} &= d_{2\bar{F}1} = & \lambda_{1\bar{F}1} &= \lambda_{2\bar{F}1} = \infty, \\ d_{1\bar{G}} &= d_{2\bar{G}} = & \lambda_{1\bar{G}} &= \lambda_{2\bar{G}} = \infty. \end{aligned}$$

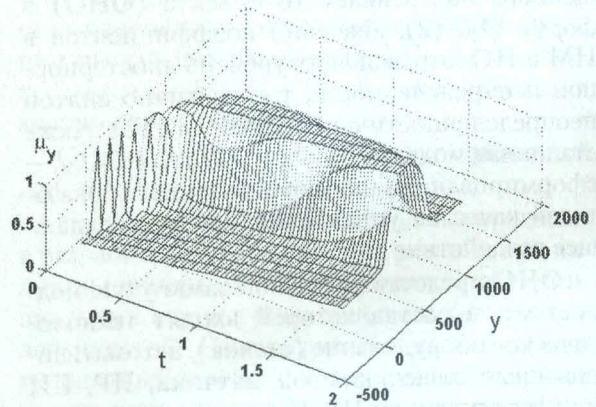


Рис. 1. Нечеткий переходный процесс $\bar{y}(t) = \bar{x}_1(t)$ при управлении силой резания P_z .

Из расчетов по модели и графика нечетких переходных процессов (рис. 1) видно, что вариации изменения силы резания в пределах одного технологического перехода в обычных технологических условиях могут составлять 40% и более. Причем показатели качества и точности СУ определяются не только наиболее вероятными временными характеристиками $a_{\bar{x}i}(t), a_{\bar{y}i}(t)$, но и параметрами нечеткости $b_{1\bar{x}i}(t), b_{2\bar{x}i}(t), b_{1\bar{y}}(t), b_{2\bar{y}}(t)$, полученными

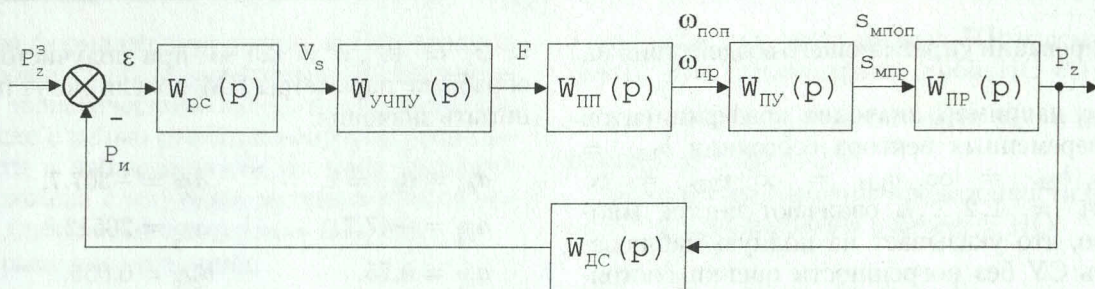


Рис. 2. Структурная схема ОНО при управлении силой резания P_z : РС — регулятор силы, ПП — приводы подачи, ПУ — передаточное устройство, ДС — датчик силы, P_z , Н — главная составляющая силы резания, V_s , мм/мин — контурная скорость, F — код подачи, $\omega_{пр}$, $\omega_{поп}$, рад/с — частоты вращения приводов подачи, $S_{мпр}$, $S_{мпоп}$, мм/мин — продольная и поперечная минутные подачи

при решении дифференциальных уравнений. Снизить нечеткость знаний об объекте и, соответственно, улучшить показатели качества управления можно путем максимизации значений $b_{1\bar{x}i}(t)$, $b_{2\bar{x}i}(t)$, $b_{1\bar{y}}(t)$, $b_{2\bar{y}}(t)$. Эта идея заложена в основу приведенного ниже алгоритма управления режимами ПР.

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ МЕХАНООБРАБОТКИ МЕТОДАМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Синтез закона управления выполнен для линеаризованной модели ПР. Исходной информацией при этом является модель обобщенного настраиваемого объекта (ОНО) в форме (1), (2), значения коэффициентов в НМ и НО, отражающих уровень апостериорной неопределенности, т. е. частично снятой неопределенности с помощью АдСУ, а также эталонная модель (ЭМ): $\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m$, — сформированная на основе заданных показателей качества управления, где u_m — задающее воздействие системы.

ОНО представляет собой замкнутую подсистему, в состав которой входят технологическое оборудование (станок), автоматизированный электропривод, датчики, ПР, ПИ или И регуляторы ПР. Например, при управлении силой резания P_z структурная схема ОНО представлена на рис. 2.

Входным сигналом для ОНО $u = P_z^3$ является управляющий сигнал с контура адаптации.

С точки зрения минимальной сложности и с учетом ограничений на полученный управляющий сигнал и скорость его изменения среди методов адаптивного управления с робастными свойствами для формирования режимов обработки деталей на станках с ЧПУ выбран дискретизированный алгоритм ско-

ростного градиента (АСГ) в параметрической форме с ПИ законом в контуре самонастройки [4, 6].

В данной работе предлагается распространить АСГ на управление объектами с нечеткой моделью типа (1),(2). При этом сигнал управления формируется на основе целого множества значений переменных состояния, возможных при вариации поведения ОНО. Кроме того, модель (1),(2) играет роль усредняющего сглаживающего фильтра и благодаря этому позволяет свести свойства ОНО к условиям, при которых гарантирована работоспособность классических алгоритмов адаптивного управления. Синтез закона управления на основе нечеткой модели дополнительно усиливает робастность АСГ с целью сохранения ограниченности фазовых траекторий в определенной области в условиях нескомпенсированной неопределенности знаний о ПР.

С целью улучшения качества и точности формирования переходных процессов в СУ реализован алгоритм принятия решений по выбору компромиссного управляющего сигнала управления путем его встраивания в алгоритмы управления.

При построении АдСУ использованы два варианта критериев. Первый критерий $J_1 \rightarrow \min$ означает минимизацию среднего отклонения переменных вектора состояния реального поведения ОНО от эталона. Второй критерий $J_2 \rightarrow \min$ показывает разброс значений выходной переменной ОНО. Если провести аналогию между нечеткой системой и стохастической, то первый критерий можно сравнить с минимизацией математического ожидания ошибки в стохастической системе, а второй — с минимизацией дисперсии ошибки.

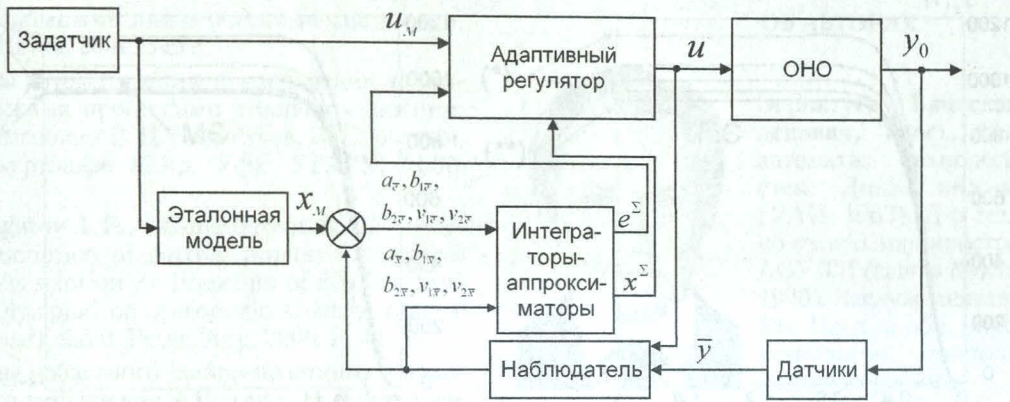


Рис. 3. Структурная схема АдСУ ПР

Модифицированный закон управления имеет вид:

$$u = k_u(t)u_M(t) + \sum_{i=1}^n k_x^\Sigma(t)x_i^\Sigma(t), \quad (5)$$

$$k_{x1}^\Sigma[t+1] = k_{x1}^\Sigma[t](1 - \omega\gamma_3) + \omega(\gamma_5 - \gamma_4)\delta^*[t]x_1^\Sigma[t] - \omega\gamma_5\delta^*[t+1]x_1^\Sigma[t+1], \quad (6)$$

$$k_{xn}^\Sigma[t+1] = k_{xn}^\Sigma[t](1 - \omega\gamma_3) + \omega(\gamma_5 - \gamma_4)\delta^*[t]x_n^\Sigma[t] - \omega\gamma_5\delta^*[t+1]x_n^\Sigma[t+1], \quad (7)$$

$$k_u[t+1] = k_u[t](1 - \omega\gamma_1) + \omega(\gamma_6 - \gamma_2)\delta^*[t]u_M[t] - \omega\gamma_6\delta^*[t+1]u_M[t+1], \quad (8)$$

где $t = m\omega, \omega > 0$ — шаг дискретизации, $m = 0, 1, 2, \dots, m_t$; $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6\}$ — параметры адаптивного регулятора; $e_i^\Sigma = \int_{X_i} (x_i - x_{iM})\mu_{\bar{e}_i}(e_i) dx_i$ — рассогласование между переменными вектора состояния и эталонными переменными состояния, если синтез осуществляется по первому критерию или $e_i^\Sigma = \begin{cases} \int_{X_i} (x_i - a_{\bar{i}i})\mu_{\bar{e}_i}(e_i) dx_i & \text{при } x_i \neq a_{\bar{i}i}, \\ (a_{\bar{i}i} - x_{iM}) & \text{при } x_i = a_{\bar{i}i}, \end{cases}$ если рассматривается второй критерий; $\mu_{\bar{e}_i}(e_i) = \varphi_1(e_i, a_{\bar{e}_i}, b_{1\bar{e}_i}, b_{2\bar{e}_i}, v_{1\bar{e}_i}, v_{2\bar{e}_i})$ — ФП

ошибки; φ_1 — аналитический вид ФП в форме (3); $a_{\bar{e}_i} = a_{\bar{x}_i} - x_{iM}, v_{1\bar{e}_i} = v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{e}_i} = v_{2\bar{x}_i}, b_{1\bar{e}_i} = b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{e}_i} = b_{2\bar{x}_i}; x_i^\Sigma = \int_{X_i} x_i dx_i$ — интегрированная переменная вектора состояния; $\delta^*[t] = \sum_{i=1}^n h_i e_i^\Sigma$; h_i — коэффициенты, полученные из коэффициентов матрицы в решении уравнения Ляпунова и матрицы эталонной модели B_M .

Повысить скорость выработки управляющего воздействия до требуемого уровня предлагается путем аппроксимации вычисления интегральных переменных вектора состояния $x_i^\Sigma(t)$ и интегральных ошибок $e_i^\Sigma(t)$. В качестве переменных аппроксимирующей функции выступают параметры ФП: $a_{\bar{e}_i}, a_{\bar{x}_i}, v_{1\bar{e}_i}, v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{e}_i}, v_{2\bar{x}_i}, b_{1\bar{e}_i}, b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{e}_i}, b_{2\bar{x}_i}$, которые однозначно определяют $x_i^\Sigma(t)$ и $e_i^\Sigma(t)$.

Структурная схема синтезированной АдСУ ПР приведена на рис. 3.

На рис. 4 приведены переходные процессы в разработанной АдСУ силой резания при наличии априорных параметрических, функциональных, структурных и сигнальных неопределенностей. Рассматривался самый неблагоприятный режим с точки зрения нагрузок на режущий инструмент — процесс врезания. При этом изменение коэффициента передачи модели достигало 10 раз и более.

Возможность выбора компромиссного управляющего сигнала $u = P_2^3$, обеспечиваемого законом (5)–(8) в соответствии с критерием качества J_1 , как видно из рис. 4, а, уменьшает среднее отклонение переменных вектора состояния реального процесса от эталона на 15%, а по критерию J_2 (рис. 4, б) уменьшает разброс возможных значений P_2 в среднем на 20%.

При этом динамика изменения продольной минутной подачи, выступающей в каче-

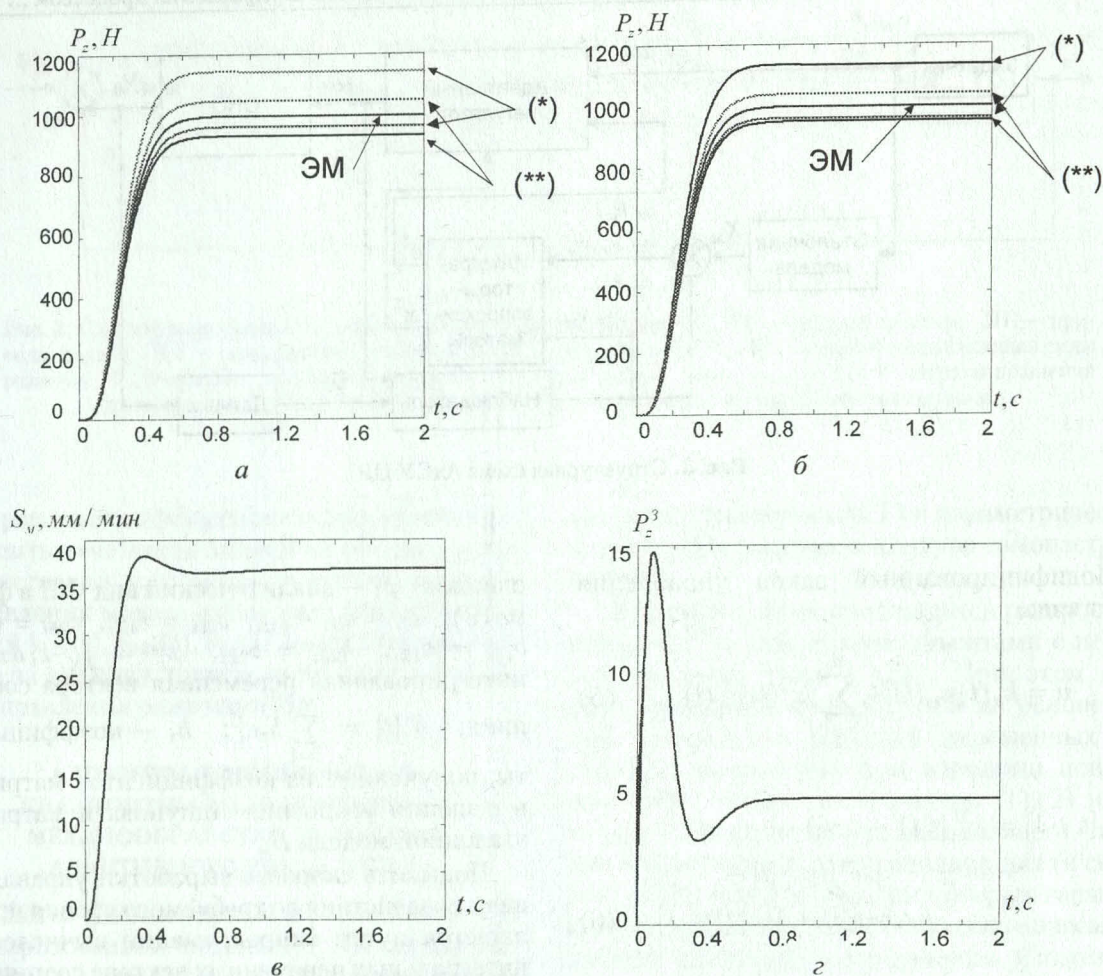


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования АдСУ силой резания: (*) — переходные процессы в СУ силой резания на основе АСГ; (**) — переходные процессы в СУ силой резания на основе модифицированного АСГ

стве компромиссного управляющего сигнала для ПР, отражена на рис. 4, в. Значения подачи удовлетворяют ограничениям. Сигнал управления с выхода адаптивного регулятора $u = P_z^3$, поступающий на ОНО в качестве задающего сигнала для подсистемы стабилизации силы резания, приведен на рис. 4, г.

ВЫВОДЫ

Предложенный в работе алгоритм, помимо частичного снятия параметрических и функциональных неопределенностей, позволяет сформировать наиболее приемлемый управляющий сигнал с точки зрения цели управления в условиях возможных вариаций проведения ОУ. Применение алгоритма в СУ ПР расширяет область их применения в производственных условиях при наличии широкого спектра возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Б. Н., Рутковский В. Ю., Крутова И. Н., Земляков С. Д. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления. М.: Машиностроение, 1972. 260 с.
2. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
3. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.
4. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 296 с.
5. Пантелеев А. В., Бортакровский А. С., Летова Т. А. Оптимальное управление в примерах и задачах: Учеб. пособие. М.: МАИ, 1996. 212 с.
6. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управ-

ление сложными динамическими системами.
СПб.: Наука, 2000. 549 с.

7. **Основы** автоматизации и управления технологическими процессами в машиностроении: Учеб. пособие / В. Ц. Зориктуев, Н. С. Буткин, А. Г. Схиртладзе и др. Уфа: УГАТУ, 2000. 406 с.
8. **Mesyagutov I. F., Goncharova S. G.** Formal description of cutting process for control problems solution // Preprints of 8th Int. Student Olympiad on Automatic Control (Baltic Olympiad). Saint-Petersburg, 2000. P. 41–45.
9. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 744 с.
10. **Зориктуев В. Ц., Гончарова С. Г., Месягутов И. Ф.** Система оптимального управления процессом механообработки // Инструмент и технологии. 2003. № 13–14. С. 45–49.

ОБ АВТОРАХ



Зориктуев Вячеслав Цыденович, проф., зав. каф. автоматиз. технологич. систем. Дипл. инж.-механик (УАИ, 1963). Д-р техн. наук по технол. машиностроения и АСУ ТП (защ. в Мосстанкин, 1990). Заслуж. деятель науки РБ. Иссл. в обл. управления технологич. процессами в машиностроении.



Месягутов Игорь Фаритович, доц. той же каф. Дипл. инж.-электромеханик (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук по автоматизац. и упр-ю технологич. процессами и производствами (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. идентификации и управления технологич. процессами в машиностроении.



Гончарова Светлана Геннадьевна, доц. той же каф. Дипл. инж.-электромеханик (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук по автоматизац. и упр-ю технологич. процессами и производствами (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. идентификации и управления технологич. процессами в машиностроении.