

С. Г. Гончарова, И. Ф. Месягутов

АДАПТИВНО-НЕЧЕТКИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ МЕХАНООБРАБОТКИ

Предложена модель для математического описания динамических объектов в пространстве состояний в условиях нечеткой исходной информации. Приведен алгоритм адаптивного управления на основе нечеткой динамической модели с робастными свойствами. *Адаптивное управление механообработкой; нечеткая динамическая модель в пространстве состояний; робастность*

ВВЕДЕНИЕ

Один из путей повышения эффективности авиационных и машиностроительных производств состоит во внедрении средств автоматизации и управления. Почти все современное механообрабатывающее оборудование оснащено системами ЧПУ, предполагающими обработку деталей по управляющей программе. Составление управляющей программы происходит на этапе технологической подготовки производства и характеризуется априорной неопределенностью знаний о процессе механообработки. Указанная неопределенность связана с дефицитом информации о возможных колебаниях припуска заготовки, о величине износа режущей кромки инструмента и его геометрии, об изменениях физико-механических свойств обрабатываемого и инструментального материалов. При этом режимы механообработки назначают исходя из наиболее нагруженных условий, которые составляют относительно небольшую долю времени от времени обработки деталей на технологической операции.

Частично снять априорную неопределенность позволяют системы управления (СУ), выполняющие автоматическую коррекцию режимов механообработки во время технологической операции на основе измеренных информативных физических величин: мощности, сил, термо-ЭДС, сигналов акустической эмиссии, электропроводимости контакта «инструмент-деталь» и т. д. Однако практика эксплуатации систем управления процессами механообработки с пропорционально-интегрально-дифференциальными регуляторами, с оптимальными, стохастическими, адаптивными законами управления показала недостаточную гибкость, т. е. ограниченную конкретным технологическим процессом область применения. Указанные системы сохраняют работоспособность при

соблюдении жестких ограничений на область вариаций структуры и параметров моделей процесса механообработки. Кроме того, управление процессом механообработки сталкивается с проблемами дефицита средств измерений, установленных на технологическом оборудовании, и с погрешностями измерения. Повышение эффективности управления процессом механообработки связано с решением следующих задач:

- оценка показателей неопределенностей;
- снижение (или компенсация) априорной неопределенности знаний о процессе за счет использования оперативной информации от средств измерения и построения контура адаптации;
- формирование такого закона управления, который бы гарантировал устойчивость и заданные показатели точности и качества СУ в условиях некомпенсированной (апостериорной) неопределенности.

Один из возможных путей решения указанных задач представляет совместное использование методов адаптивного, робастного и нечеткого управления [2, 3].

**1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДЛЯ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗНАНИЙ
О ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ
В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ
ИНФОРМАЦИИ**

Анализ свойств процесса механообработки как объекта управления (ОУ) показал, что его математическая модель должна позволять определять показатели неопределенностей, давать описание случайных величин и случайных процессов инвариантно к их закону распределения, представлять формализм для выражения экспертных знаний, богатых эмпирикой и эвристиками. В соответствии с представленными требованиями авторами предложена следующая

нечеткая линеаризованная математическая модель [4]:

- нечеткие уравнения состояния

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A} \otimes \bar{x} \oplus \bar{B} \otimes u, \mu_{\bar{s}}(s), \quad (1)$$

- нечеткие уравнения наблюдения

$$\bar{y} = \bar{C} \otimes \bar{x}, \quad (2)$$

- нечеткие начальные условия

$$\bar{x}_1(0) = \bar{D}_1, \bar{x}_2(0) = \bar{D}_2, \dots, \bar{x}_n(0) = \bar{D}_n, \quad (3)$$

где \otimes, \oplus – нечеткие операции соответственно умножения и сложения; u – управляющий сигнал (скаляр), принимающий четкие значения; $\bar{x} = \{\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_i, \dots, \bar{x}_n\}$ – вектор нечеткого состояния, $i = 1, 2, \dots, n$; $\bar{y} = \{\bar{y}_1, \bar{y}_2, \dots, \bar{y}_\zeta, \dots, \bar{y}_l\}$ – вектор нечетких выходных переменных, $\zeta = 1, 2, \dots, l$; $\mu_{\bar{s}}(s)$ – показатель нечеткого (изменяющегося) числа переменных состояния и представляющий вес s -го уравнения состояния;

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1^1 & \dots & \bar{A}_n^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \bar{A}_1^n & \cdot & \bar{A}_n^n \end{bmatrix}, \bar{B} = \begin{bmatrix} \bar{B}^1 \\ \dots \\ \bar{B}^n \end{bmatrix}, \bar{C} = \begin{bmatrix} \bar{C}_1^1 & \dots & \bar{C}_n^1 \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \bar{C}_1^l & \cdot & \bar{C}_n^l \end{bmatrix} -$$

матрицы нечетких коэффициентов модели.

Некоторая i -я переменная вектора состояния как функция времени t может быть представлена нечетким отношением (НО) [1, 3]: $\bar{x}_i(t) = \{t, x_i / \mu_{\bar{x}_i}(t, x_i)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, а в фиксированный момент времени указанная переменная может быть выражена нечетким множеством (НМ) [1, 3]: $\bar{x}_i = \{x_i / \mu_{\bar{x}_i}(x_i)\}$. Аналогичное описание имеет ζ -я выходная переменная:

$$\bar{y}_\zeta(t) = \{t, y_\zeta / \mu_{\bar{y}_\zeta}(t, y_\zeta)\}, \zeta = 1, 2, \dots, l,$$

$$\bar{y}_\zeta = \{y_\zeta / \mu_{\bar{y}_\zeta}(y_\zeta)\},$$

где $\mu_{\bar{x}_i}, \mu_{\bar{y}_\zeta}$ – функции принадлежности (ФП); x_i, y_ζ – значения из универсальных множеств. Элементы матриц $\bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ заданы НМ:

$$\bar{A}_1^1 = \{A_1^1 / \mu_{\bar{A}_1^1}(A_1^1)\}, \dots, \bar{A}_n^n = \{A_n^n / \mu_{\bar{A}_n^n}(A_n^n)\},$$

$$\bar{B}^1 = \{B^1 / \mu_{\bar{B}^1}(B^1)\}, \dots, \bar{B}^n = \{B^n / \mu_{\bar{B}^n}(B^n)\},$$

$$\bar{C}_1^1 = \{C_1^1 / \mu_{\bar{C}_1^1}(C_1^1)\}, \dots, \bar{C}_n^l = \{C_n^l / \mu_{\bar{C}_n^l}(C_n^l)\}.$$

Начальные условия описаны НМ $\bar{D}_i = \{x_i / \mu_{\bar{D}_i}(x_i)\}$, а число переменных вектора состояния – НМ $\bar{S} = \{s / \mu_{\bar{S}}(s)\}$, где $s = 1, 2, \dots, n$ – порядковый номер переменной вектора состояния.

Функции принадлежности заданы аналитической зависимостью [4], например, для переменной \bar{x}_i :

$$\mu_{\bar{x}_i}(x_i) = \varphi(x, a_{\bar{x}_i}, b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{x}_i}, v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{x}_i}) =$$

$$= ((b_{1\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x))^{v_{1\bar{x}_i}} \frac{\text{sign}(b_{1\bar{x}_i}(a_{\bar{x}_i} - x)) + 1}{2} +$$

$$+ (b_{2\bar{x}_i}(x - a_{\bar{x}_i}))^{v_{2\bar{x}_i}} \frac{\text{sign}(b_{2\bar{x}_i}(x - a_{\bar{x}_i})) + 1}{2} + 1)^{-1}. \quad (4)$$

В формуле (4) коэффициент $a_{\bar{x}_i}$ представляет моду ФП, коэффициенты $b_{1\bar{x}_i}$ и $b_{2\bar{x}_i}$ задают ширину ФП, $v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{x}_i}$ – наклон ФП к оси x_i , т. е. контрастность. Коэффициенты $b_{1\bar{x}_i}, b_{2\bar{x}_i}, v_{1\bar{x}_i}, v_{2\bar{x}_i}$ позволяют образовывать любую форму ФП и могут выступать в качестве показателей неопределенности.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ НЕЧЕТКИМ ДИНАМИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Дана динамическая модель ОУ в форме уравнений (1), (2), (3) с ФП (4).

В результате идентификации модели процесса механообработки оценены показатели априорной неопределенности модели до управления (коэффициенты ФП) и показатели апостериорной неопределенности модели как остаточной неопределенности, неснятой при адаптации.

Заданы показатели качества СУ (время переходного процесса, перерегулирование, ошибка слежения и т. п.) в форме функций полезности, сформированных экспертами:

$$\bar{Q}^3_k = \{Q^3_k / \mu^3_{\bar{Q}^3_k}(Q^3_k)\}, k = 1, 2, \dots, K,$$

$$\mu^3_{\bar{Q}^3_k}(Q^3_k) = \varphi(Q^3_k, a^3_{\bar{Q}^3_k}, b^3_{1\bar{Q}^3_k}, b^3_{2\bar{Q}^3_k}, v^3_{1\bar{Q}^3_k}, v^3_{2\bar{Q}^3_k}), \quad (5)$$

где K – число показателей качества СУ.

Определена эталонная модель на основе заданных показателей качества управления:

$$\dot{x}_m = A_m x_m + B_m u_m, \quad (6)$$

где u_m – задающее воздействие системы; $x_m(t)$ – вектор эталонных переменных состояния.

Заданы ограничения на переменные вектора состояния и ограничения на управление, определяемые кинематикой станка:

$$g_1(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{1\max}, g_2(\bar{x}, u, \gamma, t) > x_{2\min}, \dots,$$

$$g_{2n-1}(\bar{x}, u, \gamma, t) < x_{n\max}, g_{2n}(\bar{x}, u, \gamma, t) > x_{n\min} \quad (7)$$

$$g_{m-1}(\bar{x}, u, \gamma, t) < u_{\max}, g_m(\bar{x}, u, \gamma, t) > u_{\min}.$$

Пусть в качестве цели управления выбрана минимизация среднего отклонения переменных вектора состояния реального поведения ОУ от эталона. Если провести аналогию между нечеткой системой и стохастической, то цель можно

сравнить с минимизацией математического ожидания ошибки в стохастической системе.

Необходимо синтезировать СУ и осуществить настройку регулятора так, чтобы все сигналы в СУ были ограничены, т. е. $|x(t)| < x_{доп}$, $u(t) < u_{доп}$, а переходные процессы в системе удовлетворяли заданным показателям качества (5).

3. АЛГОРИТМ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Показатели качества СУ определяются не только наиболее возможными временными характеристиками ОУ $a_{\bar{x}i}(t), a_{\bar{y}i}(t)$, но и параметрами нечеткости $b_{1\bar{x}i}(t), b_{2\bar{x}i}(t), b_{1\bar{y}i}(t), b_{2\bar{y}i}(t)$, полученными при решении дифференциальных уравнений. Снизить нечеткость знаний об объекте и, соответственно, улучшить показатели качества управления можно путем максимизации значений $b_{1\bar{x}i}(t), b_{2\bar{x}i}(t), b_{1\bar{y}i}(t), b_{2\bar{y}i}(t)$. Эта идея заложена в основу приведенного ниже алгоритма управления.

С точки зрения минимальной сложности и с учетом ограничений на управляющий сигнал и скорость его изменения среди методов адаптивного управления с робастными свойствами выбран дискретизированный алгоритм скоростного градиента в параметрической форме с пропорционально-интегральным законом в контуре самонастройки [2, 3].

В данной работе предлагается распространить алгоритм скоростного градиента на управление объектами с нечеткой моделью типа (1), (2), (3). При этом сигнал управления формируется на основе нечеткого множества значений переменных состояния, возможных при вариации поведения ОУ. Модель (1), (2), (3) играет роль усредняющего сглаживающего фильтра и благодаря этому позволяет создать условия, при которых гарантирована работоспособность классических алгоритмов адаптивного управления. Синтез закона управления на основе нечеткой модели дополнительно усиливает робастность алгоритма скоростного градиента, сохраняя ограниченность фазовых траекторий в определенной области в условиях нескомпенсированной неопределенности знаний об объекте.

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.

Модифицированный закон управления имеет вид:

$$u = k_u(t) \cdot u_m(t) + \sum_{i=1}^n k_x^\Sigma(t) \cdot x_i^\Sigma(t), \quad (8)$$

$$k_{x1}^\Sigma[t+1] = k_{x1}^\Sigma[t](1 - \omega\gamma_3) + \omega(\gamma_5 - \gamma_4)\delta^*[t]x_1^\Sigma[t] - \omega\gamma_5\delta^*[t+1]x_1^\Sigma[t+1], \quad (9)$$

$$\dots \dots \dots k_{xm}^\Sigma[t+1] = k_{xm}^\Sigma[t](1 - \omega\gamma_3) + \omega(\gamma_5 - \gamma_4)\delta^*[t]x_n^\Sigma[t] - \omega\gamma_5\delta^*[t+1]x_n^\Sigma[t+1], \quad (10)$$

$$k_u[t+1] = k_u[t](1 - \omega\gamma_1) + \omega(\gamma_6 - \gamma_2)\delta^*[t]u_m[t] - \omega\gamma_6\delta^*[t+1]u_m[t+1], \quad (11)$$

где $t = m\omega$, $\omega > 0$ – шаг дискретизации, $m = 0, 1, 2, \dots, m_i$; $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6\}$ – параметры адаптивного регулятора;

$e_i^\Sigma = \int_{X_i} (x_i - x_{im}) \mu_{e_i}(e_i) dx_i$ – рассогласование между

переменными вектора состояния и эталонными переменными состояниями;

$\mu_{e_i}(e_i) = \varphi(e_i, a_{e_i}, b_{1e_i}, b_{2e_i}, v_{1e_i}, v_{2e_i})$ – ФП ошибки, φ – аналитический вид ФП в форме (4),

$a_{e_i} = a_{\bar{x}i} - x_{im}, v_{1e_i} = v_{1\bar{x}i}, v_{2e_i} = v_{2\bar{x}i}, b_{1e_i} = b_{1\bar{x}i}, b_{2e_i} = b_{2\bar{x}i}; x_i^\Sigma = \int_{X_i} x_i dx_i$ – интегрированная переменная вектора состояния;

$\delta^*[t] = \sum_{i=1}^n h_i \cdot e_i^\Sigma$, h_i – коэффициенты, полученные из коэффициентов матрицы в решении уравнения Ляпунова и матрицы эталонной модели B_m .

Структурная схема синтезированного адаптивного регулятора приведена на рис. 1.

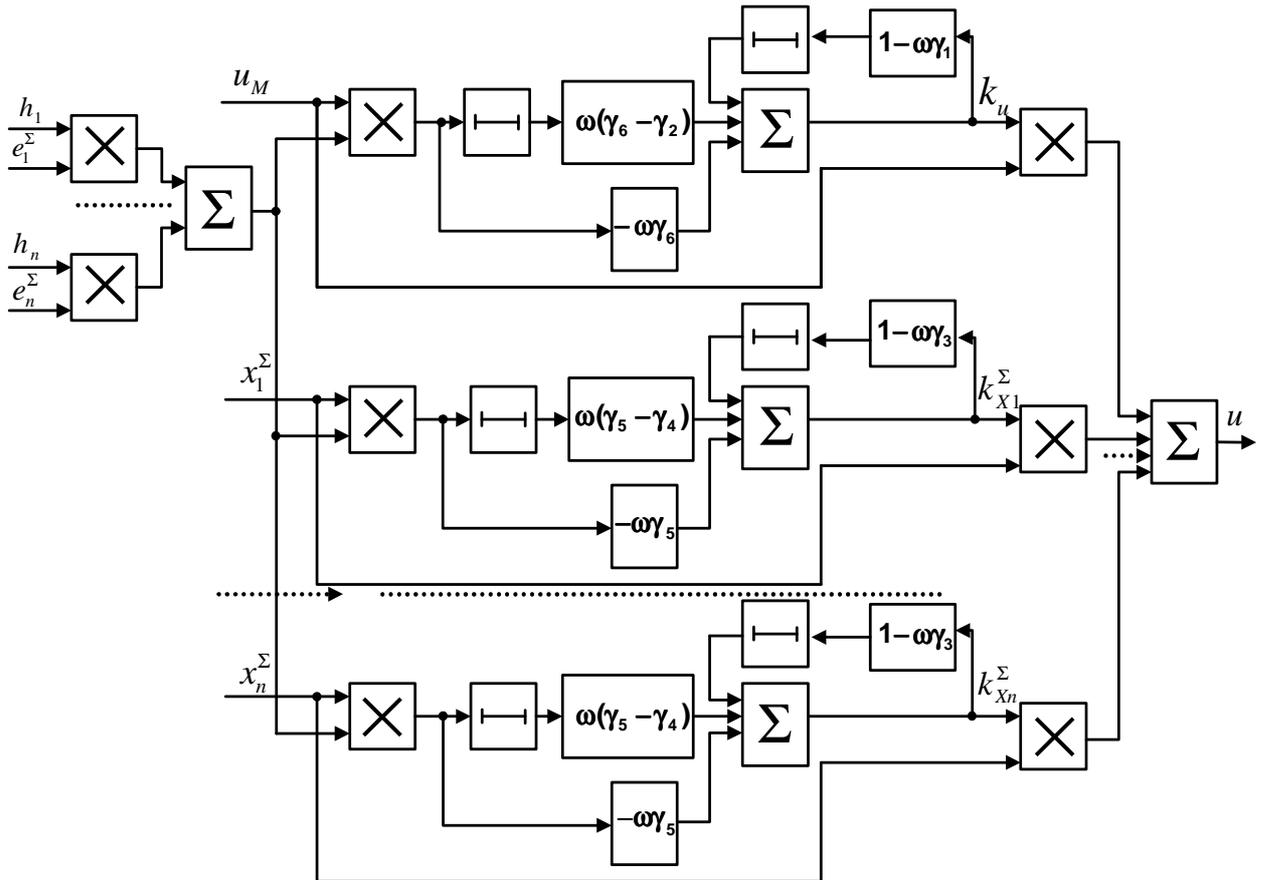


Рис. 1. Структурная схема адаптивного регулятора

4. НАСТРОЙКА ПАРАМЕТРОВ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЯТОРА

Задачу определения параметров адаптивного регулятора $\gamma = \{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4, \gamma_5, \gamma_6\}$, когда показатели качества СУ (5) и поведения ОУ (1), (2), (3) заданы в нечеткой форме, можно свести к классической четкой задаче поиска экстремума целевой функции при наличии ограничений (7).

Для этого предложен обобщенный критерий, который, во-первых, объединяет показатели качества СУ, во-вторых, реализует дефазсификацию нечетких значений показателей качества СУ:

$$I(\gamma) = K - \sum_{k=1}^K \frac{\mu_{\bar{Q}_k}^{\int} \wedge \mu_{\bar{Q}_k}^{3\int}}{\mu_{\bar{Q}_k}^{\int}} \rightarrow \min, \quad (12)$$

где $\mu_{\bar{Q}_k}^{\int} = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\bar{Q}_k}(Q_k) \cdot dQ_k$ – энергия НМ $\bar{Q}_k = \{Q_k / \mu_{\bar{Q}_k}(Q_k)\}$, выражающего прогнозируемое на основе нечеткой модели значение k -го показателя качества СУ;

$\mu_{\bar{Q}_k}^{3\int} = \int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\bar{Q}_k}^3(Q^3_k) \cdot dQ^3_k$ – энергия НМ, выражающего функцию полезности.

Геометрическая иллюстрация критерия качества СУ приведена на рис. 2.

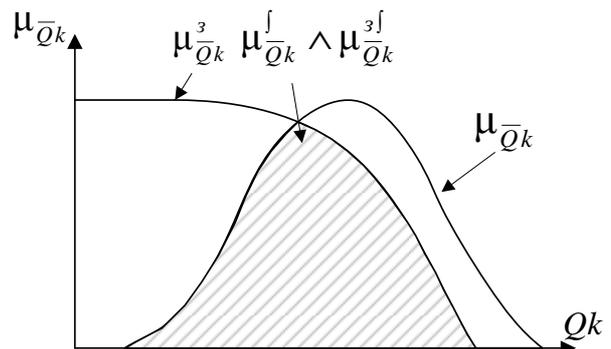


Рис. 2. Геометрическая интерпретация критерия качества СУ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настройка и исследование эффективности разработанной адаптивной системы проведены для управления температурой и силой резания при точении. Рассматривался самый неблагоприятный режим с точки зрения нагрузок на

режущий инструмент – процесс врезания. При этом изменение коэффициента передачи модели достигало 10 раз и более.

Получены следующие результаты: оперативное формирование режимов резания в процессе обработки деталей способствует сокращению времени обработки деталей в среднем 20 %, а времени на технологическую подготовку производства как минимум на 30%; среднее отклонение переменных вектора состояния реального процесса от эталона уменьшено на 15% по сравнению с показателями известных адаптивных систем управления процессами механообработки.

Реализация алгоритма (8)–(11) в СУ процессами механообработки расширяет область применения СУ в производственных условиях при наличии широкого спектра возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с.
2. **Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н.Д. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 744 с.
4. **Зориктуев В. Ц., Гончарова С. Г., Месягутов И. Ф.** Методика представления и вывода знаний в системах управления мехатронными станочными системами // СТИН. 2007. № 11. С. 13–18.

ОБ АВТОРАХ

Гончарова Светлана Геннадьевна, доц. каф. автоматизации технологич. процессов. Дипл. инж.-электромех. по автоматизации технологич. процессов и производств (УГАТУ, 1996). Канд. техн. наук по автоматизации и упр-ю технологич. процессами и производствами (УГАТУ, 2001). Иссл. в обл. автоматизации и упр. технологич. процессами.

Месягутов Игорь Фаритович, доц. той же каф. Дипл. инж.-электромех. по автоматизации технологич. процессов и производств (УГАТУ, 1995). Канд. техн. наук по автоматизации и упр. технологич. процессами и производствами (УГАТУ, 2003). Иссл. в обл. автоматизации и упр. технологич. процессами.