

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КАК СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

grinyokann@gmail.com

Дуюн Т.А. д-р техн. наук, доц.,
Рубанов В.Г. д-р техн. наук, проф.,
Хуртасенко А.В. канд. техн. наук, доц.,
Гринек А.В. канд. техн. наук, доц.,
Кариков Е.Б., инженер,
Лесунов М.Е., студент

*Белгородский государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова*

Аннотация. Рассмотрено моделирование процесса резания в трехмерной постановке задачи с учетом изменяющихся физико-механических свойств материала и заготовки. Предложены функциональная схема системы управления скоростью резания и структура алгоритма управления, реализация которых направлена на изменение интенсивности тепловых потоков, теплового и напряженно-деформированного состояния изделия. Предложена аппроксимация комплекса результатов моделирования нейронными сетями. Определены модули системы управления процессом резания на основе нейро-нечетких моделей.

Ключевые слова: математическое моделирование, механическая обработка, технологический процесс, численные модели, оптимизация, нечеткая логика, управление качеством.

Белгородский регион является одним из промышленных центров, широко представленным машиностроительными предприятиями. В Белгородской области машиностроение и металлообработка являются одной из важнейших промышленных отраслей, количество поставщиков и производителей составляет около 280 предприятий различного формата и сферы деятельности. Из них около 80 занимаются производством машиностроительных изделий. Научные исследования по тематике гранта №14-41-08044 вызваны необходимостью фундаментальных исследований технологических процессов механической обработки и теоретического обоснования новых подходов

к управлению процессами резания. В рамках выполнения проекта предложен подход к разработке теоретических основ и методологии определения параметров состояния поверхностного слоя изделия и управления им при механической и отделочно-упрочняющей обработке, основанный на интегральном сочетании математического моделирования температурного поля и поля механических напряжений в зоне резания с автоматическим управлением режимами резания, что требует применения методов численного моделирования упруго-пластических деформаций для изотропных и анизотропных материалов.

Фундаментальная задача, на решение которой направлен проект, состоит в модификации аналитических зависимостей, отражающих динамику температурного поля и поля механических напряжений в зоне резания, на основе которой синтезируются алгоритмы управления процессом резания, обеспечивающие требуемые параметры качества обрабатываемой поверхности с учетом технологической наследственности, что порождает неполную определенность в задаче управления. Задачей является также разработка элементов систем управления технологическими режимами механической обработки с использованием программно-аппаратных средств для обеспечения заданных параметров качества обрабатываемого изделия.

Оптимальное состояние поверхностного слоя изделия формируется в результате механической обработки под воздействием многих факторов упруго-пластических процессов в зоне резания, течения металла, теплового поля и напряженно-деформированного состояния детали и инструмента. Поддержание оптимальной температуры резания в процессе обработки позволяет стабильно обеспечивать установленные параметры качества поверхностного слоя: микротвердость, величины остаточных напряжений и глубину упрочненного слоя. Комплекс этих показателей в пределах установленных значений положительно влияет на надежность работы изделия. Помимо качественных характеристик тепловой процесс в зоне резания влияет на точность работы системы «Станок-Приспособление-Инструмент-Деталь» и на точность формы детали.

Проведенное моделирование теплового состояния изделия в процессе обработки позволило: описать динамические процессы резания в трехмерной постановке задачи; определить влияние случайных возмущающих воздействий на процесс резания: неравномерного припуска, пространственных отклонений формы детали; уточнить модели напряженно-деформированного и теплового состояния в зоне резания при высокоскоростной обработке. Одним из

наиболее значимых технологических режимов, оказывающих влияние на температуру резания и соотношения при распределении тепловых потоков в зоне резания, является скорость резания. Управляя скоростью резания через главное движение резания, можно влиять на тепловые параметры с целью достижения заданных параметров качества обрабатываемой поверхности, точности размеров и формы обрабатываемой детали [1].

За основу расчета температуры в зоне резания Θ_p принята методика с использованием безразмерных комплексов (критериев подобия):

$$\Theta_p = \frac{0,95\tau_p Pe^{0.375} \left(\frac{\rho_1}{a}\right)^{0.055} \operatorname{erf}^{0.4} \sqrt{\frac{Petg\beta_1}{4}}}{c_p t g \beta_1^{0.625} F^{0.15} D^{0.045} (1 - \sin \gamma)^{0.65} \sin^{0.03} \alpha}, \quad (1)$$

где τ_p – сопротивление материала пластическому сдвигу, МПа; Pe , F и D – безразмерные критерии подобия; erf – интеграл вероятности; c_p – удельная объемная теплоемкость, Дж/м³·К; γ и α – передний и задний углы реза, рад; ρ_1 – радиус скругления режущей кромки реза, м; a – толщина среза, м; β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, рад.

Для расчета интенсивности тепловых потоков, действующих в зоне резания, принята методика [2,3], согласно которой тепловой поток в изделии:

$$Q_{\text{и}} = Q_{\text{ли}} + Q_{\text{тз}} - Q_3, \quad (2)$$

где $Q_{\text{ли}}$ – часть теплоты деформации, уходящей в изделие, Вт; $Q_{\text{тз}}$ – теплота, возникающая в результате трения между изделием и резцом, Вт; Q_3 – итоговый тепловой поток, возникающий в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента, Вт.

Составляющая теплоты деформации, уходящей в изделие:

$$\left[\begin{array}{l} Q_{\text{ли}} = 0,039 \frac{v}{\xi_a} (P_{ZO} (\xi_a - \sin \gamma) - P_{NO} \cos \gamma) (1 - b^*), \\ P_{NO} = P_N - N_3, \\ P_{ZO} = P_Z - F_{\text{тз}}, \\ b^* = \frac{1}{1 + 1,33 \frac{\xi_a \sqrt{\sin \beta_1}}{Pe}}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где v – скорость резания, м/мин; ξ_a – поперечная усадка стружки; γ – передний угол резца, рад; P_N , P_Z – соответственно нормальная и тангенциальная силы резания, Н; N_s , F_{T3} – нормальная сила и сила трения, действующие на площадке контакта задней поверхности инструмента с изделием, Н; b^* – относительное количество теплоты деформации, уходящее со стружкой; β_1 – угол наклона плоскости сдвига, рад; Pe – критерий Пекле.

Теплота трения между изделием и резцом формируется на площадке контакта задней поверхности инструмента с поверхностью резания, как результат работы сил упругопластического взаимодействия, при этом преобладает внешнее трение

$$Q_{T3} = 0,975 \cdot 10^{-2} \sigma_b v b l_3, \quad (4)$$

где σ_b – временное сопротивление разрыву обрабатываемого материала, МПа; b – ширина сечения среза, м; l_3 – длина контакта стружки с инструментом по задней поверхности, м.

Итоговый тепловой поток в изделии Q_3 , возникающий в результате теплообмена на площадке контакта поверхности резания с задней поверхностью инструмента, формируется как результирующий поток от нескольких источников выделения тепла, поэтому определяется в результате решения системы уравнений

$$\begin{cases} Q_3 = \frac{q_n l_n}{\lambda_p} N_1 + \frac{q_3 l_3}{\lambda_p} M_2, \\ Q_n = Q_c - \frac{q_n \Delta}{40 \lambda}, \end{cases} \quad (5)$$

где q_n – суммарный удельный тепловой поток, поступающий в резец по передней поверхности, Вт; l_n – длина контакта стружки с резцом, м; λ_p – теплопроводность материала режущей части резца, Вт/(м·К); λ – теплопроводность обрабатываемого материала, Вт/(м·К); q_3 – суммарный удельный тепловой поток по задней поверхности резца, Вт; l_3 – длина контакта резца с изделием по задней поверхности, м; N_1 и M_2 – соответственно коэффициент и безразмерная функция, зависящие от геометрических параметров режущего инструмента; Q_n – итоговый тепловой поток, действующий по передней поверхности, Вт; Q_c – тепловой поток, уходящий со стружкой, Вт; Δ – наибольшая толщина заторможенного слоя стружки, м.

Система уравнений (5) решается относительно суммарных удельных тепловых потоков по передней и задней поверхности инструмента.

Исходя из выражений (3) и (4) скорость резания является основным параметром технологических режимов, изменяя который можно влиять на распределение тепловых потоков. Большинство других параметров, таких как физико-механические свойства обрабатываемого и инструментального материалов, геометрические параметры режущего инструмента являются неизменяемыми исходными условиями процесса обработки.

Итоговый тепловой поток в изделии существенным образом зависит от скорости резания: первоначально возрастает при увеличении скорости резания, затем стабилизируется, так как увеличивается относительное количество тепла, уходящее со стружкой, и при определенных значениях снижаться.

Численное моделирование методом конечных элементов процесса течения рассмотрено на примере обработки токосъемной поверхности коллекторных узлов электродвигателя. Решение нестационарной задачи теплового поля обрабатываемого изделия в процессе резания не может быть получено в статике с достаточной точностью, так как обрабатываемая поверхность в разные моменты времени имеет разные граничные условия. Поэтому допустимо решать ряд взаимосвязанных статических задач. Обрабатываемую поверхность необходимо разделить на определенное количество равных частей для решения взаимосвязанных подзадач. Длина обрабатываемой поверхности коллектора, равная 90 мм, была разделена на 9 частей по 10 мм каждая. Для решения каждой отдельной подзадачи необходимо определить поступающий тепловой поток в выделенную часть изделия. В процессе резания при наступлении теплового баланса между источниками и стоками тепла интенсивность удельного теплового потока в изделие принята постоянной.

Общее количество тепла, поступающее в выделенную область, определяется выражением

$$Q_{\text{сум}} = \left(\frac{(q_3 + q_{\text{ТЗ}})l_3Lb}{s} + \frac{q_d aLb}{\sin \beta s} \right) t_T, \quad (6)$$

где L – длина выделенной части поверхности, м; b – ширина одной коллекторной пластины, принятой в расчетный контур, м; s – величина продольной подачи, м/об; t_T – время действия теплового потока, с; $q_{\text{ТЗ}}$ –

тепловой поток от трения по задней поверхности инструмента, поступающий в изделие, Вт, q_3 – итоговый тепловой поток, Вт.

Количество тепла, переходящее в изделие от источников (теплота, возникающая в результате трения между изделием и резцом), и итоговый тепловой поток по задней поверхности резца, существенным образом зависят от длины контакта по ней:

$$l_3 = 1,25 \rho_1 \sqrt{\frac{D}{\sin \alpha}}, \quad (7)$$

где ρ_1 – радиус скругления режущей кромки резца, м; α – задний угол резца, рад.

Время воздействия теплового источника через суммарный пройденный путь и скорость движения определяется по формуле

$$t_T = \frac{Lb}{sv}, \quad (8)$$

Во время отсутствия контакта резца с изделием осуществляется конвективный теплообмен поверхности с наружным воздухом. Время конвекции определяется выражением

$$t_k = \frac{L\pi D_{нов} v}{s} - t_T, \quad (9)$$

где $D_{нов}$ – обрабатываемый диаметр, м.

При решении одной динамической тепловой задачи нельзя одновременно учесть и тепловой поток и конвекцию с одной и той же поверхности, поэтому для каждой выделенной части необходимо решать две последовательные задачи: в одной прикладывать тепловой поток, а во второй – конвекцию. Тепловое поле, полученное при решении первой задачи, является исходными данными для второй задачи.

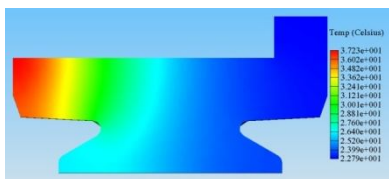


Рисунок 1 – Тепловое поле в момент начала резания первой выделенной области

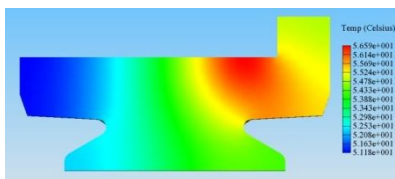


Рисунок 2 – Тепловое поле в момент окончания обработки

Данный подход позволяет решить основную проблему двух одновременных граничных условий для конечно-элементного моделирования. Результаты решения двух подзадач для момента начала резания и окончания обработки представлены на рис. 1 и 2.

Из рис. 1–2 видно, что в связи с высокой теплопроводностью коллекторной меди тепловой фронт опережает движущийся инструмент. В момент окончания точения первой подобласти, следующая подобласть уже имеет температуру около 30°C, а в момент окончания точения заготовка прогревается выше 50°C. В соответствии с представленной методикой выполняются аналогичные действия для всех выделенных областей. Главным условием является взаимосвязанность всех подзадач, т.е. результат решения каждой подзадачи должен являться начальными данными для решения следующей. На рис. 2 представлено тепловое поле, полученное после моделирования всех выделенных областей.

Для определения температурных деформаций заготовки необходимо решить задачу напряженно-деформированного состояния. Исходными данными являются результаты, полученные при решении тепловой задачи. Моделирование напряженно-деформированного состояния можно выполнить для любой из решенных тепловых задач. На рис. 3 и 4 представлены результаты моделирования напряженно-деформированного состояния, соответствующие тепловым состояниям, представленным на рис. 1 и 2.

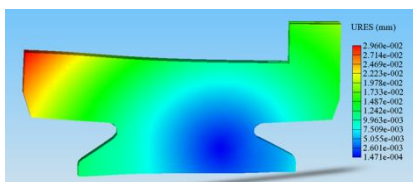


Рисунок 3 – Поле перемещений в момент начала резания первой выделенной области

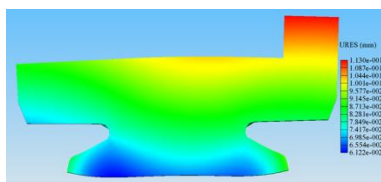


Рисунок 4 – Поле перемещений в момент окончания обработки

На сегодняшний момент разработаны модели определения теплового поля деталей в процессе обработки и методика обеспечения точности формы контактной поверхности. Они позволяют прогнозировать погрешность тепловых деформаций, связанных с режимами обработки; обеспечивать заданную точность, проводить обработку с оптимальной, с точки зрения точности формы и качества поверхностного слоя, скоростью резания.

Задача моделирования динамики процесса резания (процесс течения металла, стружкообразование, врезание инструмента) решалась в программном пакете Deformv10.2.

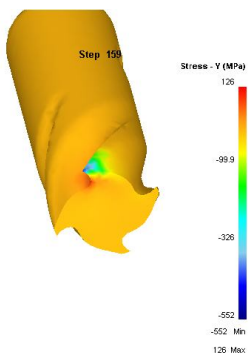


Рисунок 5 – Тепловое поле в режущей кромке фрезы

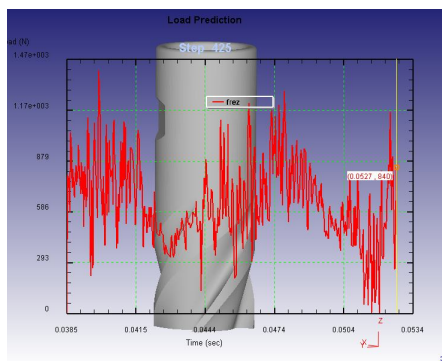


Рисунок 6 – Изменение составляющей силы резания

Решена задача изменения теплового состояния режущего инструмента в процессе резания.

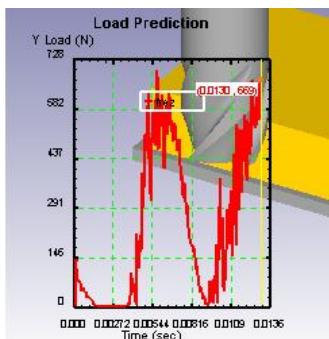


Рисунок 7 – Изменение сил резания при врезании инструмента

Определен ряд параметров процесса в зоне резания, не поддающийся прямому измерению, но косвенно влияющий на качество поверхностного слоя (рис. 8).

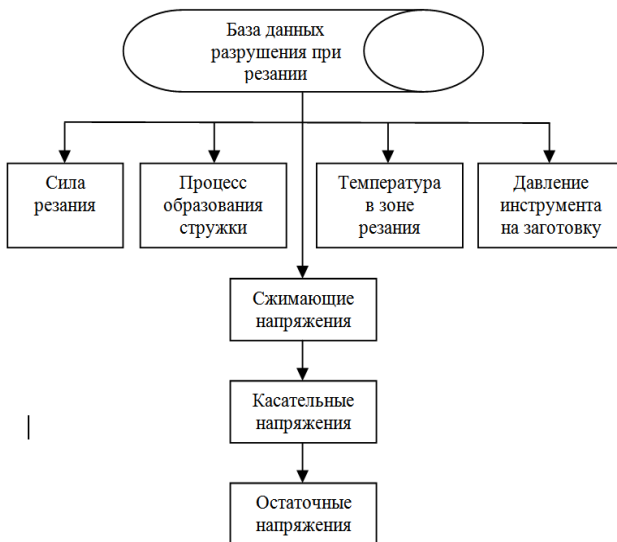


Рисунок 8 – Результаты моделирования процесса резания

На основании разработанных моделей и зависимостей предложена функциональная схема системы управления режимами резания по температурному критерию резания (рис. 9).

Корректирующие целеуказания подаются на микроконтроллер, который формирует установку на подсистему СПИД (электропривод станка и суппорта), что приводит к смене режима в желаемом направлении изменения температуры, а, следовательно, теплового поля и напряженно-деформированного состояния обрабатываемого изделия. Система управления тепловыми параметрами процесса резания предусматривает корректировку скорости резания и величины снимаемого припуска (путем определения количества проходов инструмента).

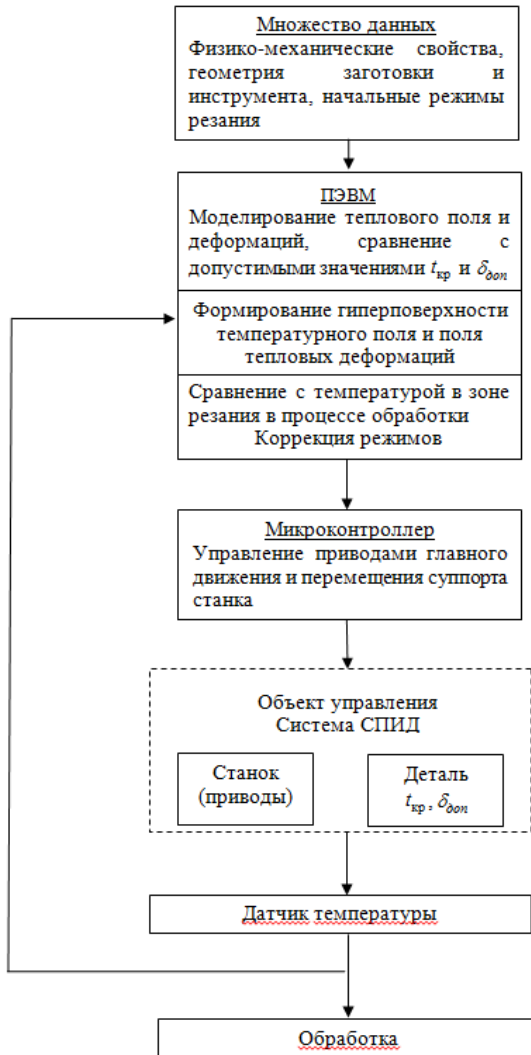


Рисунок 9 – Функциональная схема системы управления режимами резания по температурному критерию

Условиями, определяющими величину критической температуры резания $t_{кр}$, являются максимальная допустимая величина температурной деформации заготовки (в данном случае максимальная допустимая конусность детали) и температура начала разупрочнения обрабатываемого материала.

В процессе обработки происходит коррекция скорости вращения заготовки и глубины резания по температуре заготовки в зоне резания. Скорость резания и количество проходов, за который снимается основной припуск, являются управляющим воздействием в структуре управления технологическим процессом. Корректировка скорости резания и количества проходов производится после сравнения температурных деформаций заготовки с допустимым значением и сравнения температуры на поверхности заготовки с критической температурой начала разупрочнения материала заготовки (рис. 10).

С точки зрения построения систем управления процесс механической обработки имеет ряд сложностей для практической реализации. Процесс резания является стохастическим, нелинейным и зачастую с существенным недостатком информации о внутренних связях. В существующих системах стабилизации процессов резания уставки сил резания и температуры задаются на основании нагруженных режимов работы станка и максимальной погрешности. Это заведомо снижает вполне допустимый порог производительности. При этом одинаковые станки одной технологической линии могут значительно отличаться жесткостью, степенью износа узлов и элементов. Износ инструмента сложным образом связан с силовыми и температурными характеристиками процесса резания, которые трудно представить в формализованном виде, причем в форме, пригодной для решения задач построения автоматической системы управления процессом резания. Как известно, температурные поля, а точнее, процесс теплопередачи, описывается дифференциальными уравнениями в частных производных, которые, даже определив, трудно использовать при решении задач синтеза системы. В связи с этим был разработан подход к созданию математической модели этого процесса в форме передаточных функций дробного порядка, что делает разрешимой задачу проектирования элементов системы автоматического управления.

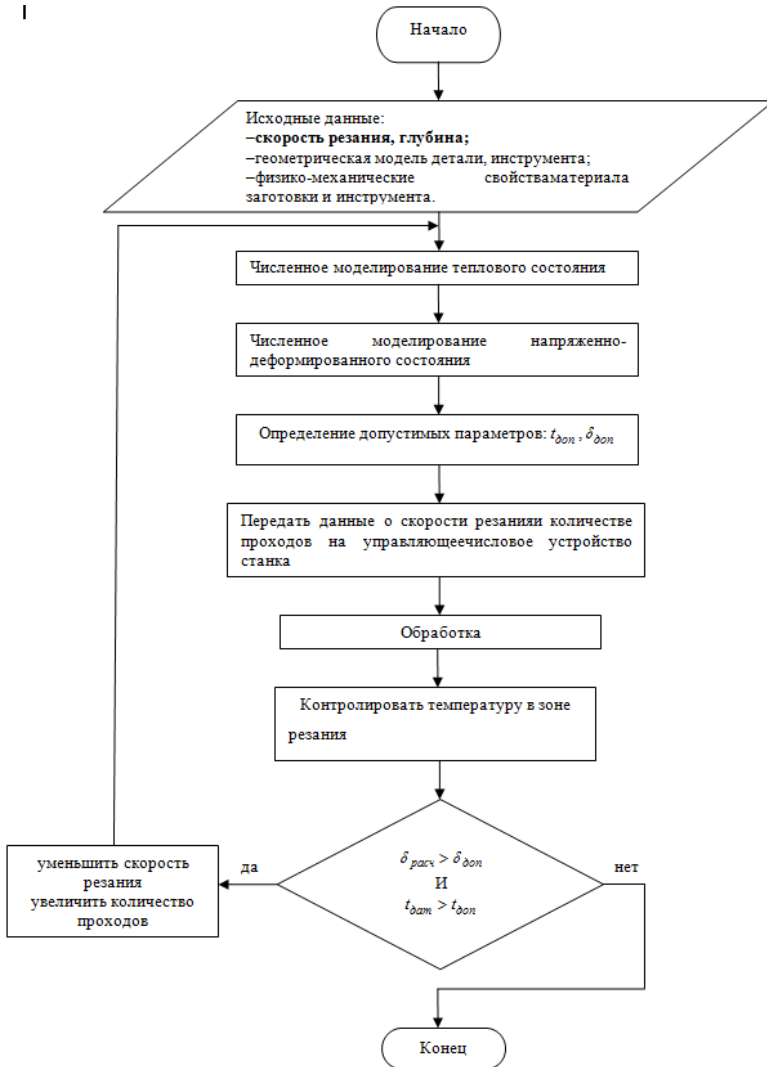


Рисунок 10 – Алгоритм системы управления скоростью резания

Наличие дополнительных элементов неопределенности, связанных с изменением физико-механических свойств материала детали и инструмента приводит к необходимости рассмотрения задачи

управления в классе неформализованных задач, решаемых с применением нечеткой логики или нейро-нечетких алгоритмов, поскольку:

1. Алгоритм определения выходных показателей качества изделия определен, но его применение ограничено вычислительной способностью ЭВМ и ПЭВМ, времени расчета в реальном времени и памяти.

2. Использование базы нечетким правил позволяет уйти от вычислительного функционального процесса.

3. Среди выходных параметров системы есть нечеткие параметры, описываемые в наборах правил: микроструктура поверхностного слоя, твердость и величина упрочнённого слоя как совокупный показатель.

Результаты исследования, полученные в 2014 году, являются базой для решения задачи управления технологическим процессом механической обработки. При наличии описанных связей векторов входных и выходных параметров механической обработки в виде относительно «быстрой» нейро-нечеткой модели становится возможным управлять вектором выходных параметров качества по нескольким критериям и фактически влиять на «неуловимые» процессы в зоне съема стружки. Предполагается разработка четырех основных модулей системы: модуля аппроксимации; модуля оптимизации; модуля управления; нечеткого регулятора.

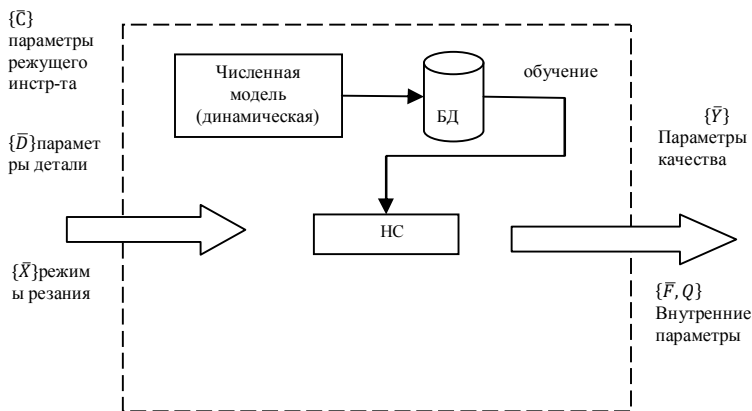


Рисунок 11 – Модуль 1 – аппроксимации численной модели нейронной сетью

На основании динамической численной модели процесса резания, комплексно в трехмерной постановке описывающей процесс стружкообразования (рис. 11) осуществляется настройка и подбор параметров нейронной сети. Выходные параметры нейронной сети могут выбираться в результате решения задач оптимизации или управления.

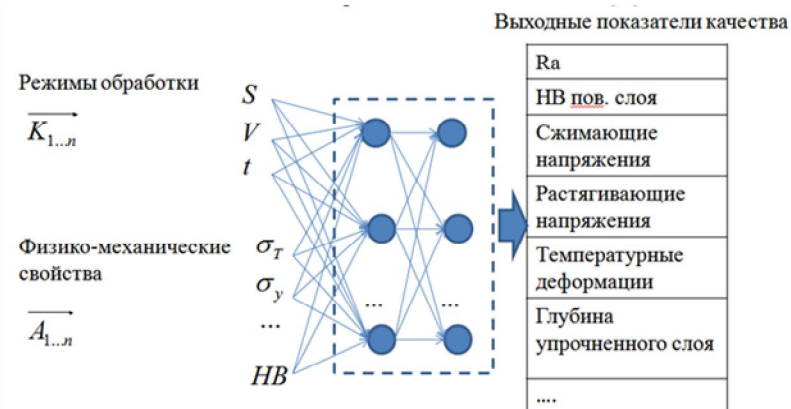


Рисунок 12 – Нейросетевая модель для аппроксимации результатов численного моделирования

Структура нейронной сети определяется, исходя из нужд управления в реальном времени (рис. 12-13).

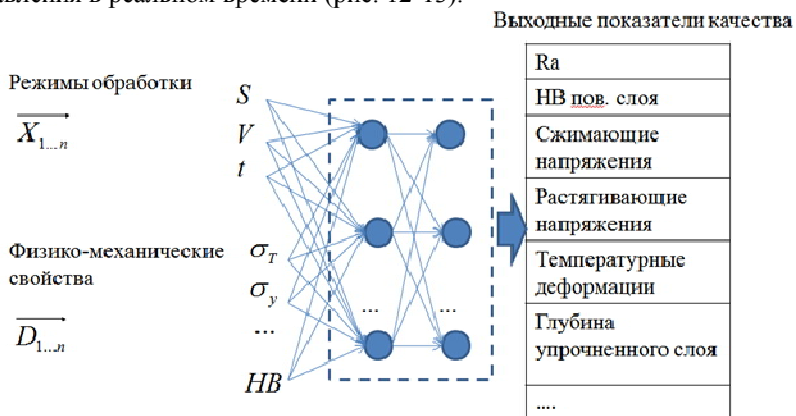


Рисунок 13 – Структура нейронной сети для применения в управляющем устройстве

Мгновенные значения параметров в зоне резания могут быть использованы для расчета требуемых показателей качества.

Во втором модуле оптимизация входных параметров $\{\vec{X}\}$ (рис. 14) происходит на основе выбранного метода оптимизации и определенной функции ранжирования критериев. Функция ранжирования зависит от проекции вектора качества $\{\vec{Y}\} \rightarrow \{Y_{\text{опт}}^*\}$ – выбора критериев оптимальности. Оптимизировать процесс резания можно с двух точек зрения:

- считать возмущающие воздействия (силы и температуру резания) постоянными), т.е. решается статическая задача отыскания оптимальных по какому-либо критерию значений технологических режимов: подачи, скорости, количества проходов. Данная задача может решаться на основе нейронных сетей;

- построение системы управления процессом резания как динамическим процессом.

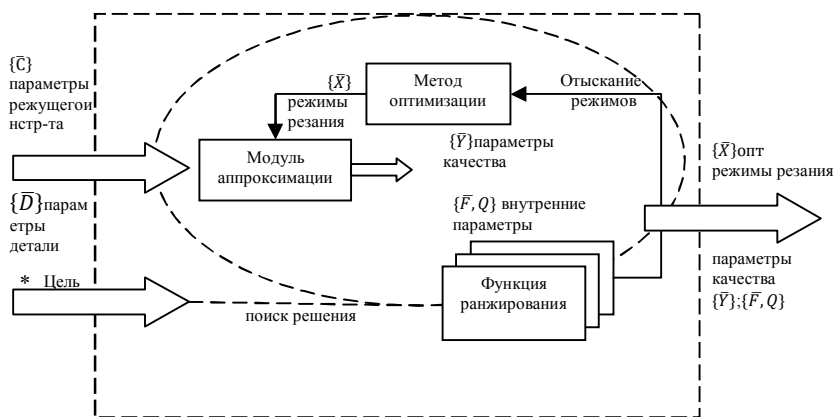


Рисунок 14 – Модуль 2 – оптимизации на основе нейронной сети

На рис. 15 приведена общая схема управления процессом резания, включающая вышеперечисленные элементы системы.

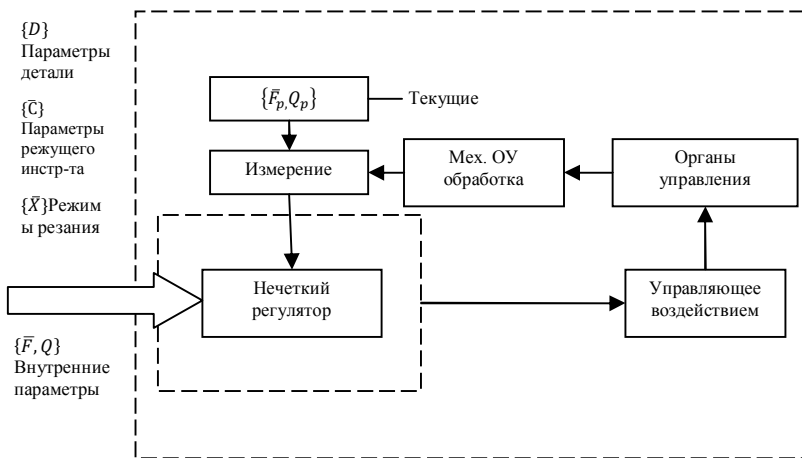


Рисунок 15 – Модуль 3 – управление процессом резания

Нечеткий регулятор на основе аппроксимирующей нейронной сети управляет рабочими органами станка, отслеживая отклонение измеренных сил резания и температуры в зоне резания от заданных.

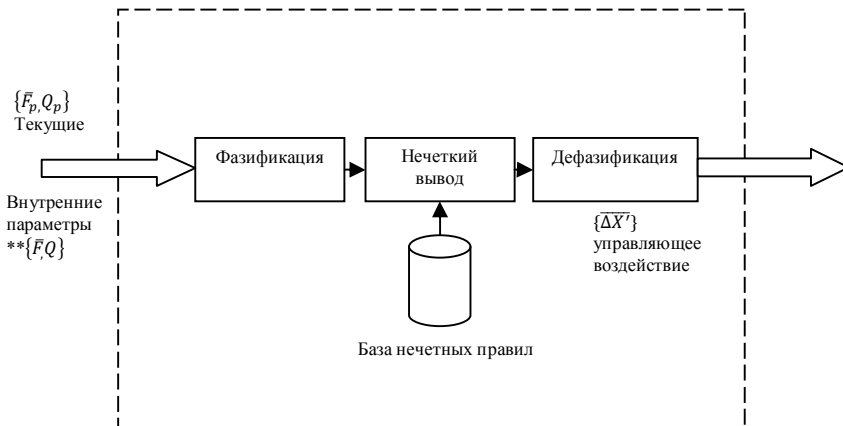


Рисунок 16 – Модуль 4 – нечеткий регулятор

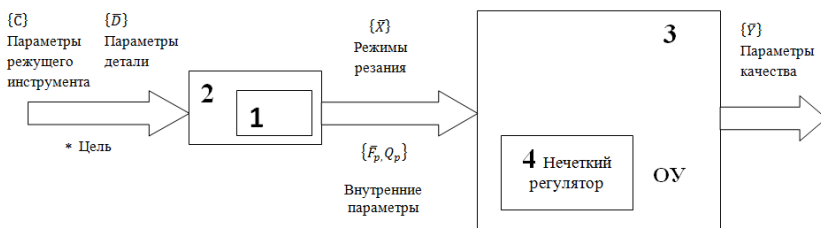


Рисунок 17 – Общая схема: 1 – модуль аппроксимации численной модели нейронной сетью; 2 – модуль оптимизации; 3 – модуль управления процессом резания; 4 – нечеткий регулятор

Итак, по этапу 2014 года выполнены следующие работы:

- проведено моделирование процесса резания в трехмерной постановке задачи с учетом изменяющихся физико-механических свойств материала и заготовки;
- разработана функциональная схема системы управления режимами резания по температурному критерию. Управление тепловым состоянием заготовки и инструмента позволяет повысить размерную точность изделия и обеспечить требуемое качество поверхностного слоя;
- разработан алгоритм системы управления скоростью резания с использованием данных, полученных в результате численного моделирования.

Результаты исследования опубликованы в статьях, индексируемых базой данных Scopus (4 публикации), журналах из перечня ВАК «Промышленные контроллеры АСУ» и «Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика» (2 публикации).

Подана заявка на изобретение «Способ идентификации слабоформализованного объекта управления».

В 2015 году планируется продолжить исследования по следующим направлениям:

- определение взаимосвязей процессов в зоне резания и износа инструмента;
- моделирование случайных процессов, возникающих при резании с целью определения передаточных функций для математического описания системы управления процессом резания.

– синтез алгоритмов управления процессом резания на основе нейро-нечеткой модели в условиях неопределенности.

Планируется получить следующие результаты:

– определить вид, структуру нейронной сети, количество слоев, выбрать метод обучения сети, определить функции активации нейронов. Сгенерировать обучающие выборки на основе результатов моделирования.

– определить взаимосвязи вектора показателей качества детали от технологических режимов. Разработать алгоритмы оптимизации.

– найти связи технологической наследственности между условиями обработки и качеством поверхностного слоя для высоких скоростей резания и новых конструкционных материалов, в том числе, многослойных режущих пластин.

– разработать структуру управляющего устройства с использованием нейро-нечеткого управления.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта №14-41-08044 «р_офи_м», с использованием оборудования ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Список литературы:

1. Wins K., Varadarajan A., Ramamoorthy B. Optimization of Surface Milling of Hardened AISI4340 Steel with Minimal Fluid Application Using a High Velocity Narrow Pulsing Jet of Cutting Fluid. Engineering. 2010. Vol. № 10. P. 793-801.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
3. Гончарова С.Г. Интеллектуальная система управления процессом механообработки с оперативным использованием нечеткой нейросетевой модели знаний: дис. канд. техн. наук: 05.13.06. Уфа, 2001. С. 207.
4. Рубанов В.Г., Титов В.С., Бобырь М.В. Адаптивные системы принятия нечетко-логических решений: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2014. 237 с.
5. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Моделирование и оптимизация технологических процессов изготовления изделий с использованием метода динамического программирования // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 3. С. 61-65.

6. Duyun T.A., Grinek A.V., Rybak L.A. Methodology of manufacturing process design, providing quality parameters and minimal costs // World Applied Sciences Journal. 2014. № 30 (8). P. 958-963.
7. Дуюн Т.А., Гринек А.В., Сахаров Д.В. Управление тепловыми параметрами процесса механической обработки с использованием численного моделирования их тепловых зависимостей // Промышленные контроллеры АСУ. № 10. С. 43-50.
8. Duyun T.A., Grinek A.V., Manzhos R.V. The Optimum Cutting Speed and Acceptable Parameters for Tool Vibration When Turning an Inhomogeneous Material // Advances by Environment Biology. № 8(13): P. 112-116.
9. Duyun T.A., Grinek A.V., Manzhos R.V. Modelling of Thermal Field of Electromotor's Collector in Service // Advances by Environment Biology. № 8(13): P. 183-190.