

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ГИБКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕГЛАМЕНТА ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРОИЗВОДСТВ

In given article are considered two directions of increase of productivity the woodworking equipment: synthesis of an adaptive mode of processing of wood and reduction of auxiliary time in a running cycle by optimization of auxiliary operations. At the heart of an adaptive mode of processing of wood the speed control of giving the tool in the conditions of uncertainty parameters of system the rig – the adaptation – the tool – a detail. For construction of model process of cutting wood is used the mathematical apparatus of the theory of fuzzy logic. For management of the basic process – cutting process, uses hybrid technology of adaptive neuro – fuzzy inference system (ANFIS), possessing, in comparison with other methods, high speed of training, simplicity of algorithm. Also in article is considered the question of optimization of auxiliary operations on the basis of synthesis fuzzy control at positioning in a watching mode. Are brought results of modeling of the developed algorithms in system Matlab.

**Введение.** Автоматическое управление гибкими производствами, оснащенными современным оборудованием, возможно лишь при использовании вычислительной техники с современным программным обеспечением. Сдерживающим фактором на пути переоснащения предприятий автоматическими системами управления производством является отсутствие алгоритмов программного управления деревообрабатывающим оборудованием.

Имеются два основных направления повышения производительности деревообрабатывающего оборудования: синтез оптимальных режимов обработки древесины и сокращение вспомогательного времени в рабочем цикле путем оптимизации вспомогательных операций.

Обработка изделий на деревообрабатывающих станках должна производиться при экономически выгодной скорости резания, отвечающей наилучшему использованию режущего инструмента и станка. Станок, работая с соответствующей подачей и глубиной резания, должен обеспечивать наибольшую производительность при высоком качестве обработки.

Специфика работы современного деревообрабатывающего оборудования заключается в необходимости частых перемещений рабочих органов, позволяющих обеспечить максимальный выход спецификационных пиломатериалов или заготовок заданного размера.

Частые установочные перемещения, даже если они механизированы, являются трудоемкими операциями и занимают значительную долю вспомогательного времени. Сокращение этой доли может быть обеспечено только путем автоматизации установочных перемещений [1].

**Основная часть.** В зависимости от типа исполнительного механизма и применяемой системы управления точное позиционирование, т. е. перемещение рабочего органа из исходного положения в требуемое с заданной точно-

стью, может осуществляться одним из следующих способов:

1) ограничением пути движения рабочего органа жестким упором или системой взаимосвязанных жестких упоров;

2) автоматическим отключением привода при достижении заданного положения (по команде от датчиков перемещения или сравнивающего устройства);

3) путем плавного снижения скорости от максимальной до нуля по мере уменьшения сигнала рассогласования (позиционирование в следящем режиме).

Первый способ используется в сравнительно простых системах, в которых программно-носителем является барабан мерных упоров, или в системах, построенных на базе гидравлических позиционеров. Недостатками этого способа являются ограниченное число позиций и удары на заключительном этапе позиционирования. Второй способ позволяет осуществлять позиционирование в релейном режиме с отключением привода на скорости медленного подвода и получил в деревообрабатывающих станках наибольшее распространение. При позиционировании в следящем (релейном) режиме закон изменения скорости выбирается исходя из двух основных требований к системе: обеспечения необходимой точности остановки в заданном положении и достаточного быстродействия.

Рассмотрим синтез нечеткого управления при позиционировании в следящем режиме. Подход к точке останова может осуществляться при различных нагрузках, что приводит к потере точности при статическом регуляторе положения или к затягиванию процесса останова при наличии астатического регулятора. Противодействовать данному явлению можно с помощью нечеткого регулятора положения (НРП), предназначенного для оптимизации режима позиционирования следящего электропривода, структурная схема которого приведена на рис. 1.

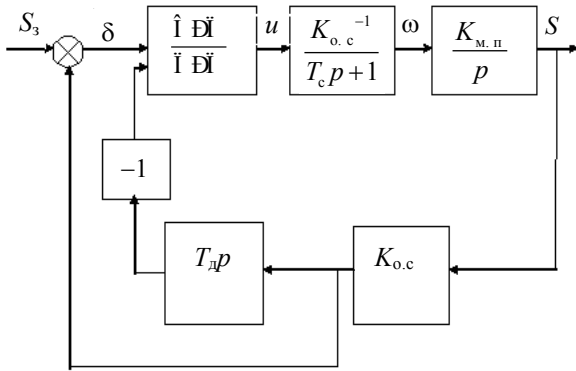


Рис. 1. Структурная схема следящего электропривода с нечетким регулятором положения

Здесь УМК – управляющий микроконтроллер; РП – регулятор положения; Д – двигатель; МП – механическая передача.

Микроконтроллер управляет контуром скорости двигателя (КСД) посредством управляющего напряжения  $u$ . Контур скорости может быть реализован комплектным электроприводом постоянного или переменного тока. Настройка КСД на модульный оптимум позволяет отобразить его инерционным звеном с постоянной времени  $T_c$ , а  $K_{o.c}$  – это коэффициент обратной связи по скорости двигателя в контуре скорости. Двигатель приводит в движение рабочий орган через механическую передачу (МП) с коэффициентом передачи  $K_{m.п}$ . Сигнал обратной связи по положению  $S$  рабочего органа подается на вход следящей системы через звено обратной связи по положению с коэффициентом передачи  $K_{o.п}$ . Данный сигнал используется также для формирования обратной связи по скорости перемещения рабочего органа с помощью дифференцирующего звена с постоянной времени  $T_d$ .

Значение рассогласования между заданным положением  $S_3$  и сигналом обратной связи по положению  $K_{o.п}S$  подается как на основной регулятор положения (ОРП), так и на нечеткий регулятор положения (НРП), а на НРП, кроме того, поступает сигнал обратной связи по скорости рабочего органа, взятый с обратным знаком. Будем далее называть  $\delta$  – ошибкой по положению.

Поскольку при  $S_3 = \text{const}$

$$\frac{d\delta}{dt} = -K_{o.п} \frac{dS}{dt}, \quad (1)$$

то на вход НРП подается сигнал, который обозначим  $\varepsilon$ , равный

$$\varepsilon = \delta + T_d \frac{d\delta}{dt}. \quad (2)$$

Модель непрерывной части следящего привода имеет вид

$$-u(\varepsilon) = T_c T \frac{d^2\delta}{dt^2} + T \frac{d\delta}{dt}, \quad (3)$$

где  $u(\varepsilon)$  – управляющее напряжение, формируемое на выходе РП;  $T_b = \frac{K_{o.c}}{K_{o.п} K_{m.п}}$  – эквива-

лентный коэффициент вязкого трения, численно равный обратной величине коэффициента усиления разомкнутого контура привода.

Значение  $u(\varepsilon)$  при управлении от НРП изменяется по релейному закону следующим образом:

$$\begin{cases} u = U_{3\max} & \text{при } \varepsilon > 0 \\ u = -U_{3\max} & \text{при } \varepsilon < 0 \\ u = 0 & \text{при } |\varepsilon| \leq \varepsilon_1 \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varepsilon_1$  – величина зоны нечувствительности.

Пусть зона нечувствительности  $\varepsilon_1$  определяется заданной зоной точностью позиционирования и составляет  $\delta = \pm \varepsilon$ .

Ограничение, при котором обеспечивается устойчивый останов в заданной точке позиционирования, причем внутри зоны нечувствительности имеет вид

$$|u| < \frac{2\varepsilon T_b}{T_c - T_d}, \quad T_d < T_c. \quad (5)$$

Полученные соотношения используем в алгоритме построения нечеткого релейного регулятора положения. Величину  $\varepsilon$  будем рассчитывать по формуле (2).

НРП работает в пределах  $|\delta| < \delta_{\max}$ , где  $\delta_{\max}$  – граничное значение ошибки, определяющее пределы функционирования НРП. В противном случае нечеткий регулятор должен быть автоматически отключен, а вместо него должен быть включен ОРП.

Необходимость в нечетком регуляторе возникла потому, что при подходе к заданному положению величина  $S$  измеряется малым количеством отсчетов датчика положения, а каждый отсчет занимает относительно соседнего не вполне определенное положение из-за погрешности шкалы датчика. Деления шкалы устанавливаются с некоторой погрешностью, которая имеет случайный характер. Распределение погрешностей измерения положения рабочего органа можно отобразить в виде совокупности нечетких множеств:

$$A_\delta = \{\mu_\delta(\delta), \delta\}, \quad (6)$$

где  $\mu_\delta(\delta)$  – функция принадлежности ошибки позиционирования, которая имеет треугольный вид.

На рис. 2 по оси абсцисс откладываются дискретные значения датчика положения  $k_i$ . Предполагается, что максимальная погрешность по положению не превышает дискретной единицы.

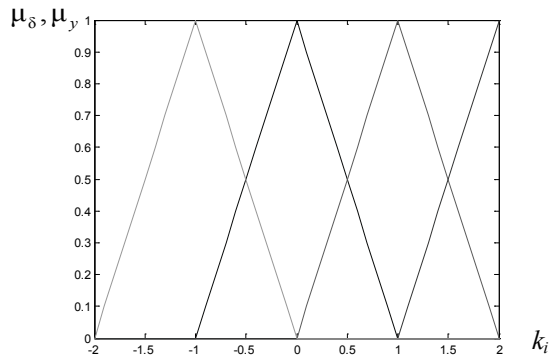


Рис. 2. Функции принадлежности ошибки и скорости изменения ошибки позиционирования

Обозначим скорость изменения ошибки позиционирования через  $y$ :

$$y = \frac{d\delta}{dt}. \quad (7)$$

Функции принадлежности скорости изменения ошибки позиционирования также будут иметь треугольный вид.

Величина  $\varepsilon$ , рассчитываемая по формуле (2), также является нечетким множеством, представляющим собой сумму двух нечетких множеств  $A_\delta$  и  $A_y$ .

Пример нахождения  $\varepsilon$  для случая тормозного режима, когда  $\delta$  и  $y$  имеют противоположные знаки, представлен на рис. 3.

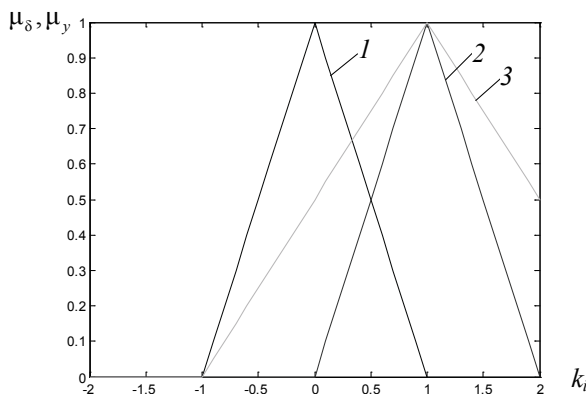


Рис. 3. Нахождения  $\varepsilon$

для случая тормозного режима:

- 1 – функция принадлежности скорости изменения ошибки позиционирования;
- 2 – функция принадлежности ошибки позиционирования;
- 3 – функция принадлежности  $\mu_\varepsilon = \mu_\delta + \mu_y$

Значение  $\varepsilon$ , на основании которого выбираем сигнал управления  $u$ , получаем на выходе блока дефазификации на основании метода центра тяжести.

Дефазификация нечеткого множества по методу центра тяжести осуществляется по формуле [2]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^k \alpha_i \mu_A(\alpha_i)}{\int_a \mu_A(\alpha_i)}. \quad (8)$$

В нашем случае  $\varepsilon = 0,82$ .

Для управления основным процессом – процессом резания – используется гибридная технология адаптивной нейро-нечеткой системы заключений (ANFIS), обладающая, по сравнению с другими методами, высокой скоростью обучения, простотой алгоритма и оптимальной проработанностью программного обеспечения в системе математического моделирования Matlab [3].

Проектирование системы управления посредством обучения по некоторому набору входных-выходных данных, требуемому современным алгоритмами нейро-нечеткой идентификации, предполагает наличие тестового регулятора, действие которого в различных схемно-режимных условиях собирается в некоторую базу данных. В качестве тестовой системы регулирования использованы алгоритмы линейно-квадратичного управления, позволяющие достичь компромисса между эффективностью регулирования и величиной сигнала управления, принимая во внимание шум входных и выходных переменных.

Рассмотрим следующую стохастическую модель системы управления:

$$\begin{aligned} X(k+1) &= F_x[X(k)] + B_u(k)U(k) + G_x N_x(k), \\ Y(k+1) &= F_y[X(k)] + G_y N_y(k), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $X(k)$  –  $n$ -мерный вектор в пространстве состояний;  $Y(k)$  – вектор наблюдений;  $U(k)$  – вектор управления,  $F_x(\cdot)$ ,  $F_y(\cdot)$  – некоторые известные функции своих аргументов;  $B_u$ ,  $G_x$ ,  $G_y$  – известные матрицы;  $N_x(k)$ ,  $N_y(k)$  – вектора гауссовских случайных процессов;  $k = 0, 1, \dots$ ,  $N$  – индекс дискретизации по времени.

В качестве управляющего воздействия  $U(k)$  принимается скорость продольной подачи, мм/об; в качестве вектора  $X(k)$  – сила резания; в качестве вектора  $Y(k)$  – напряжение на выходе датчика силового параметра.

Модель регулируемого привода в первом приближении представим колебательным звеном второго порядка с передаточной функцией вида

$$W_n = \frac{v(s)}{U(s)\xi} = \frac{k_n}{T_n^2 s^2 + 2 T_n s + \dots}, \quad (10)$$

где  $v(s)$ ,  $U(s)$  – изображения, по Лапласу, скорости подачи и управляющего напряжения соответственно;  $k_n$  – коэффициент передачи привода;  $T_n$  – постоянная времени привода;  $\xi$  – коэффициент демпфирования.

Для получения математической модели процесса резания фрезерованием рассмотрим, как изменение сил резания связано с параметрами обработки древесины.

Передаточная функция процесса резания фрезерованием по управляющему воздействию имеет следующий вид [4]:

$$W_R = \frac{P(s)}{v(s)} = \frac{k_r}{T_r s + 1}, \quad (11)$$

где  $P(s)$  – лапласово изображение силового параметра;  $k_r = c_r(t)$  и  $T_r = 1/n$  – соответственно коэффициенты передачи и постоянная времени процесса резания;  $t$  – глубина резания;  $c_r(t)$  – функция, определяемая видом стабилизируемого силового параметра, материалом заготовки и инструмента, его геометрией;  $n$  – частота вращения шпинделя.

Силовые параметры будем оценивать по току, потребляемому электродвигателем. Исходя из этого модель процесса резания может быть представлена следующим образом:

$$(12)$$

где  $I$  – ток, потребляемый электродвигателем;  $k_{рез}$  – коэффициент пропорциональности;  $v$  – скорость резания;  $h$  – глубина резания.

Алгоритм управления синтезируется на основе квадратичного критерия качества:

$$J = \sum_{i=1}^N [(P(i) - P_0(i))^T R (P(i) - P_0(i)) + U(i)^T Q U(i)], \quad (13)$$

где  $P_0(i)$  – параметр, характеризующий требуемые динамические нагрузки;  $R, Q$  – известные матрицы.

Оптимальный вектор управления  $U(i)^0$  в стохастической системе (9) выбирается из условия:

$$U(k)_0 = \arg \min J[X(k), U(k)] \quad U \in U,$$

где  $U$  – множество всех допустимых управлений.

Настройка весов адаптивной нейро-нечеткой системы управления осуществляется на основе алгоритма обратного распространения ошибки. На вход объекта управления подается тестовое множество и веса настраиваются таким образом, чтобы разность между реальным выходом объекта управления и выходом нейронной сети была минимальной.

На рис. 4 показан результат моделирования нейро-нечеткой системы управления силой резания при условии, что функция  $P_0(i)$  представляет собой прямоугольные импульсы.

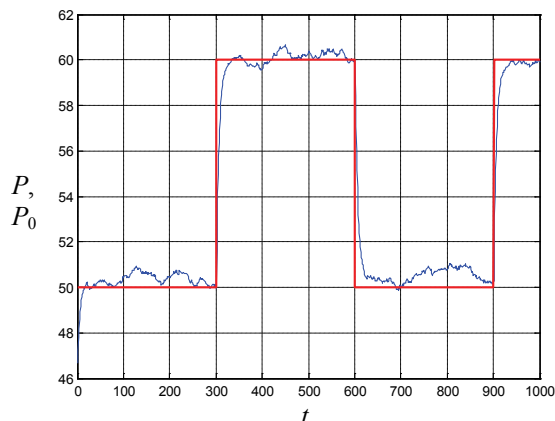


Рис. 4. Результат моделирования нейро-нечеткой системы управления силой резания

**Заключение.** В данной работе был разработан гибкий регламент управления процессом резания древесины фрезерованием. Для управления установочными перемещениями был разработан алгоритм нечеткого управления при позиционировании в следящем режиме. Для управления основным процессом – процессом резания – была использована гибридная технология адаптивной нейро-нечеткой системы заключений.

### Литература

1. Кузнецов, В. М. Автоматизация установочных перемещений в деревообрабатывающих станках / В. М. Кузнецов. – М.: Лесная промышленность, 1981.
2. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007.
3. Jang, J. S. R. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System / J. S. R. Jang // IEEE Trans. Systems & Cybernetics. – 1993. – Vol. 23.
4. Бейлин, Л. П. Расчет систем стабилизации силового параметра процесса резания / Л. П. Бейлин, А. И. Левин // Станки и инструменты. – 1974. – № 8. – С. 7–10.