

УДК 681.5:621.91

В. Ц. ЗОРИКТУЕВ, Р. Р. ШАНГАРЕЕВ

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Рассматриваются нечеткая модель процесса резания и система автоматического управления режимами резания, построенная на основе нечеткой логики с учетом многорежимности, многомерности и параметрической неопределенности процесса резания. Система автоматического управления процессом точения; нечеткая модель процесса точения; моделирование Такаги – Сугено; нечеткий ПИД-регулятор; многомерная нечеткая модель; температурно-силовые режимы резания.

ВВЕДЕНИЕ

Трудности создания высокоэффективных систем автоматического управления в отрасли механообработки обусловлены сложностью технологического процесса резания (ПР) как объекта управления (ОУ) – его многомерностью, многорежимностью, малым объемом априорной информации о внутренних и внешних связях. Накопление трудноразрешимых в рамках классической теории управления проблем стимулирует интенсивное внедрение и развитие идей и методов искусственного интеллекта для управления сложными техническими объектами, какими является процесс механообработки и мехатронная станочная система [4, 7].

Эффективность процесса механообработки определяется технико-экономическими показателями процесса резания, которые напрямую зависят от оптимальности выбора режима резания. Следовательно, эффективность управления процессом резания неразрывно связана с задачей управления режимами резания ПР. Под термином «режимы резания» понимается совокупность числовых значений глубины резания, подачи, скорости резания, геометрических параметров и стойкости режущей части инструментов, а также силы резания, мощности и других параметров процесса резания, от которых зависят технико-экономические показатели [3]. На режимы резания также значительное влияние оказывают марка обрабатываемого материала и материала режущей части резца, их физико-механические свойства, состояние их поверхностей, вид обработки (точение, фрезерование, сверление и т. д.), характер обработки

(черновая или чистовая), условия обработки (непрерывная или прерывистая), температура в зоне резания Θ , подача охлаждающей жидкости СОЖ.

Отсюда вытекает необходимость в контроле и управлении режимными параметрами, что целесообразно реализовать в виде системы автоматического управления (САУ) режимами резания, которая обеспечит оптимальный процесс обработки, используя не только априорную информацию о ПР и рекомендации по выбору значений режимных параметров, но и измеряемую информацию о силе резания и температуре резания.

Традиционно среди всех режимных параметров выделяют P_z и Θ как наиболее информативные при исследовании и управлении процессом резания, а также наиболее доступные для измерения.

Современное производство требует интенсификации режимов резания, что нередко приводит к увеличению сил резания и температуры в зоне резания. В условиях существенного роста температуры и сил резания одновременное управление процессом резания с поддержанием постоянства силы P_z и температуры в зоне резания Θ позволит сформировать температурно-силовой режим обработки, удовлетворяющий требованию точности формообразования и эксплуатационных свойств поверхностей детали [5, 6].

Температура в зоне резания и главная составляющая силы резания при точении определяются по следующим эмпирическим зависимостям [1, 3, 7, 9]:

$$\begin{aligned} P_z &= C_{P_z} t_p^z S^y V^x K_p, \\ \Theta &= C_\Theta t_p^q S^n V^m (\sin(\varphi))^{n-q}, \end{aligned} \quad (1)$$

где C_{p_z} – константа, зависящая от свойств обрабатываемого материала, по сути своей представляющая удельную силу резания, приходящуюся на единицу площади поперечного сечения среза, Н/мм²; t_p – глубина резания, мм; S – подача, мм/об, V – скорость резания, м/мин; K_p – общий коэффициент, представляющий собой произведение частных коэффициентов, учитывающих конкретные условия резания; C_0 – коэффициент, выражающий зависимость теплоотдачи от обрабатываемого материала и условий резания; φ – главный угол в плане, градусы. Степени x, y, z, m, n, q – являются вещественными числами, показывающими степень влияния каждого из параметров режима резания соответственно на силу резания и температуру в зоне резания [8].

Как известно, процесс резания включает в себя множество сопутствующих явлений различной природы (кроме механических и тепловых, также электрохимических и т. д.), которые имеют сложные взаимные и внутренние связи, к тому же параметры в зоне резания недоступны для непосредственного измерения. Все это в совокупности усложняет исследования ПР. Усложненные условия исследований приводят к недостаточной изученности процесса резания, а большое число параметров и сложных, не поддающихся формализации взаимосвязей приводят к практически полному отсутствию математического описания на основе физических законов. Именно поэтому формулы, применяемые в инженерных расчетах режимов резания, как и в целом современные знания о ПР имеют эмпирический характер.

Наиболее широко используемым способом построения моделей ПР является аппроксимация экспериментальных данных апериодическими звеньями 1-го или 2-го порядка.

Например, модель, построенная путем аппроксимации экспериментальных данных исследований [7] по подаче S и главной составляющей силы резания P_z для управления процессом точения (ПТ), может определяться следующим образом:

$$W_{P_z}(s) = \frac{K_p(S)\tau}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}, \quad (2)$$

где $T_{1,2} = 0,5\tau[0,5 + B \pm \sqrt{(0,5 + B)^2 - 0,33}]$; B – параметр жесткости станочной системы, зависящий от податливости упругой системы «станок – приспособление – инструмент – деталь» и коэффициента передачи ПТ; $K_p(S) = \frac{\partial P_z}{\partial S}$ –

коэффициент передачи для главной составляющей силы резания по подаче S , которая рассматривается в качестве управляющего воздействия; $\tau_{\text{шп}}$ – период вращения шпинделя, принимается постоянным значением [7]. Выражение (2) описывает модель по основной зависимости $P_z(S)$, т. е. динамика системы зависит от изменения подачи, остальные параметры ПТ считаются постоянными значениями. Модель, описываемая выражением (2), достаточно проста и удобна для реализации в системах автоматического управления и исследования поведения ПТ по силовой координате при конкретном виде и режиме обработки детали, т. е. при вполне конкретных неизменных условиях.

В модели выражения (2) можно наблюдать излишнюю идеализацию применительно к задаче управления режимами резания: разрыв существенной связи между параметрами ПТ (в основе модели лежит зависимость $P_z(S)$ вместо, например, $P_z(S, V, t_p)$), линеаризация (получаемая в результате аппроксимации характеристики нелинейного процесса линейным звеном 2-го порядка). Все это в совокупности приводит к неточности модели и неадекватному отражению поведения реального процесса. Кроме того, как уже отмечалось выше, требуется осуществить контроль одновременно двух параметров силы и температуры резания, что соответственно должно быть отражено в модели ПТ. Следовательно, модель ПТ должна быть многомерной (S, V, t_p – управляющие параметры; P_z, Θ – управляемые параметры) и многорежимной (обеспечить исследование, например, чернового и чистового режимов резания). Эти обстоятельства приводят к необходимости поиска принципиально новых подходов к решению задачи построения моделей ПТ, позволяющих обеспечить требуемую для САУ многомерность, многорежимность, многосвязность (большое число параметров ПТ находятся в сложных взаимосвязях, не поддающихся формализации) и нелинейность ПТ. В данной статье предлагается метод нечеткого моделирования Такаги – Сугено [10] в качестве решения проблемы построения модели в данных условиях. Суть данного метода сводится к аппроксимации нечеткими множествами нелинейных компонентов модели и всех компонентов, точное определение которых либо затруднительно, либо приводит к значительному усложнению модели. Аппарат нечеткой логики Такаги – Сугено позволяет аппроксимировать трудно формализуемые компоненты модели и вместе с тем обеспечивает требуемые качества многомерности, многосвязности и т. д.

1. НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТОЧЕНИЯ

Для реализации САУ режимами резания необходимо, чтобы модель ПТ была основана на зависимостях $P_z(S, V, t_p)$ и $\Theta(S, V, t_p)$ с учетом особенностей изменения параметров выражения (1) и применяемых режимов резания. При этом допускается, что параметры t_p , C_{P_z} и C_Θ остаются постоянными в рамках одного режима резания (например, при черновой обработке) и изменяются только при смене режима резания. Параметры S и V изменяются в пределах допустимых значений для данного вида и условий обработки ($S = 0,01-1,2$ мм/об и $V = 0,1-300$ м/мин), полагается, что эти параметры принимают значения в соответствии с режимом резания и обеспечивают постоянство параметров $P_z = \text{const}$ и $\Theta = \text{const}$. Допускается, что параметры φ и K_p остаются неизменными на протяжении всего времени обработки независимо от режима резания. Согласно выражению (1) аппроксимировать нечеткими множествами Такаги – Сугено необходимо степенные зависимости S^y , V^x , S^n , V^m , t_p^z и t_p^q . Нечеткая модель процесса точения может быть представлена как на рис. 1, где $u_{P_z}(t)$, $u_\Theta(t)$, $u_{t_p}(t)$ – управляющие напряжения для приводов продольной подачи, главного движения и привода поперечной подачи токарного станка, которые изменяются непрерывно во времени t ; блоки нечеткой логики 1 и 2 – элементы нечеткой аппроксимации Такаги – Сугено. Эти блоки используются с целью аппроксимации степенных

зависимостей подачи, скорости резания и глубины резания, каждая операция аппроксимации представляет собой последовательный процесс фазификации, принятия решения на основе базы правил и вывода выходных значений по алгоритму Сугено. Например, блок нечеткой логики (1) имеет два входных параметра $S(t)$, $V(t)$ и четыре выходных $S^n(t)$, $S^y(t)$, $V^m(t)$, $V^x(t)$. Пример задания функций принадлежности для входного параметра S на отрезке допустимых значений представлен на рис. 2. Форма и количество нечетких множеств может изменяться в зависимости от требуемой точности модели и характера исследуемого процесса.

Эти функции принадлежности используются для вычисления весовых значений, например:

$$\mu_c(S) = \begin{cases} 0, & S \leq a_c, \\ \frac{S - a_c}{b_c - a_c}, & a_c \leq S \leq b_c, \\ \frac{c_c - S}{c_c - b_c}, & b_c \leq S \leq c_c, \\ 0, & c_c \leq S, \end{cases} \quad (3)$$

где $a_c < b_c < c_c$ – значения вершин треугольного нечеткого множества μ_c на оси S . Далее вычисленное значение, по алгоритму Сугено и в соответствии с базой правил и функциями принадлежности выхода S^y , используется для вычисления выходных значений S_a^y , S_b^y и т. д.

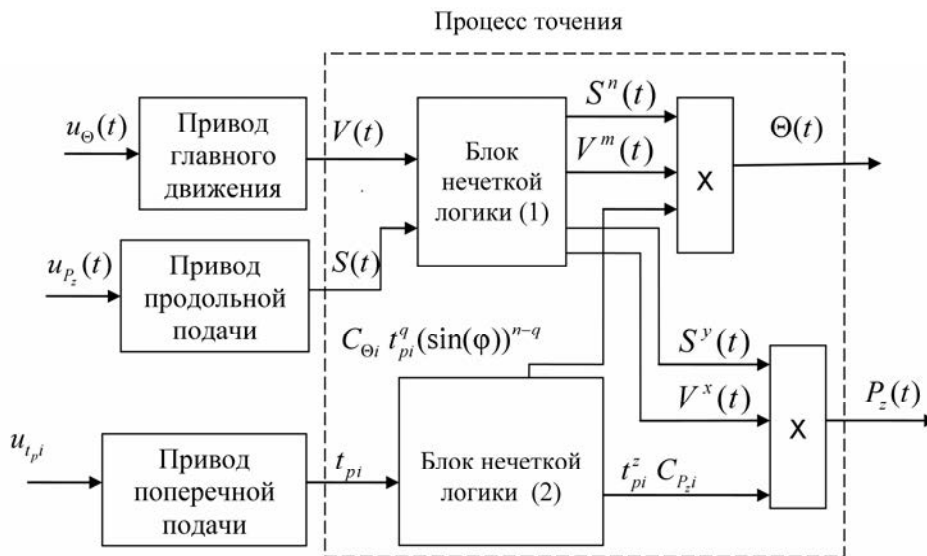
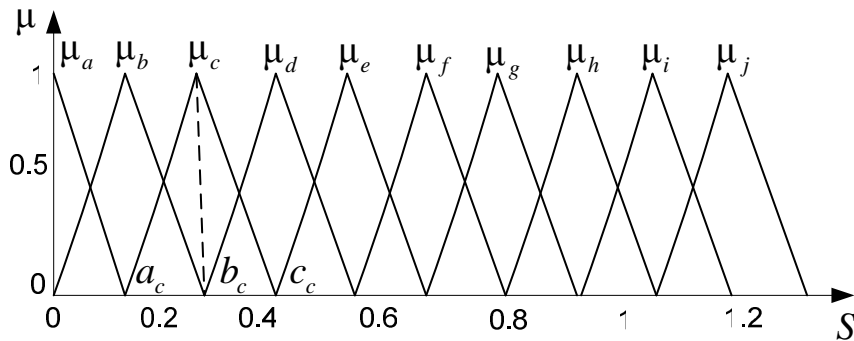


Рис. 1. Схема модели процесса точения

Рис. 2. Функции принадлежности параметра S База правил параметра S

$\mu_a(S)$	$[a_a \ b_a \ c_a]$	$\mu_a(S^y)$	S_a^y
$\mu_b(S)$	$[a_b \ b_b \ c_b]$	$\mu_b(S^y)$	S_b^y
$\mu_c(S)$	$[a_c \ b_c \ c_c]$	$\mu_c(S^y)$	S_c^y
$\mu_d(S)$	$[a_d \ b_d \ c_d]$	$\mu_d(S^y)$	S_d^y

В таблице изображен пример базы правил параметра S для четырех выходных значений. Например, допустимый диапазон входных значений ($S = 0,01-1,2$ мм/об) представляется в виде четырех нечетких множеств (колонка 2 таблицы) с функциями принадлежности, аналогичными рис. 2. Исходя из базы правил, определенных таблицей, каждому входному значению будет соответствовать выходное значение S_a^y , S_b^y и т. д. (колонка 4 таблицы). Для остальных параметров нечеткого блока (1) S^n , V^n и V^x функции принадлежности, база правил и алгоритм вывода определяются аналогично. Блок нечеткой логики (2) имеет одно входное значение t_{pi} и два выходных значения, равных произведениям $C_{\Theta i} t_{pi}^q (\sin(\varphi))^{n-q}$ и $C_{P_z i} t_{pi}^z K_p$, где i определяет режим резания, так как эти параметры ПТ изменяются только при смене режима резания. Число функций принадлежности входных и выходных параметров блока нечеткой логики (2) определяется числом режимов резания (черновой, чистовой и т. д.). Вычисление весовых значений и алгоритм вывода для блока нечеткой логики (2) аналогичны блоку нечеткой логики (1) только с одним отличием: изменение параметров блока (2) происходит дискретно при смене режима резания.

Реализация всех требуемых условий модели приводит к существенному усложнению модели ПТ. Отсюда главный недостаток этой модели: громоздкость и значительные требования к вычислительным ресурсам. Поэтому представленную нечеткую модель ПТ будет затруднительно использовать во встраиваемых авто-

матических системах управления. Главным предназначением данной модели является применение в исследовании процесса точения и в разработке алгоритмов управления для систем управления ПТ.

Эта особенность модели и наличие таких особенностей, как многомерность и многорежимность, практически полностью исключают возможность использования классических методов управления, адаптивных методов управления с эталонной моделью, а также использование всевозможных наблюдателей состояния системы. В этих условиях наиболее простым решением является применение нечетких методов управления на основе нечеткого ПИД-регулятора.

2. ЦЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ

Цель управления определяется требованиями оптимальности переходных процессов выходных координат P_z , Θ на всех режимах функционирования системы (по быстродействию и перерегулированию), поддержанием постоянства значений $P_z = \text{const}$ и $\Theta = \text{const}$ для каждого режима резания и минимумом ошибок рассогласования между преобразованными измерительной системой сигналами $E_{P_z}(t)$, $E_{\Theta}(t)$ выходных координат P_z , Θ соответственно, и заданных воздействий $u_{P_z}^*$, u_{Θ}^* :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_{P_z}(t) = 0, \quad \lim_{t \rightarrow \infty} e_{\Theta}(t) = 0, \quad t \rightarrow 0, \quad (4)$$

$$P_{z_i} = \text{const}, \quad \Theta_i = \text{const}, \quad (5)$$

где i – число режимов работы системы (режимов резания); $e_{P_z}(t) = u_{P_z}^*(t) - E_{P_z}(t)$ и $e_{\Theta}(t) = u_{\Theta}^*(t) - E_{\Theta}(t)$ – ошибки рассогласования соответственно силы резания P_z и температуры в зоне резания Θ .

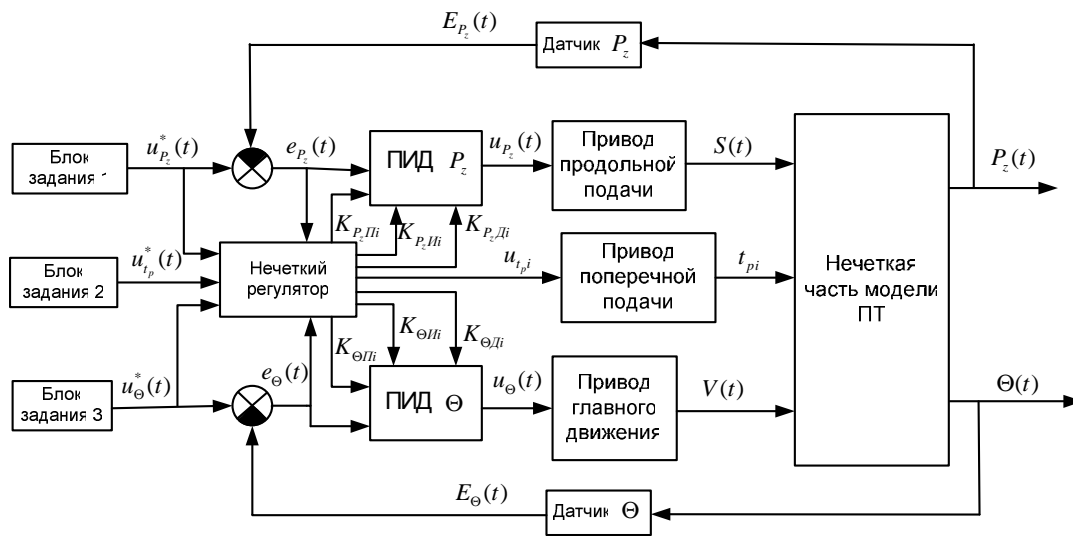


Рис. 3. Схема САУ процессом точения

3. ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ

Закон управления для САУ режимами резания определяется адаптивной настройкой нечеткого ПИД-регулятора в соответствии с целью и требованиями управления, которая описывается выражениями (6) и (7).

$$u_{Pz}(t) = K_{Pz\Pi} e_{Pz}(t) + K_{PzI} \int_0^t e_{Pz}(t) dt + K_{PzD} \frac{de_{Pz}(t)}{dt}; \quad (6)$$

$$u_{\Theta}(t) = K_{\Theta\Pi} e_{\Theta}(t) + K_{\Theta I} \int_0^t e_{\Theta}(t) dt + K_{\Theta D} \frac{de_{\Theta}(t)}{dt}, \quad (7)$$

где $K_{Pz\Pi}$, K_{PzI} , K_{PzD} , $K_{\Theta\Pi}$, $K_{\Theta I}$, $K_{\Theta D}$ – коэффициенты, характеризующие удельный вес соответственно пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющей регуляторов для каналов управления координатами P_z и Θ . Данные коэффициенты выбираются исходя из заданных показателей качества регулирования (время регулирования, перерегулирования и режима работы системы) [2]. Алгоритм выбора коэффициентов, для обеспечения соответствия вышеуказанным требованиям, определяется исходя из базы правил нечеткого регулятора, которая в свою очередь может определяться в следующем виде:

если $e_{Pz} = e_{Pz,i}$, $e_{\Theta} = e_{\Theta,i}$, $u_{Pz} = u_{Pz,i}$ и $u_{\Theta} = u_{\Theta,i}$, тогда $K_{Pz\Pi} = K_{Pz\Pi,i}$, и $K_{PzI} = K_{PzI,i}$, и $K_{PzD} = K_{PzD,i}$, и $K_{\Theta\Pi} = K_{\Theta\Pi,i}$, и $K_{\Theta I} = K_{\Theta I,i}$, и $K_{\Theta D} = K_{\Theta D,i}$.

Здесь индекс i определяет режим работы системы и принадлежность правила данному режиму. Данные об ошибках рассогласования

(e_{Pz} и e_{Θ}) обоих каналов управления, поступая в нечеткий регулятор, фазифицируются и на основе базы правил и алгоритма вывода Сугено принимается решение о выборе коэффициентов ПИД-регулятора.

Схему САУ процесса точения можно представить в следующем виде (рис. 3). На рис. 3 блоки задания 1, 2, 3 предназначены для подачи задающих напряжений $u_{Pz}^*(t)$, $u_{tp}^*(t)$ и $u_{\Theta}^*(t)$ соответственно. САУ режимами резания представляет собой два ПИД-регулятора для регулирования координат P_z , Θ и адаптивной надстройки в виде нечеткого регулятора, который выполняет функцию настройки ПИД-регуляторов и формирования управляющего напряжения для привода поперечной подачи на определенный режим резания. Настройка ПИД-регуляторов осуществляется подачей соответствующих коэффициентов $K_{Pz\Pi}$, K_{PzI} , K_{PzD} , $K_{\Theta\Pi}$, $K_{\Theta I}$ и $K_{\Theta D}$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 4 и 5 показаны характеристики P_z и Θ нерегулируемой модели при черновом точении, построенных путем численного решения выражения (1), при действии возмущения на силовую координату на третьей секунде, равного $0,23 P_z$. Время переходного процесса невозмущенной характеристики составляет 1,8 секунды силовой координаты и 3 секунды координаты температуры.

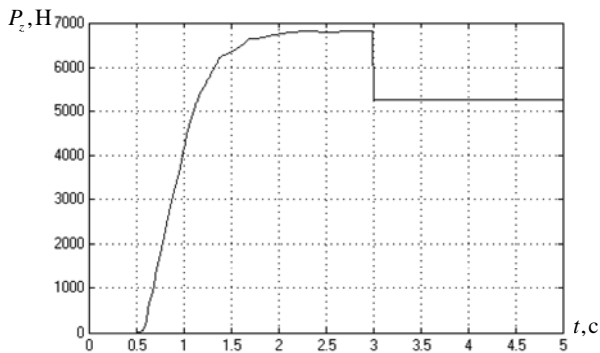


Рис. 4. Характеристика P_z нерегулируемой модели при действии возмущения $0,23 P_z$ на третьей секунде

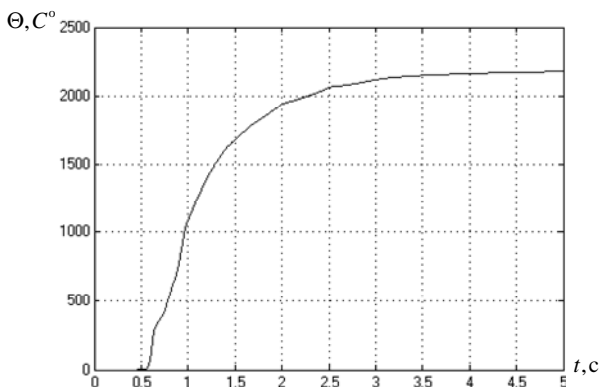


Рис. 5. Характеристика Θ нерегулируемой модели при действии возмущения $0,23 P_z$ на третьей секунде

На рис. 5 и 6 показаны характеристики P_z и Θ регулируемой модели при черновом точении, построенные путем численного решения нечеткой модели ПТ с нечетким ПИД-регулятором, при действии возмущения на силовую координату на третьей секунде, равного $0,23 P_z$. Время переходного процесса невозмущенной характеристики силовой координаты составляет 0,78 секунды, а время регулирования возмущения составляет 2 секунды. Для координаты температуры резания время переходного процесса невозмущенной характеристики составляет 0,74 секунды, а время регулирования возмущения составляет 1,8 секунды.

Исходя из приведенных графиков, можно сделать вывод, что САУ режимами резания обеспечивает требуемую функциональность и оптимальность переходных процессов для выходных координат.

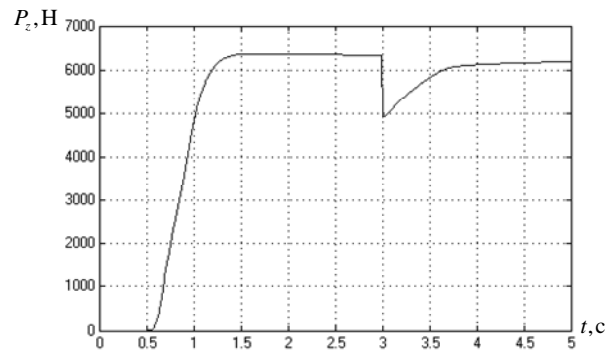


Рис. 6. Характеристика P_z регулируемой нечеткой модели ПТ при действии возмущения $0,23 P_z$ на третьей секунде

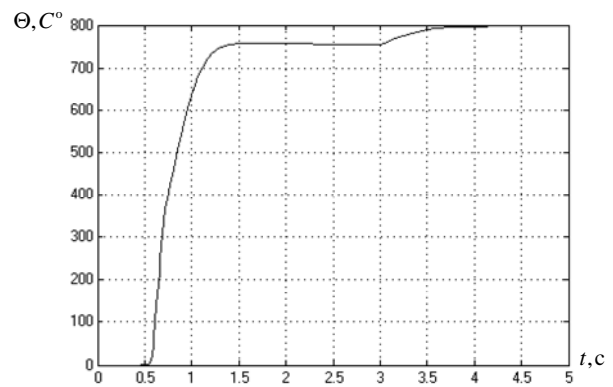


Рис. 7. Характеристика Θ регулируемой нечеткой модели ПТ при действии возмущения $0,23 P_z$ на третьей секунде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье рассмотрена САУ режимами резания, которая обеспечивает оптимальное формирование режимных параметров ПТ для чернового и чистового режимов резания в реальном режиме времени, что позволяет сэкономить время на переналадку станка и повысить эффективность ПТ. Обеспечение постоянства значений параметров P_z , Θ и рациональная настройка режимных параметров ПТ позволяют улучшить качество выпускаемой продукции и повысить технико-экономические показатели ПТ. Используемая при разработке алгоритма управления нечеткая модель ПТ позволяет значительно снизить неопределенность ПТ путем использования двух измеряемых координат (P_z и Θ) вместо обычной одной и учета зависимостей $P_z(S, V, t_p)$ и $\Theta(S, V, t_p)$, что в свою очередь позволяет повысить точность САУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобров З. Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
2. Васильев В. И., Ильясов Б. Г. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики. Уфа: УГАТУ, 1995. 80 с.

3. Грановский Г. И., Грановский В. Г. Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. 304 с.

4. Зориктуев В. Ц. Идентификация и автоматическое управление технологическими процессами в станочных системах: Учеб. пособие. Уфа: Уфимск. авиац. ин-т, 1992. 118 с.

5. Зориктуев В. Ц. Системы управления технологическими процессами в мехатронных станочных комплексах // Вестник УГАТУ. 2002. № 1. С. 113–119.

6. Зориктуев В. Ц., Хузин И. С. Электропроводимость контакта «инструмент-деталь» – физический и информационный параметр в станочных системах. М.: Машиностроение, 1998. 176 с.

7. Основы автоматизации и управления технологическими процессами в машиностроении / Под ред. В. Ц. Зориктуева. Уфа: Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, 2000. 406 с.

8. Основы учения о резании металлов и режущий инструмент / С. А. Рубинштейн [и др.]. М.: Машиностроение, 1968. 386 с.

9. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А. Г. Косиловой. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.

10. Kazou T., H. O. Wang. Fuzzy control systems design and analysis. John Wiley & Sons, Inc, 2001. 303 p.

ОБ АВТОРАХ



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



Шангареев Ринат Римович, асп. той же каф. Дипл. инженер по АСУ ТП (УГАТУ, 2006). Готовит дис. по разработке систем управления процессом механообработки на основе нечеткой логики.