

**АВТОМАТИЗАЦИЯ  
НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ  
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ  
ПРОЦЕССОВ**

УДК 621.941.1-503.57

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ  
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ**

*М.Е. Щербаков*

*Рассмотрен метод, повышающий производительность процесса резания введением элементов искусственного интеллекта в устройство принятия решений системы ЧПУ.*

**Введение.** Системы адаптивного предельного управления и адаптивного оптимального управления [1] позволяют решить задачу управления показателями процесса резания.

Системы адаптивного оптимального управления обеспечивают более высокую эффективность процесса резания по сравнению с системами адаптивного предельного управления. Однако системы данного типа практически не встречаются в реальном производстве, так как они сложны в реализации.

Для повышения производительности процесса резания необходимо разработать систему адаптивного оптимального управления нового типа, которая была бы практически реализуема, лишена сложных математических операций и обеспечивала высокое качество управления.

Данную задачу невозможно решить, используя обычные методы управления. Поэтому в систему управления процессом резания необходимо включить элемент искусственного интеллекта, который будет управлять состоянием системы в реальном времени.

Рассмотрим процесс резания на плоскости производственных характеристик станка, представляющую собой систему координат, осями которой являются управляемые параметры процесса резания (частота вращения шпинделя и продольная подача).

**Ограничения, накладываемые на управляемые параметры процесса резания.** При оптимизации процесса обработки необходимо принимать во внимание конструктивные и технологические ограничения на управляемые параметры металлообработки: частоту вращения шпинделя  $n$  и подачу  $s$ .

Наименьшее значение частоты вращения шпинделя определяется конструктивно заданным нижним пределом диапазона изменения. Частота вра-

щения шпинделя не может быть меньше некоторой величины, при которой ухудшаются условия стружкообразования [2].

Наибольшее значение частоты вращения шпинделя определяется конструктивно заданным верхним пределом диапазона изменения. Кроме того, данное значение ограничено некой величиной, при превышении которой происходит быстрое изнашивание и разрушение инструмента вследствие чрезмерного нагревания режущей кромки [2].

Наибольшая и наименьшая подачи ограничиваются конструктивно заданными пределами для привода подачи станка. На максимальное значение подачи влияет прочность используемого инструмента [2].

Кроме конструкторско-технологических ограничений частоты вращения шпинделя и скорости подачи существуют силовые ограничения. Допустимый вращающий момент определяется прочностью инструмента и механизмов станка. Допустимая мощность резания ограничена сверху параметрами электродвигателя [2].

Необходимо отметить, что ограничения должны устанавливаться для конкретного станка, инструмента и материала заготовки, т.е. нельзя переносить ограничения одного процесса резания на другой.

**Повышение производительности процесса резания.** Известно, что глубина резания изменяется в процессе обработки. Для каждой величины глубины резания существует некая оптимальная кривая, проходящая через область допустимых значений  $n$  и  $s$  на плоскости производственных характеристик станка и соответствующая максимальной производительности процесса резания. Так как глубина резания является переменной величиной, то можно говорить о семействе оптимальных кривых, каждая из которых соответствует конкретной величине глубины резания  $t_1$ ,  $t_2$  или  $t_3$  (рис. 1).

Максимумы производительности находятся на пересечении оптимальных кривых с верхней границей области допустимых значений управляемых параметров. Таким образом, глубине резания  $t_1$  соответствует точка максимальной производительности  $A_1$ , глубине  $t_2$  точка  $A_2$ , а глубине  $t_3$  точка  $A_3$ .

Следовательно, для получения максимальной производительности процесса резания необходимо определить текущую глубину резания, затем положение точки пересечения оптимальной кривой с верхней границей области допустимых значений и, соответственно, изменить управляемые параметры процесса резания.

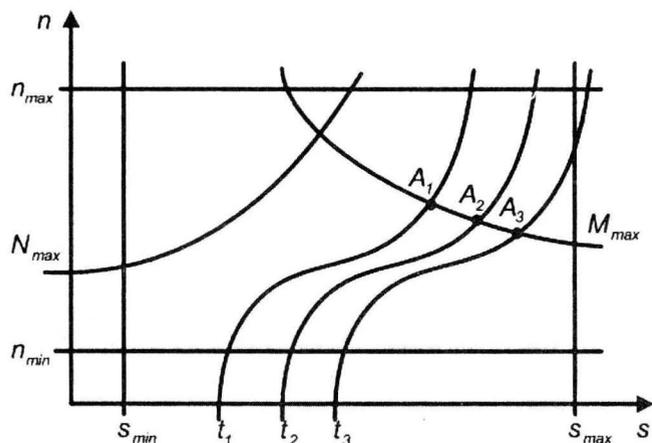
Напрямую измерить глубину резания не представляется возможным, поэтому ее определяют по косвенным признакам. Радиальную составляющую силы в зоне резания можно определить по формуле

$$P_y = C_{P_y} t^x s^y v^z K_M,$$

где  $C_{P_y}$  — константа (удельная сила резания), учитывающая влияние на радиальную силу резания параметров, не входящих в формулы (геометрию инструмента, вид обрабатываемого материала, смазочно-охлаждающую жидкость и т.д.);  $t$ ,  $s$ ,  $v$  — глубина, подача и скорость резания;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — показатели степени, выражающие влияние соответствующего параметра режима резания на силы резания;  $K_M$  — коэффициент, учитывающий дополнительно влияние на силы резания свойств обрабатываемого и инструментального материала и т.д.

Данная формула используется для практических расчетов и получена эмпирически, т.е. на основании экспериментов и обработки их результатов. Имеются и теоретически полученные уравнения, но они сложны и для практических расчетов не используются. Радиальную силу можно измерять тензодатчиком с достаточно высокой точностью. Следовательно, в уравнении остается только одно неизвестное — глубина резания, которую легко определить несложными вычислениями. Проблема в том, что данная формула — эмпирическая, т.е. приближительная.

Для определения точного значения глубины резания предлагается использовать искусственную нейронную сеть [3]. Входами данной нейронной сети будут частота вращения шпинделя, продольная подача, радиальная сила в точке кон-



**Рис. 1. Область допустимых значений управляемых параметров и точки максимальной производительности процесса резания:**

$n_{max}, n_{min}$  — максимальная и минимальная величина частоты вращения шпинделя;  $s_{max}, s_{min}$  — максимальная и минимальная величина продольной подачи;  $N_{max}$  — максимально допустимое значение мощности резания;  $M_{max}$  — максимально допустимое значение момента резания

такта, а выходом — глубина резания. Для обучения нейронной сети воспользуемся алгоритмом обратного распространения ошибки [3].

По результатам компьютерного моделирования определено оптимальное количество нейронов в скрытом слое, равное 59. Таким образом, нейронная сеть, определяющая мгновенную глубину резания, имеет во входном слое три нейрона, в скрытом 59 нейронов, а в выходном один нейрон.

Для обучения нейронной сети необходимо создать обучающую выборку, представляющую собой наборы значений, которые задают входы и выходы нейронной сети. Чем больше наборов содержит обучающая выборка, тем точнее обучится нейронная сеть. В данном случае набор значений представляет собой соответствие между радиальной силой в точке контакта, частотой вращения шпинделя и подачей, с одной стороны, и глубиной резания, с другой. Наборы значений для обучения нейронной сети необходимо получить экспериментально, а для уменьшения числа экспериментов и увеличения точности набора воспользоваться теорией планирования эксперимента.

После определения мгновенной глубины резания требуется найти точку, соответствующую максимальной производительности. Данная точка — пересечение оптимальной кривой с верхним ограничением. Если за критерий оптимизации берется объемная производительность, то ее можно определить по формуле

$$P_v = \frac{V}{T + \tau_{см}},$$

где  $V$  — объем припуска, снятого за цикл использования инструмента;  $T$  — стойкость инструмента;  $\tau_{см}$  — время смены инструмента.

В свою очередь, стойкость инструмента зависит от параметров резания и для продольного точения может быть записана в виде

$$T^m = \frac{318c_v k_v}{nt^x v^y d},$$

где  $c_v$  — постоянная величина для определенной группы обрабатываемых материалов;  $k_v$  — коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала, режущей части инструмента и типа СОЖ;  $d$  — диаметр обрабатываемой заготовки;  $t$  — глубина резания,  $x$ ,  $y$ ,  $m$  — показатели степеней, зависящие от свойств инструмента и условий резания.

Таким образом, производительность процесса резания можно выразить через управляемые параметры процесса, т.е. данная зависимость поз-

воляет определить положение оптимальной кривой на плоскости производственных характеристик станка. Точка, соответствующая максимальной производительности, определяется как точка пересечения оптимальной кривой с верхним ограничением.

Максимальная мощность резания определяется из выражения [4]

$$N = \frac{1}{6120} v C_{P_z} s^{\beta_z} f^{\gamma_z} HB^{n_z},$$

где  $v$  — скорость резания;  $HB$  — твердость материала заготовки;  $C_{P_z}, \beta_z, \gamma_z, n_z$  — коэффициенты, полученные экспериментально.

В свою очередь, максимальный момент резания определяется по формуле

$$M = 0,5 \cdot 10^{-3} d C_{P_z} s^{\beta_z} f^{\gamma_z} HB^{n_z}.$$

Выражения для определения максимальной мощности резания и максимального момента резания получены эмпирически и являются приближительными.

Вычисление точки пересечения оптимальной кривой с верхней границей области допустимых значений традиционным способом является ресурсоемким процессом. Поэтому для определения этой точки целесообразно использовать заранее обученную искусственную нейронную сеть, которая должна обучаться с учителем по алгоритму обратного распространения ошибки. Входами нейронной сети являются текущие значения частоты вращения шпинделя и продольной подачи, мгновенная глубина резания, диаметр обрабатываемой заготовки, твердость материала заготовки и максимально допустимые значения управляемых параметров  $n_{\max}$  и  $s_{\max}$ . Данная нейронная сеть определяет координаты оптимальной точки ( $s_{\text{опт}}, n_{\text{опт}}$ ), т.е. точки максимальной производительности процесса резания.

Нейронная сеть решает задачи интерполяции, т.е. определяет точку пересечения оптимальной кривой с верхней границей области допустимых значений управляемых параметров. Положение оптимальной точки на плоскости производственных характеристик определяется оптимальной частотой вращения шпинделя и оптимальной подачей.

По результатам компьютерного моделирования определено оптимальное число нейронов в скрытом слое, равное 14. Соответственно, нейронная сеть имеет семь нейронов во входном слое, 14 в скрытом и два нейрона в выходном.

Система ЧПУ является дискретной, т.е. управ-

ляемые параметры процесса резания могут принимать строго определенные значения. На плоскости производственных характеристик станка эти значения образуют координатную сетку. В большинстве случаев оптимальная точка, полученная теоретически, не совпадает ни с одним из узлов координатной сетки, поэтому требуется определить, какой узел наиболее близок к оптимальной точке. Если оптимальная точка равноудалена от двух или более узлов, то в качестве оптимального выбирается узел, которому соответствует максимальная производительность.

Алгоритм определения оптимального узла следующий: прямоугольник, ограниченный узлами координатной сетки, делится на четыре равных прямоугольника, как изображено на рис. 2. Каждый из полученных прямоугольников содержит узел координатной сетки. Оптимальная точка находится в одном из этих прямоугольников, вершина которого (содержащего оптимальную точку) и является оптимальным узлом координатной сетки.

Таким образом, после определения оптимального узла координатной сетки необходимо установить управляемые параметры процесса резания в соответствии с координатами оптимального узла. Однако это не всегда возможно. Проблема заключается в следующем: не всегда можно переместиться за один шаг из текущего узла координатной сетки в оптимальный. Это связано с ограничениями, наложенными на максимально возможные приращения управляемых параметров  $n_{\text{шаг}}^{\max}$  и  $s_{\text{шаг}}^{\max}$ .

Если из текущего состояния системы перейти в оптимальное за один шаг невозможно, то следует из-

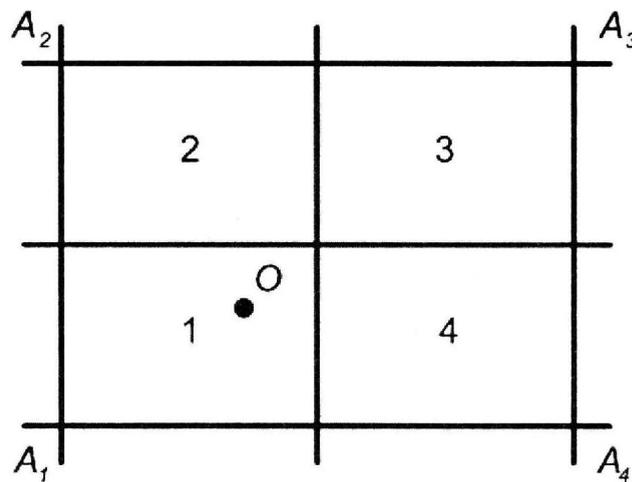


Рис. 2. Определение оптимального узла координатной сетки:

$O$  — точка максимальной производительности, полученная теоретически;  $A_1, A_2, A_3, A_4$  — узлы координатной сетки с прямоугольниками 1, 2, 3, 4

менить значения управляемых параметров так, чтобы производительность процесса резания увеличилась.

Допустим, что система находится в состоянии, которому соответствует точка  $A$  на рис. 3. Оптимальный узел координатной сетки соответствует точке  $O$ . Из точки  $A$  невозможно переместиться в точку  $O$  за один шаг. Однако, если перемещаться из точки  $A$  в точку  $O$  на максимально возможное расстояние по прямой, то система окажется в состоянии, которое соответствует точке  $B$ , находящейся в стороне от оптимальной кривой. Таким образом, система может оказаться в худшем состоянии, чем предыдущее. Поэтому для повышения производительности следует переместиться в точку, лежащую на оптимальной кривой.

Исходя из этого, определим узел координатной сетки, находящийся рядом с оптимальной кривой и соответствующий максимально возможному приращению управляемых параметров процесса резания.

На рис. 4 представлен алгоритм определения целевого узла. Система ЧПУ находится в точке  $A$ . Оптимальная кривая пересекает сторону прямоугольника в точке  $O$ . Необходимо определить узел координатной сетки, который наиболее приближен к точке  $O$ . В данном случае это узел  $C$ .

Данную задачу можно решить с помощью искусственной нейронной сети, на вход которой подаются следующие параметры процесса резания: текущие значения управляемых параметров; оптимальные значения управляемых параметров (координаты оптимального узла координатной сетки); минимально и максимально возможные перемещения по осям; мгновенная глубина резания. Выходами нейронной сети будут скорректированные значения управляемых параметров процесса резания (частота вращения шпинделя и скорость продольной подачи).

В качестве архитектуры нейронной сети предлагается использовать сеть, обучающуюся с учителем по алгоритму обратного распространения ошибки [3]. По результатам компьютерного моделирования определено оптимальное число нейронов в скрытом слое, равное 14. Таким образом, нейронная сеть имеет девять нейронов во входном слое, 14 в скрытом и два нейрона в выходном.

Полученные значения управляемых параметров процесса резания необходимо подать на вход системы ЧПУ и перейти к следующему шагу.

**Заключение.** Таким образом, предлагается в качестве устройства принятия решений в системе адаптивного оптимального управления использовать специальное программное обеспечение, содержащее элементы искусственного интеллекта, функционирующие как искусственная нейронная сеть. Данные нейронные сети решают задачи, которые при решении традиционным способом занимали много вычислительных ресурсов. Для правильной работы искусственную нейронную сеть необходимо предварительно обучить, а затем она будет функционировать автономно, т.е. в отличие от классических вычислений нейронные сети требуют предварительных затрат. Однако функционируют они гораздо быстрее.

Наибольшую трудность для использования данной системы представляет создание обучающих выборок для искусственных нейронных сетей. Для уменьшения числа экспериментов по получению обучающей выборки необходимо использовать теорию планирования эксперимента. По мере накопления обучающих выборок процесс металлообработки удешевляется, так как при наличии готовой выборки для сочетания заготовка — инструмент — станок не требуется создавать новую.

Использование систем адаптивного оптимального управления позволит сократить стоимость обработки детали, повысить точность обработки,

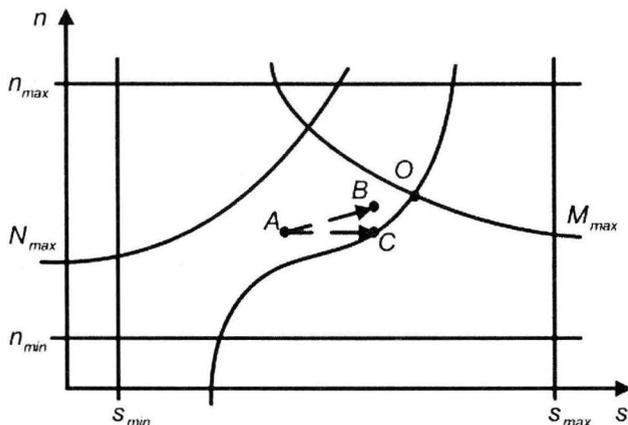


Рис. 3. Возможные приращения управляемых параметров процесса резания

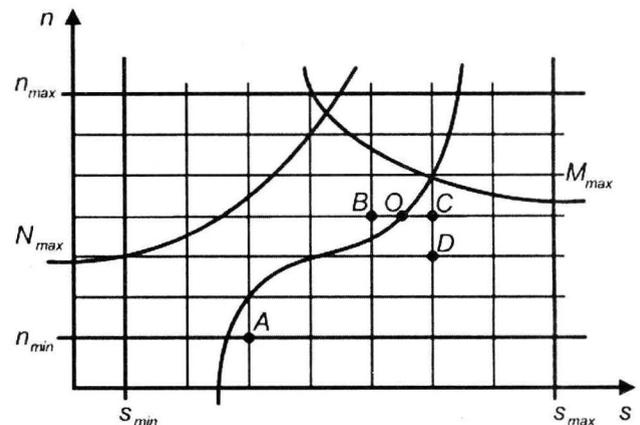


Рис. 4. Определение целевого узла координатной сетки

увеличить срок службы режущего инструмента, а использование элементов с искусственным интеллектом сделать эти системы более гибкими и упростить их практическую реализацию.

#### Список литературы

1. Соломенцев Ю.М., Сосонкин В.Л. Управление гибкими производственными системами. М.: Машиностроение, 1988.

2. Рубашкин И.Б. Оптимизация металлообработки при прямом цифровом управлении станками. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1980.

3. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд. М.: Горячая линия — Телеком, 2002.

4. Sharmazanashvili A.N., Megrelishvili L. Feature-based approach in CAD/CAM/CNC integration. <http://georgia-cadcam.web.cern.ch/georgia-cadcam>.

УДК 658.012.011.56

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОМАТИЗАЦИИ МАЗУТНОГО ТЕРМИНАЛА

А.Л. Опучин, С.П. Сердобинцев

*Рассмотрены недостатки автоматического управления сливом мазута из железнодорожных цистерн. Приведен способ устранения этих недостатков и алгоритм, обеспечивающий безаварийную работу установки слива мазута.*

Основной проблемой при перевалке мазута является его высокая вязкость. Для разгрузки железнодорожных цистерн застывший мазут разогревают до температуры, при которой возможна перекачка (60 °С). В связи с этим эффективность перевалки мазута определяется временем разогрева и перекачки разогретого мазута, а также энергозатратами на эти процессы. На эффективность работы терминала в целом влияет также уровень механизации и автоматизации технологических операций.

Несмотря на высокий уровень автоматизации современных нефтебаз, многие процессы протекают нестабильно, в результате чего возникают аварийные остановки. Анализ эксплуатации, выполненный ОАО «Калининградпромпроект» и ООО «НИМБ-ПРОЕКТ» (г. Калининград) в процессе разработки систем автоматизации прирельсового склада нефтепродуктов торгового порта г. Калининграда и расширения топливного комплекса на базе существующего мазутного хозяйства 33-го судоремонтного завода г. Балтийска, показывает, что не адаптированный к свойствам мазута режим размыва приводит к закупориванию сливного патрубка и выходу из строя перекачивающего оборудования.

На современных нефтебазах разгрузка мазута преимущественно закрытая, с нижним сливом. В аварийных ситуациях (при поломке нижнего клапана) возможна разгрузка через верхний люк. Мазут в цистерне разогревается паром или горя-

чим мазутом (80–90 °С), подаваемым через нижнюю горловину непосредственно в цистерну. Предпочтение отдается разогреву горячим мазутом, так как нежелательно повышенное обводнение. Нагрев мазута производится в теплообменнике, для которого теплоносителем служит пар.

Линейную скорость оплавления холодного мазута стекающим потоком горячего мазута можно определить по формуле [1]

$$v_0 = \frac{\alpha B}{C\rho},$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи;  $B$  — массовый параметр переноса;  $C, \rho$  — соответственно, теплоемкость и плотность холодного мазута.

Теплоемкость мазута зависит от его температуры и определяется по формуле [2]

$$C = 1055,5 + 2,5T,$$

где  $T$  — температура мазута.

Коэффициент теплопередачи находится из выражения [1]:

$$\alpha = \frac{1}{2} \rho v C c_{f_0} \text{Pr}^{-0,6},$$

где  $\text{Pr}$  — критерий Прандтля ( $\text{Pr} = \frac{\nu \rho C}{\lambda}$ );  $c_{f_0}$  — коэффициент трения;  $\nu$  — скорость течения мазута.

Массовый параметр теплопереноса равен отношению теплосодержания охлаждаемого ( $I_H$ ) и нагреваемого ( $I_C$ ) мазута: